

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 966 751**

51 Int. Cl.:

C25B 1/04 (2011.01)

F04D 17/12 (2006.01)

F04D 29/70 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.03.2022 E 22161012 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.09.2023 EP 4060089**

54 Título: **Proceso y aparato para comprimir gas hidrógeno en un compresor centrífugo**

30 Prioridad:

15.03.2021 US 202117201399

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

24.04.2024

73 Titular/es:

**AIR PRODUCTS AND CHEMICALS, INC. (100.0%)
1940 Air Products Boulevard
Allentown, PA 18106-5500, US**

72 Inventor/es:

**WEHRMAN, JOSEPH GERARD;
HIGGINBOTHAM, PAUL y
WHITE, VINCENT**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 966 751 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

Proceso y aparato para comprimir gas hidrógeno en un compresor centrífugo

- 5 La presente invención se refiere a la compresión de gas hidrógeno utilizando compresores centrífugos. La presente invención se refiere particularmente a formas de mantener la fracción molar de agua en gas hidrógeno que es suministrado a una etapa de compresión centrífuga de un sistema de compresión de múltiples etapas durante períodos en los que el gas hidrógeno está siendo reciclado.
- 10 Los compresores de desplazamiento positivo, tales como los compresores alternativos, se utilizan normalmente en procesos industriales para comprimir gas hidrógeno. Este tipo de compresor funciona confinando volúmenes sucesivos de gas dentro de un espacio cerrado, por ejemplo, utilizando un pistón accionado por un cigüeñal para entregar gases a alta presión.
- 15 El rendimiento de los compresores de desplazamiento positivo, tales como los compresores alternativos, suele ser uniforme para medios gaseosos tanto de peso molecular muy bajo como de peso molecular alto. Por lo tanto, este tipo de compresor es adecuado para una variedad de gases y es particularmente adecuado para la compresión de gas hidrógeno. Sin embargo, estos tipos de compresores no son los preferidos para manejar grandes volúmenes de gas. Para ello, se debe utilizar una gran cantidad de compresores en paralelo debido a la estructura de este tipo de
- 20 compresores. Esto da lugar a gastos de capital y costes operativos considerables.
- Por el contrario, los compresores centrífugos son un tipo de compresor dinámico, en el que el gas se comprime mediante la acción mecánica de paletas giratorias o impulsores que imparten velocidad al gas. Por lo general, el gas entra por el centro de los impulsores y es impulsado hacia los bordes radiales mediante un movimiento giratorio para
- 25 lanzar gases a alta velocidad que impactan en la carcasa. La velocidad del gas se convierte en presión estática para entregar gases a alta presión. Estos tipos de compresores suelen ser más adecuados para manejar grandes volúmenes de gases a costes más bajos.
- Sin embargo, estos compresores normalmente no son adecuados para comprimir gases de bajo peso molecular, tales como el hidrógeno. Esto se debe a que es más difícil establecer una fuerza centrífuga suficiente debido a la menor
- 30 densidad del gas, lo que dificulta la compresión a alta presión.
- Por lo tanto, para la compresión centrífuga, la relación de presión (la presión de descarga dividida por la presión de entrada, para una etapa particular de compresión) es muy sensible y dependiente del peso molecular del gas que está siendo comprimido. Es decir, la compresión centrífuga de un gas con un peso molecular bajo puede dar como resultado
- 35 una presión de descarga en la salida que es inferior a la presión especificada, a menos que se utilicen impulsores adicionales.
- Normalmente, para comprimir un gas de bajo peso molecular en un sistema de compresión centrífuga, dicho sistema se debe diseñar con muchos más impulsores en serie para adaptarse a la densidad reducida del gas. Este diseño
- 40 aumenta sustancialmente el coste del sistema de compresión y no es deseable debido a las limitaciones mecánicas inherentes de dicho sistema.
- El documento WO 2010/111357 A2 describe sistemas de compresión de gas hidrógeno, cada uno de los cuales incluye un compresor centrífugo de múltiples etapas.
- 45 El documento EP 3 789 616 A1 describe un proceso para producir gas hidrógeno comprimido, comprendiendo el proceso: electrolizar agua para producir gas hidrógeno, y comprimir el gas hidrógeno en un sistema de compresión de múltiples etapas para producir gas hidrógeno comprimido. El sistema de compresión de múltiples etapas comprende una etapa de compresión centrífuga.
- 50 Por lo tanto, existe el deseo en la técnica de proporcionar una solución que permita a los sistemas de compresión centrífuga mantener las relaciones de presión de una manera eficiente cuando se utilizan con gases de bajo peso molecular, sin aumentar drásticamente los costes.
- 55 En la actualidad, los inventores no conocen ninguna técnica anterior que aborde esta cuestión en el contexto de la compresión de gas hidrógeno húmedo en compresores centrífugos.
- Según un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un proceso para producir gas hidrógeno comprimido, comprendiendo el proceso:
- 60 electrolizar agua para producir gas hidrógeno, y
comprimir el gas hidrógeno en un sistema de compresión de múltiples etapas para producir
gas hidrógeno comprimido;
el sistema de compresión de múltiples etapas que comprende:
- 65

una etapa de compresión centrífuga con un extremo de alimentación y un extremo de producto, y un sistema de reciclaje para reciclar una parte del gas hidrógeno desde el extremo de producto hasta el extremo de alimentación de la etapa de compresión centrífuga;

en donde la alimentación de gas hidrógeno se alimenta al extremo de alimentación de la etapa de compresión centrífuga a una temperatura y presión de alimentación predeterminadas y que tiene una fracción molar de agua predeterminada;

en donde una parte del gas hidrógeno es eliminada, según sea necesario, del extremo de producto, se reduce la presión en el sistema de reciclaje a la presión de alimentación predeterminada antes de cualquier etapa de enfriamiento para proporcionar gas hidrógeno a presión reducida que después se recicla para formar al menos parte de la alimentación de gas hidrógeno a la etapa de compresión centrífuga; y

en donde el proceso comprende enfriar gas hidrógeno que comprende gas hidrógeno a presión reducida, de modo que la fracción molar de agua en la alimentación de gas hidrógeno sea la fracción molar de agua predeterminada.

Según un segundo aspecto de la presente invención, se proporciona un aparato para producir gas hidrógeno comprimido, comprendiendo el aparato:

una pluralidad de electrolizadores dispuestos en paralelo para electrolizar agua para proporcionar gas hidrógeno;

un sistema de generación de electricidad para generar electricidad para alimentar la pluralidad de electrolizadores, estando el sistema de generación de electricidad en comunicación eléctricamente conductora con la pluralidad de electrolizadores;

un sistema de compresión de múltiples etapas para comprimir el gas hidrógeno para proporcionar un gas hidrógeno comprimido, comprendiendo el sistema de compresión de múltiples etapas:

un extremo de entrada, un extremo de salida y una etapa de compresión centrífuga que tiene un extremo de alimentación y un extremo de producto, estando el extremo de entrada en comunicación de flujo de fluido con la pluralidad de electrolizadores a través de un cabezal de alimentación; y

un sistema de reciclaje en comunicación de flujo de fluido con el extremo de producto y el extremo de alimentación de la etapa de compresión centrífuga, comprendiendo el sistema de reciclaje: una válvula para reducir la presión del gas hidrógeno reciclado a una presión de alimentación predeterminada antes de cualquier paso de enfriamiento para proporcionar gas de hidrogeno a presión reducida;

un enfriador para enfriar gas hidrógeno que comprende gas hidrógeno a presión reducida en el sistema de reciclaje y/o en el cabezal de alimentación a la etapa de compresión centrífuga.

La presente invención se ocupa de mantener una fracción molar de agua en gas hidrógeno que es alimentada a una etapa de compresión centrífuga.

Los términos "fracción molar de agua" o "fracción de mol de agua" en el contexto de la presente invención, se utilizan para hacer referencia a la cantidad molar de vapor de agua presente en el gas hidrógeno, dividida por la cantidad molar total de todos los constituyentes en el gas hidrógeno, expresada como una cantidad adimensional (mol/mol). Este término se refiere a la fracción molar de vapor de agua (es decir, agua en fase gaseosa) y no incluye agua líquida, a menos que se indique expresamente lo contrario.

El término "humedad absoluta" se utiliza en el presente documento para hacer referencia a la masa de vapor de agua presente en una unidad de volumen de gas, normalmente medida en unidades de gramos de agua por metro cúbico de gas (g m^{-3}). El valor de la humedad absoluta es independiente de la temperatura y de la presión y corresponde a la concentración másica de vapor de agua en un volumen de gas hidrógeno.

La fracción molar de agua se puede determinar a partir de la humedad absoluta del gas hidrógeno. La fracción molar de agua en gas hidrógeno es independiente de su temperatura o presión, excepto cuando la temperatura del gas hidrógeno cae por debajo de la temperatura del punto de rocío (en cuyo caso la condensación comienza a eliminar el agua de la fase gaseosa).

El término "predeterminado", cuando se utiliza con respecto a la temperatura y presión de alimentación de una etapa de compresión, esta destinado a referirse a las condiciones seleccionadas por un usuario para la alimentación de gas hidrógeno que es alimentado a esa etapa particular de compresión, generalmente dirigido a las condiciones operativas óptimas para esa etapa en particular. Estas condiciones variarán dependiendo de si la etapa es una etapa de compresión inicial, intermedia o final.

A modo de ejemplo, un sistema de compresión de múltiples etapas con cuatro etapas puede tener presiones de alimentación predeterminadas de 1,1, 2,5, 6 y 13,6 bar en la entrada de cada etapa respectivamente, y la temperatura de alimentación predeterminada en cada etapa puede ser de 40° C.

5 Las condiciones de alimentación predeterminadas para cada etapa se pueden seleccionar para el diseño particular del sistema de compresión de múltiples etapas, la presión del gas que entra en el sistema y/o la presión de descarga requerida para la salida del sistema de compresión de múltiples etapas, por ejemplo cuando un proceso aguas abajo requiere gas a una presión específica.

10 Dado que las condiciones de alimentación predeterminadas seleccionadas pueden variar según la etapa de compresión en cuestión, se apreciará que la presente invención podría implementarse en diversos sistemas de compresión de múltiples etapas, independientemente de la temperatura y de la presión de alimentación predeterminadas particulares para cada etapa.

15 A modo de antecedente, la fracción molar de agua en una mezcla de gases se puede describir mediante la siguiente ecuación:

$$x_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{n_{total}}$$

20 en donde x_{H_2O} es la fracción molar de agua, n_{H_2O} es la cantidad molar de agua en la mezcla de gases, y n_{total} es la cantidad molar total de todos los constituyentes de la mezcla de gases.

La fracción molar máxima de agua que puede haber en un gas a una temperatura determinada depende de la presión de vapor de saturación del agua. La presión de vapor de saturación depende en gran medida de la temperatura y describe la presión máxima de vapor de agua que puede existir a una temperatura determinada, generalmente expresada en unidades Pa. Generalmente, cuanto mayor es la temperatura, mayor es la presión de vapor de saturación del agua y viceversa.

Si un gas se enfría gradualmente mientras se mantiene a una presión y una fracción molar de agua constantes, llegará un punto en el que el gas estará completamente saturado de agua para esa temperatura. La temperatura a la que esto ocurre a veces se denomina "punto de rocío". Si el gas se enfría más, el vapor de agua comenzará a condensarse para formar agua líquida y la fracción molar de agua en el gas disminuirá. Cuando la fracción molar de agua disminuye, esto indica que la tasa de condensación excede la tasa de evaporación.

35 En el contexto de un sistema de compresión de múltiples etapas donde la presión del gas aumenta para la entrada de cada etapa posterior, el punto de rocío en cada etapa posterior será mayor que en la etapa anterior. En otras palabras, la capacidad del gas hidrógeno para "retener" el vapor de agua disminuye a presiones más altas, por lo que a presiones más altas, el vapor de agua se condensará fuera del gas si se enfría a la misma temperatura que en la etapa(s) anterior(es).

40 Otra forma de cuantificar la concentración de vapor de agua en el gas hidrógeno es hacer referencia a la "humedad relativa", que es una forma de expresar el nivel de saturación del gas hidrógeno con agua para una temperatura y presión determinadas. Equivale a la presión de vapor real del agua dividida por la presión de vapor de saturación, expresada como porcentaje.

45 Una forma de determinar la humedad relativa del gas hidrógeno es midiendo la humedad absoluta y después calculando la humedad relativa a partir de una curva de saturación estándar (por ejemplo, tablas de vapor). La humedad absoluta se puede medir utilizando métodos conocidos en la técnica, tales como utilizando un espectrómetro de infrarrojos o un medidor de punto de rocío, por ejemplo.

50 La fracción molar de agua en gas hidrógeno se puede determinar (si es necesario) midiendo directamente o midiendo la humedad absoluta y calculando en consecuencia.

El término "peso molecular aparente" en el contexto de la presente invención está destinado a hacer referencia al peso molecular de un medio gaseoso que tiene una mezcla de constituyentes de bajo y alto peso molecular. El peso molecular aparente de una mezcla de gases se puede medir o, alternativamente, se puede estimar calculando la suma de los productos de las fracciones molares de cada componente multiplicada por el peso molecular de ese componente, es decir,

60
$$M_{app} = \sum (M_A \times y_A + M_B \times y_B + \dots)$$

para una mezcla de gases A + B + ..., donde M_X es el peso molecular de un gas componente X, e y_X es la fracción molar del gas componente X.

El término "adecuado" en el contexto de la reducción de presión pretende significar que la presión del gas hidrógeno se reduce en un grado apropiado teniendo en cuenta la presión de entrada de la etapa del sistema de compresión de múltiples etapas a la que es alimentado el gas hidrógeno a presión reducida.

5 En la siguiente descripción de realizaciones de la presente invención, las presiones dadas son presiones absolutas a menos que se indique lo contrario.

Según un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un proceso para producir gas hidrógeno comprimido.

10 El primer paso del proceso consiste en electrolizar agua para producir gas hidrógeno. El segundo paso del proceso implica comprimir el gas hidrógeno en un sistema de compresión de múltiples etapas para producir gas hidrógeno comprimido.

15 En el proceso de la presente invención, el sistema de compresión de múltiples etapas comprende una etapa de compresión centrífuga con un extremo de alimentación y un extremo de producto, en donde la alimentación de gas hidrógeno se alimenta al extremo de alimentación de la etapa de compresión centrífuga a una temperatura y presión de alimentación predeterminadas y teniendo una fracción molar de agua predeterminada.

20 El "extremo de alimentación" de la etapa de compresión es el extremo del compresor que recibe gas hidrógeno para la compresión, y el "extremo de producto" es el extremo del compresor que descarga gas hidrógeno comprimido.

25 Se apreciará que aunque el suministro de gas hidrógeno siempre se produce al principio mediante electrólisis, la alimentación de gas hidrógeno que se alimenta a la etapa de compresión particular puede provenir de varias fuentes (es decir, no directamente de los electrolizadores, sino del gas hidrógeno que se extrajo del sistema de compresión de múltiples etapas y se almacenó en un sistema de almacenamiento opcional, o si la etapa de compresión centrífuga es una etapa intermedia o final, el gas hidrógeno alimentado desde una etapa aguas arriba). El término "suministro de gas hidrógeno" se utilizará en el presente documento para hacer referencia al gas hidrógeno suministrado a una etapa para su compresión.

30 El término "alimentación de gas hidrógeno" se utiliza en el presente documento para hacer referencia al gas hidrógeno que es alimentado al extremo de alimentación de la etapa de compresión centrífuga, ya sea antes o después de la adición de gas hidrógeno reciclado, según sea necesario, y opcionalmente después de ser alimentado a través de un separador de fases.

35 Por consiguiente, la presente invención se refiere al uso de compresores centrífugos para comprimir gas hidrógeno producido por electrólisis. El gas hidrógeno producido por la electrólisis del agua contendrá impurezas. En particular, el gas hidrógeno producido por electrólisis estará saturado de agua y normalmente contiene algo de oxígeno residual. El gas hidrógeno producido de esta manera a menudo se denomina gas hidrógeno "húmedo".

40 El gas hidrógeno puro tiene un peso molecular (g/mol) de 2,016. Sin embargo, el gas hidrógeno húmedo generado por electrólisis del agua normalmente estará saturado de agua. El agua tiene un peso molecular de 18,015, que es significativamente mayor que el del gas hidrógeno. Por lo tanto, el gas hidrógeno "húmedo" tiene un peso molecular "aparente" más alto que el gas hidrógeno puro, normalmente alrededor de 3, pero necesariamente en algún lugar entre el peso molecular del hidrógeno puro y el agua pura, 2,016 y 18,015 respectivamente, dependiendo del contenido de vapor de agua. Por tanto, en algunas realizaciones, el gas hidrógeno generado por electrólisis del agua tendrá un peso molecular aparente de aproximadamente 2,5 a aproximadamente 4, o de aproximadamente 2,5 a aproximadamente 3,5.

50 Cuando el gas hidrógeno comprimido saturado de agua pasa a través de los interenfriadores y postenfriadores de un sistema de compresión de múltiples etapas, se eliminará agua del gas hidrógeno a través de la condensación del agua gaseosa y la separación de fases del agua líquida. Esta eliminación de agua del gas hidrógeno, a su vez, hace que la fracción molar de agua y, por tanto, el peso molecular aparente del gas hidrógeno, disminuya a medida que se extraen las moléculas de agua más pesadas y se seca el gas hidrógeno. A medida que se elimina el agua, el peso molecular aparente del gas hidrógeno se acerca a aproximadamente 2,016.

60 Como se mencionó anteriormente, en los compresores centrífugos la relación de presión (la presión de descarga dividida por la presión de entrada para una etapa de compresión) es muy sensible y dependiente del peso molecular del gas que está siendo comprimido.

Este cambio en el peso molecular aparente debido al secado del gas hidrógeno húmedo entre etapas en un sistema de compresión de múltiples etapas puede dar lugar a un rendimiento inferior al óptimo de los compresores centrífugos a los que posteriormente se puede alimentar el gas hidrógeno seco, lo que da lugar a presiones de descarga por debajo de la presión especificada.

Por ejemplo, en general se conocen sistemas de reciclaje que hacen circular una parte de gas hidrógeno desde un enfriador en el extremo de producto hasta el extremo de alimentación de una etapa de compresión. Por ejemplo, se pueden utilizar sistemas de reciclaje para evitar la sobrecarga del compresor durante periodos en los que el flujo másico del suministro de gas hidrógeno es inferior al requerido.

El gas hidrógeno comprimido descargado desde el extremo de producto tiene una temperatura y presión más altas que el gas hidrógeno en el extremo de alimentación. A presiones más altas, la fracción molar máxima posible de agua en el gas hidrógeno es menor debido a la capacidad reducida del gas para "retener" el vapor de agua. Por lo tanto, si esta presión más alta se mantiene mientras el gas se enfría nuevamente a la temperatura de alimentación predeterminada, el exceso de vapor de agua se condensa y se elimina del gas hidrógeno comprimido. Una vez que este gas se expande y se recicla al extremo de alimentación de la etapa de compresión, su fracción molar de agua se reduce en comparación con el gas hidrógeno no reciclado.

Por lo tanto, una vez añadido a la alimentación de hidrógeno fresco y húmedo, este hidrógeno reciclado reducirá el peso molecular aparente global del gas hidrógeno que será alimentado a la etapa de compresión. En consecuencia, tales métodos de reciclaje de gas hidrógeno pueden dar como resultado un rendimiento inferior al óptimo de un compresor centrífugo al comprimir gas hidrógeno húmedo.

La Tabla 1 a continuación demuestra este efecto. En particular, se puede ver que la cantidad de agua eliminada entre etapas y, por tanto, la reducción del peso molecular aparente, da como resultado una reducción de la relación de presión tras el reciclaje.

Por ejemplo, en la etapa 1 se comprime gas hidrógeno hasta la presión de descarga especificada de 2,5 bar. Entre etapas, la temperatura del gas se reduce en un enfriador y pierde agua (fracción molar de agua de 0,067 a 0,030), por lo que tiene un peso molecular aparente reducido (de 3,089 a 2,488 peso molar). En el siguiente ejemplo, todo este gas se reduce en presión a la presión de alimentación de la etapa 1 y se recicla nuevamente a través de la etapa 1. El resultado es que la presión de descarga para la etapa 1 para el gas reciclado es de 2,167 bar. Esta es mucho más baja que la presión especificada de 2,5 bar.

La Tabla 1 también demuestra cómo el punto en el que un gas está completamente saturado de agua (humedad relativa del 100%) para una temperatura y presión no será el mismo para ese gas a una temperatura y presión diferentes, pero con la misma fracción molar de agua.

Tabla 1: Compresión centrífuga de hidrógeno					
Alimentación normal, presión de descarga de 30 bar.					
Nº de Etapa	1	2	3	4	4
Ubicación	Entrada	Entrada	Entrada	Entrada	salida
Presión de etapa (bar)	1.1	2.5	6	13.6	30
Humedad relativa de la etapa	100%	100%	100%	100%	100%
Temperatura de la etapa (°C)	40	40	40	40	40
Fracción molar de agua	0.067	0.030	0.012	0.005	0.002
Peso molecular aparente	3.089	2.488	2.213	2.103	2.055
Reciclaje completo					
Humedad relativa de entrada de etapa	44%	42%	44%	45%	-
Temperatura de entrada de etapa (°C)	40	40	40	40	-
Fracción molar de agua	0.030	0.012	0.005	0.002	-
Peso molecular aparente	2.488	2.213	2.103	2.055	-
Relación de cabeza	0.806	0.889	0.950	0.977	-
Relación de relaciones de presión (reciclaje total frente a flujo total)	0.867	0.918	0.965	0.984	-
Presión de descarga en el reciclaje con la misma presión de entrada	2.167	5.510	13.122	29.532	-
Se necesita un cambio de velocidad para mantener la relación de presión	1.114	1.060	1.026	1.011	-

Por ejemplo, para la temperatura y presión de alimentación predeterminadas en la entrada de la etapa 2, donde el gas hidrógeno de alimentación normal tiene una fracción molar de agua de 0,030, la humedad relativa es del 100 % (es decir, está completamente saturado de agua). Sin embargo, para ese mismo gas de alimentación a la temperatura y presión de alimentación predeterminadas para la entrada a la etapa 1 (durante un reciclaje completo), la humedad relativa es solo del 44% (es decir, está solo parcialmente saturado de agua), a pesar de tener una fracción molar de agua idéntica.

Como se explica con más detalle a continuación, puede haber situaciones en las que la cantidad de gas hidrógeno producido a partir de la electrólisis sea variable, por lo que al menos parte, o posiblemente la totalidad, del gas hidrógeno suministrado al compresor centrífugo procederá de un sistema de reciclaje.

Por consiguiente, existe una necesidad en la técnica de soluciones para abordar el problema del peso molecular aparente reducido al comprimir gas hidrógeno producido por electrólisis en compresores centrífugos.

Electrólisis

Un método según la presente invención comprende electrolizar agua para producir gas hidrógeno. Se puede utilizar cualquier forma adecuada de electrólisis de agua, incluida la electrólisis de agua alcalina y la electrólisis de agua con membrana de electrolito polimérico (PEM).

El agua utilizada para la electrólisis puede ser agua de mar desalinizada, posiblemente mediante ósmosis inversa, y desmineralizada.

La electricidad necesaria para la electrólisis se puede generar a partir de una o más fuentes de energía adecuadas, incluidas, entre otras, fuentes de energía renovables, generadores in situ accionados por gasolina, diésel o hidrógeno, pilas de combustible o extraída de una fuente local o red nacional, o combinaciones de estas fuentes.

Preferiblemente, al menos parte de la electricidad requerida para la electrólisis se puede generar a partir de una fuente de energía renovable que incluye energía eólica, energía solar, energía mareomotriz y energía hidroeléctrica, o combinaciones de estas fuentes, particularmente energía eólica y energía solar. La electricidad generada a partir de estas fuentes se utiliza para proporcionar energía a los electrolizadores.

Preferiblemente, el proceso será autónomo en términos de generación de energía para la electrólisis. De este modo, preferentemente toda la demanda de electricidad para la electrólisis se satisface mediante fuentes de energía renovables.

Se prevé, sin embargo, que la electricidad generada a partir de una o más fuentes de energía renovables pueda ser complementada con otras fuentes, ya sea durante períodos de demanda particularmente alta de productos de un proceso aguas abajo y/o durante períodos en los que la fuente de energía renovable solo esté disponible por debajo del umbral requerido para satisfacer la demanda, o no esté disponible en absoluto. En estos casos, la electricidad adicional se puede tomar del almacenamiento de baterías en el sitio y/o se puede generar a partir de uno o más generadores de gasolina, diésel o hidrógeno en el sitio, incluidas celdas de combustible y/o se puede tomar de una red local o nacional.

La electrólisis se puede llevar a cabo a cualquier escala adecuada. Sin embargo, en algunas realizaciones, la electrólisis puede tener una capacidad total de al menos 1 gigavatio (GW). La capacidad total máxima de la electrólisis está limitada únicamente por consideraciones prácticas, por ejemplo, generar suficiente energía a partir de fuentes de energía renovables para alimentar la pluralidad de electrolizadores. Por tanto, la electrólisis puede tener una capacidad total máxima de aproximadamente 10 GW o más. La capacidad total de la electrólisis puede ser de 1 GW a aproximadamente 5 GW, por ejemplo, desde aproximadamente 1,5 GW hasta aproximadamente 3 GW.

El gas hidrógeno normalmente es generado mediante electrólisis a una presión ligeramente superior a la presión atmosférica, por ejemplo, aproximadamente a 1,3 bares. Sin embargo, en algunas realizaciones, la electrólisis produce hidrógeno a una presión algo mayor, por ejemplo hasta aproximadamente 3 bar.

Así, normalmente se alimenta gas hidrógeno al sistema de compresión de múltiples etapas a una presión en el intervalo comprendido desde la presión atmosférica hasta aproximadamente 3 bar, preferiblemente en el intervalo comprendido desde la presión atmosférica hasta aproximadamente 1,5 bar, por ejemplo, alrededor de 1,1 bares.

En algunas realizaciones, el flujo másico de gas hidrógeno suministrado desde los electrolizadores está a la temperatura y presión de alimentación predeterminadas para la etapa inicial.

En algunas realizaciones, el gas hidrógeno de los electrolizadores es variable y, por lo tanto, se le puede añadir gas hidrógeno desde un sistema de almacenamiento como se explica más adelante, o desde un sistema de reciclaje.

Purificación

Se apreciará que el gas hidrógeno producido a partir de la electrólisis del agua contendrá impurezas. Por lo tanto, el término "gas hidrógeno", cuando se utiliza en el contexto de la presente invención, está destinado a hacer referencia a gas hidrógeno con tales impurezas, a menos y hasta que el gas hidrógeno sea purificado.

En particular, este término incluye gas hidrógeno producido por electrólisis que normalmente está saturado de agua a 40°C y normalmente contiene algo de oxígeno residual, típicamente de aproximadamente 500 a aproximadamente 1000 ppm (v). Por lo general, estas impurezas se deben eliminar, dependiendo de las tolerancias de cualquier proceso aguas abajo.

Por ejemplo, el oxígeno es un veneno para los catalizadores convencionales utilizados en el proceso Haber. Por lo tanto, si se pretende utilizar el gas hidrógeno comprimido en un proceso aguas abajo que sea la síntesis de amoníaco, la alimentación al catalizador contendrá menos de aproximadamente 10 ppm, típicamente menos de aproximadamente 5 ppm, de oxígeno total, es decir, átomos de oxígeno procedentes de cualquier fuente de impurezas, tal como oxígeno gaseoso (O₂), agua (H₂O), monóxido de carbono (CO) y/o dióxido de carbono (CO₂). En consecuencia, la alimentación también será seca, es decir, con no más de 1 ppm de agua.

Procesos aguas abajo que utilizan hidrógeno "gris" convencional (es decir, hidrógeno derivado de una corriente de alimentación de hidrocarburos o carbonosos sin captura de dióxido de carbono, por ejemplo, reformando gas natural), o hidrógeno "azul" (es decir, hidrógeno derivado de la misma manera que el hidrógeno "gris" pero donde se captura parte o la totalidad del dióxido de carbono asociado con la producción), tal como las refinerías, tienen tolerancias similares para el oxígeno y el agua.

En algunas realizaciones, el gas hidrógeno comprimido se puede purificar antes de ser alimentado a un proceso aguas abajo.

Por ejemplo, el gas oxígeno residual en el gas hidrógeno comprimido se puede convertir en agua mediante la combustión catalítica de parte del hidrógeno para producir gas hidrógeno comprimido sin oxígeno (que no contiene más de 1 ppm de O₂) que después se puede secar para producir gas hidrógeno seco comprimido (que no contenga más de 1 ppm de agua) para su utilización en uno o más procesos aguas abajo.

Compresión

El método según la presente invención comprende una etapa de comprimir el gas hidrógeno en un sistema de compresión de múltiples etapas para producir gas hidrógeno comprimido. El sistema de compresión de múltiples etapas es responsable de comprimir el gas hidrógeno desde la presión a la que se genera el gas hidrógeno mediante electrólisis hasta una presión elevada que generalmente es al menos un poco más alta que la presión de alimentación de cualquier proceso aguas abajo.

Como se apreciará fácilmente, un sistema de compresión "de múltiples etapas" tiene una pluralidad de etapas de compresión que se pueden dividir entre compresores en paralelo y/o en serie. La relación de presión global a lo largo de cada etapa está generalmente en el intervalo de aproximadamente 1,5 a aproximadamente 2,5, por ejemplo, de aproximadamente 2 a aproximadamente 2,5, con el fin de limitar el aumento de temperatura del gas comprimido.

Normalmente se requieren enfriadores entre etapas adyacentes ("interenfriadores") y normalmente después de una etapa final ("posenfriadores") en sistemas de compresión de múltiples etapas para eliminar el calor de la compresión del gas comprimido. Así, en el contexto de la presente invención, una "etapa" de compresión se refiere a la parte del sistema de compresión entre enfriadores.

En algunas realizaciones descritas en el presente documento, los enfriadores eliminan simultáneamente el calor de compresión del gas comprimido y también eliminan el calor de compresión del gas hidrógeno reciclado a presión reducida alimentado desde un extremo de producto de una etapa de compresión aguas abajo.

El sistema de compresión de múltiples etapas comprende una o más secciones de compresión. Una "sección" de compresión en este contexto se refiere a la parte del sistema de compresión entre las alimentaciones y los productos. Cada sección puede comprender una o más etapas de compresión, junto con los enfriadores asociados.

En la presente invención, el sistema de compresión de múltiples etapas comprende al menos una etapa de compresión centrífuga que tiene un extremo de alimentación y un extremo de producto. Es decir, los compresores utilizados en una, algunas o todas las etapas son compresores centrífugos. El sistema de compresión de múltiples etapas puede comprender una pluralidad de compresores centrífugos. Preferiblemente, al menos la primera o etapa inicial de compresión en el sistema de compresión de múltiples etapas comprende un compresor centrífugo.

Se apreciará que en algunas realizaciones el sistema de compresión de múltiples etapas puede tener al menos una etapa de compresión centrífuga en combinación con al menos una etapa de compresión alternativa, es decir, una etapa que comprende compresor(es) alternativo(s).

- 5 Se preverá que en algunas realizaciones preferidas, todas las etapas del sistema de compresión de múltiples etapas sean etapas de compresión centrífuga.

10 El gas hidrógeno comprimido producido por el sistema de compresión de múltiples etapas tiene típicamente una presión de aproximadamente 10 bar a aproximadamente 50 bar. En algunas realizaciones, la presión del gas hidrógeno comprimido es de aproximadamente 25 bar a aproximadamente 35 bar, preferiblemente aproximadamente 30 bar. En otras realizaciones, la presión del gas hidrógeno comprimido es de aproximadamente 10 bar a aproximadamente 12 bar, preferiblemente aproximadamente 11 bar.

15 En algunas realizaciones, el sistema de compresión de múltiples etapas tiene solo una única sección para comprimir el gas hidrógeno a la presión elevada deseada. En otras realizaciones, el sistema de compresión de múltiples etapas comprende una primera sección y al menos una sección adicional aguas abajo de la primera sección.

20 En realizaciones particulares, el sistema de compresión de múltiples etapas tiene dos secciones, una primera sección (baja presión o "LP") en la que se comprime gas hidrógeno desde la presión de alimentación al sistema de compresión de múltiples etapas hasta una primera presión elevada en comprendida el rango de aproximadamente 2 bar a aproximadamente 6 bar, y una segunda sección (presión media o "MP") en la que se comprime gas hidrógeno desde la primera presión elevada hasta la presión elevada final. La presión elevada final puede ser la deseada para cualquier proceso aguas abajo, por ejemplo.

25 En algunas realizaciones, la primera presión elevada del gas hidrógeno después de la compresión en la primera sección puede estar en el rango de aproximadamente 2 bar a aproximadamente 3 bar, por ejemplo, 2,5 bar. En otras realizaciones, la primera presión elevada puede estar en el rango de aproximadamente 4 bar a aproximadamente 6 bar, por ejemplo, 5 bar.

30 En lo sucesivo, a veces se puede hacer referencia a, al menos, una etapa de compresión centrífuga simplemente como "etapa" o "etapa de compresión" para ser concisos. Se apreciará que las referencias a, al menos, una etapa de compresión centrífuga se pueden aplicar a cualquiera de una etapa de compresión inicial, intermedia o final, a menos que se especifique lo contrario.

35 *Condiciones de alimentación de compresión*

En la presente invención, la alimentación de gas hidrógeno se alimenta al extremo de alimentación de la etapa de compresión centrífuga a una temperatura y presión de alimentación predeterminadas y que tiene una fracción molar de agua predeterminada.

40 Como se mencionó anteriormente, la temperatura y presión de alimentación están predeterminadas en función del diseño de la etapa particular de compresión. La temperatura y presión de alimentación para esa etapa en particular determinarán a su vez el "punto de rocío" y las condiciones en las que se considerará que el gas hidrógeno está completamente saturado de agua (es decir, que tiene una humedad relativa del 100%). Esto se debe a que la cantidad máxima de vapor de agua que puede estar presente en la fase gaseosa depende de la temperatura y de la presión.

45 Por lo tanto, cuanto mayor sea la presión, menor será la fracción molar de agua requerida para alcanzar la saturación total de agua del gas hidrógeno para una temperatura determinada, y viceversa. De manera similar, cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la fracción molar de agua requerida para alcanzar la saturación total de agua del gas hidrógeno para una presión determinada, y viceversa.

50 Por lo tanto, la fracción molar de agua requerida para saturar completamente el gas hidrógeno con agua también dependerá de la temperatura y presión de alimentación predeterminadas para esa etapa particular. Por lo tanto, en un sistema de compresión de múltiples etapas donde cada etapa posterior aumenta la presión (pero donde la temperatura de alimentación permanece igual), la fracción molar máxima posible de agua en el gas hidrógeno será menor para cada etapa posterior.

55 En la presente invención, la "fracción molar de agua predeterminada" corresponde a la fracción molar de agua deseada que se mantendrá en la alimentación de gas hidrógeno a la etapa de compresión centrífuga durante el reciclaje y es seleccionada por el usuario. Preferiblemente, la fracción molar de agua predeterminada es la fracción molar de agua en la alimentación de gas hidrógeno en ausencia de cualquier reciclaje, es decir, preferiblemente la fracción molar de agua se mantiene al nivel en el que estaba originalmente sin que tenga lugar ningún reciclaje.

60 Se preverá que si el gas hidrógeno en la alimentación de gas hidrógeno ha sufrido saturación con agua, por ejemplo mediante inyección de agua, la fracción molar de agua predeterminada puede ser equivalente a la fracción molar de agua en la alimentación de gas hidrógeno después de dicha saturación (pero en ausencia de cualquier reciclaje).

El mismo día de la presente solicitud ha sido presentada una solicitud correspondiente dirigida a la saturación de gas hidrógeno con agua por el mismo Solicitante con el título "A PROCESS AND APPARATUS FOR COMPRESSING HYDROGEN GAS IN A CENTRIFUGAL COMPRESSOR" con el número de referencia interna "08231 USA" y la solicitud de patente de EE.UU. N° 17/201293. Esta solicitud se incorpora aquí como referencia en su totalidad.

En algunas realizaciones preferidas en el presente documento, la fracción molar de agua predeterminada es equivalente a la fracción molar de agua a la que se considera que el gas hidrógeno está sustancialmente completamente saturado de vapor de agua para las condiciones de alimentación de la etapa en cuestión (es decir, a la temperatura y presión de alimentación predeterminadas). En otras palabras, se prefiere que la fracción molar predeterminada sea la fracción molar máxima posible de agua a la temperatura y presión de alimentación predeterminadas. Esto a su vez proporciona un alto peso molecular aparente que conduce a un rendimiento óptimo del compresor centrífugo.

Por ejemplo, si la temperatura de alimentación predeterminada es 40° C y la presión de alimentación predeterminada es 1,1 bar, entonces la fracción molar de agua predeterminada puede ser aproximadamente 0,067, que es la fracción molar de agua a la que el gas hidrógeno está completamente saturado de vapor de agua a esa temperatura y presión. A modo de ejemplo adicional, si la temperatura de alimentación predeterminada es 40° C y la presión de alimentación predeterminada es 6 bar, entonces la fracción molar de agua predeterminada puede ser aproximadamente 0,012, que es la fracción molar de agua en la que el gas hidrógeno está completamente saturado de vapor de agua a esa temperatura y presión.

En algunas realizaciones, la fracción molar predeterminada de agua puede ser aquella en la que se considera que el gas hidrógeno tiene de aproximadamente 50 % hasta 100 %, de aproximadamente 70 % hasta 100 %, de aproximadamente 80 % hasta 100 %, preferiblemente de aproximadamente 90% hasta 100%, más preferiblemente de aproximadamente 95 hasta 100% de humedad relativa en las condiciones de alimentación. En algunas realizaciones, la fracción molar predeterminada de agua (mol/mol) es aproximadamente 0,0005 o más, aproximadamente 0,002 o más, preferiblemente aproximadamente 0,005 o más, y aproximadamente 0,12 o menos, 0,10 o menos, preferiblemente 0,08 o menos. En algunas realizaciones particulares, la fracción molar predeterminada de agua (mol/mol) es de aproximadamente 0,0005 a aproximadamente 0,12, de aproximadamente 0,002 a aproximadamente 0,10, preferiblemente de aproximadamente 0,005 a aproximadamente 0,08.

En algunas realizaciones en las que la etapa de compresión centrífuga es una etapa inicial o intermedia, la fracción molar predeterminada de agua (mol/mol) es aproximadamente 0,01 o más, aproximadamente 0,02 o más, preferiblemente aproximadamente 0,025 o más y aproximadamente 0,12 o menos, 0,10 o menos, preferiblemente 0,08 o menos. En algunas realizaciones particulares, la fracción molar predeterminada de agua (mol/mol) es de aproximadamente 0,01 a aproximadamente 0,12, de aproximadamente 0,02 a aproximadamente 0,10, preferiblemente de aproximadamente 0,025 a aproximadamente 0,08.

En la presente invención, la alimentación de gas hidrógeno se alimenta a la etapa de compresión centrífuga a la temperatura de alimentación predeterminada. Si se suministra desde una etapa anterior, es enfriado en un enfriador intermedio hasta la temperatura de alimentación predeterminada.

En algunas realizaciones, la temperatura de alimentación predeterminada es de aproximadamente 10 a aproximadamente 80° C, preferiblemente de aproximadamente 20 a aproximadamente 60° C, más preferiblemente de aproximadamente 30 a aproximadamente 50° C.

En algunas realizaciones, la temperatura de alimentación predeterminada es de aproximadamente 20 a aproximadamente 60° C y la fracción molar de agua predeterminada es de aproximadamente 0,002 a aproximadamente 0,12. En algunas realizaciones preferidas, la temperatura de alimentación predeterminada es de aproximadamente 30 a aproximadamente 50° C y la fracción molar de agua predeterminada es de 0,005 a aproximadamente 0,08.

Preferiblemente, la temperatura de alimentación predeterminada es la misma para cada etapa del sistema de compresión de múltiples etapas. Sin embargo, en otras realizaciones del presente documento, la temperatura de alimentación predeterminada puede ser mayor para cada etapa posterior aguas abajo del sistema de compresión de múltiples etapas, tal como de aproximadamente 5 a 30° C más alta que la etapa anterior, preferiblemente de aproximadamente 5 a 15° C. superior a la etapa anterior.

Por ejemplo, en algunas realizaciones la temperatura de alimentación predeterminada es de aproximadamente 20 a aproximadamente 60° C en la primera etapa de compresión, y de aproximadamente 30 a aproximadamente 70° C en la segunda etapa de compresión, y así sucesivamente. En otras realizaciones más preferidas en el presente documento, la temperatura de alimentación predeterminada es de aproximadamente 30 a aproximadamente 50° C en la primera etapa de compresión, y de aproximadamente 40 a aproximadamente 60° C en la segunda etapa de compresión, y así sucesivamente.

En algunas otras realizaciones preferidas, la temperatura de alimentación predeterminada es de aproximadamente 5 a 15° C más alta para cada etapa aguas abajo del sistema de compresión de múltiples etapas y la fracción molar de agua predeterminada es de aproximadamente 0,002 a aproximadamente 0,10.

5 La presencia de agua líquida es indeseable para la alimentación que entra en un compresor. En consecuencia, en algunas realizaciones puede haber un separador de fases aguas arriba del compresor centrífugo para garantizar que se elimine el agua líquida del gas hidrógeno que entre en el compresor centrífugo. Los separadores de fases adecuados pueden incluir, por ejemplo, lavadores de compresión.

10 *Sistema de reciclaje*

El sistema de compresión de múltiples etapas comprende un sistema de reciclaje para reciclar una parte del gas hidrógeno desde el extremo de producto hasta el extremo de alimentación de la etapa de compresión centrífuga.

15 Como se mencionó anteriormente, son generalmente conocidos sistemas de reciclaje que hacen circular una parte de gas hidrógeno desde un enfriador en el extremo de producto de una etapa de compresión y lo pasan al extremo de alimentación. Por ejemplo, se pueden utilizar sistemas de reciclaje para evitar la sobrecarga del compresor durante períodos en los que el flujo másico de suministro de gas hidrógeno es inferior al necesario para el funcionamiento estable del compresor.

20 Por el contrario, los presentes inventores han ideado un proceso que evita la condensación de agua que se produce cuando el gas es enfriado a alta presión. En este proceso, una parte del gas hidrógeno se elimina, según sea necesario, del extremo de producto de la etapa de compresión centrífuga, se reduce la presión en el sistema de reciclaje a la presión de alimentación predeterminada antes de cualquier paso de enfriamiento (para que no se produzca condensación de vapor de agua) para proporcionar gas hidrógeno a presión reducida. El gas hidrógeno a presión reducida se recicla después para formar al menos parte de la alimentación de gas hidrógeno a la etapa de compresión centrífuga.

30 Al reducir la presión del gas hidrógeno reciclado antes de cualquier etapa de enfriamiento, no se produce condensación de agua y la fracción molar de agua no se reduce sustancialmente. Por tanto, una vez añadida al extremo de alimentación de la etapa de compresión centrífuga, la fracción molar de agua en la alimentación de gas hidrógeno tampoco se reduce sustancialmente.

35 Después de reducir la presión de la parte reciclada de hidrógeno, en lo sucesivo también se le puede denominar simplemente "gas hidrógeno reciclado". La presión se puede reducir de cualquier manera convencional, particularmente haciendo pasar el gas a través de una válvula.

Enfriamiento del gas hidrógeno

40 En la presente invención, la parte reciclada de gas hidrógeno se reduce en presión a la presión de alimentación predeterminada antes de cualquier etapa de enfriamiento, es decir, el gas hidrógeno a presión reducida todavía está caliente debido a la compresión en la etapa de compresión centrífuga. De esta manera, el proceso de la presente invención recicla gas hidrógeno sin reducir su fracción molar de agua (y por tanto sin reducir su peso molecular aparente).

45 Sin embargo, se podría esperar que sin ninguna etapa de enfriamiento el gas hidrógeno reciclado caliente, una vez añadido al gas hidrógeno húmedo, aumente adversamente la temperatura de la alimentación de gas hidrógeno que es alimentado a la etapa de compresión centrífuga. No es deseable que la temperatura del gas hidrógeno que se alimenta al compresor centrífugo sea superior a la temperatura de alimentación predeterminada. Esto se debe a que una mayor presión de entrada implicará una mayor potencia del compresor, lo que aumentará los costes operativos.

50 Por lo tanto, el proceso de la presente invención también comprende enfriar gas hidrógeno que comprende gas hidrógeno a presión reducida. Será evidente que el gas hidrógeno solo comprende gas hidrógeno a presión reducida cuando se recicla gas hidrógeno y, por tanto, se enfriará solo en la medida en que se recicle gas hidrógeno (es decir, cuando hay gas hidrógeno a presión reducida disponible para enfriar).

55 Esto permite eliminar al menos parcialmente, pero preferiblemente por completo, el calor de compresión en el gas hidrógeno a presión reducida. Además, al enfriar el gas hidrógeno reciclado a presión reducida a la presión de alimentación predeterminada, no se produce sustancialmente condensación de agua y, por lo tanto, su fracción molar de agua no se reduce sustancialmente.

60 Como se explica con más detalle más adelante, el enfriamiento del gas hidrógeno que comprende gas hidrógeno a presión reducida se puede llevar a cabo en el sistema de reciclaje o, alternativamente, se puede llevar a cabo dentro de la alimentación de gas hidrógeno antes de alimentarlo a la etapa de compresión.

65

En algunas realizaciones, el gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida se enfría a una temperatura igual o superior a la temperatura del punto de rocío del gas hidrógeno a presión reducida. En otras palabras, el gas hidrógeno a presión reducida no se enfría por debajo de una temperatura a la que el vapor de agua comenzará a condensarse. Las temperaturas del punto de rocío se pueden medir utilizando métodos conocidos en la técnica, tales como un sensor de impedancia del tipo de punto de rocío, un sensor de condensación o una sonda de cloruro de litio saturado.

Sin embargo, en realizaciones en las que el gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida se enfría a una temperatura igual o superior a la temperatura de alimentación predeterminada, no se necesita ningún sensor de temperatura de punto de rocío. Esto se debe a que la temperatura de alimentación predeterminada es siempre igual o superior a la temperatura del punto de rocío del gas hidrógeno a presión reducida.

Por lo tanto, en otras palabras, siempre que el gas hidrógeno a presión reducida se enfríe de nuevo a la temperatura a la que estaba la alimentación de gas hidrógeno en ausencia de cualquier reciclaje, es decir, la temperatura de alimentación predeterminada, o superior, entonces no habrá condensación de vapor de agua ni reducción de la fracción molar de agua en el gas hidrógeno a presión reducida. En este caso, solo sería necesario controlar o medir la temperatura.

En algunas realizaciones, el gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida se enfría a una temperatura dentro de aproximadamente $\pm 5^\circ \text{C}$, o preferiblemente dentro de aproximadamente $\pm 2^\circ \text{C}$, más preferiblemente dentro de aproximadamente $\pm 1^\circ \text{C}$ de la temperatura de alimentación predeterminada. En algunas realizaciones preferidas, el gas hidrógeno que comprende gas hidrógeno a presión reducida se enfría sustancialmente hasta la temperatura de alimentación predeterminada.

En algunas realizaciones, el proceso comprende medir la temperatura de la alimentación de gas hidrógeno a la etapa de compresión centrífuga y enfriar en función de la temperatura medida. En otras palabras, el proceso puede comprender enfriar hasta que la temperatura medida de la alimentación de gas hidrógeno alcance sustancialmente la temperatura de alimentación predeterminada.

El grado en que se enfría el gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida podría determinarse y ejecutarse utilizando, por ejemplo, un sistema de control.

En realizaciones en las que la alimentación de gas hidrógeno está completamente saturada de agua en ausencia de cualquier reciclaje, la temperatura del punto de rocío de la alimentación puede ser igual a la temperatura de alimentación predeterminada. En tales realizaciones, el proceso puede comprender enfriar gas hidrógeno que comprende gas hidrógeno a presión reducida hasta que una cantidad insignificante de exceso de agua comience a condensarse a partir del gas hidrógeno a presión reducida. Por ejemplo, un aumento en la tasa de formación de agua líquida dentro de la alimentación puede indicar que se ha alcanzado la temperatura del punto de rocío (y la temperatura de alimentación predeterminada). Por ejemplo, la detección de la tasa de formación de agua líquida se podría lograr midiendo la tasa de eliminación de agua líquida a través de un separador de fases aguas arriba de la etapa de compresión centrífuga (que también puede servir para garantizar que no entre agua líquida en el compresor).

Como se mencionó anteriormente, en algunas realizaciones, el gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida se enfría dentro del sistema de reciclaje. En otras palabras, el gas hidrógeno reciclado a presión reducida se puede enfriar antes de ser añadido al gas hidrógeno en el extremo de alimentación de la etapa de compresión centrífuga. En estas realizaciones, el gas hidrógeno a presión reducida se enfría para eliminar parcialmente, pero preferiblemente por completo, el calor añadido por la compresión.

Como se mencionó anteriormente, en otras realizaciones, el gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida se enfría dentro de la alimentación de gas hidrógeno antes de alimentarlo a la etapa de compresión. En otras palabras, enfriando una corriente combinada de gas hidrógeno no reciclado y gas hidrógeno reciclado a presión reducida. En esta realización, el proceso comprende enfriar la corriente combinada de modo que la fracción molar de agua en la alimentación de gas hidrógeno sea la fracción molar de agua predeterminada.

En estas realizaciones en las que el gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida se enfría en la alimentación de gas hidrógeno, se enfría para eliminar parcialmente, pero preferiblemente por completo, el calor añadido por compresión. Si la etapa de compresión centrífuga es una etapa inicial, el calor de compresión solo se elimina del gas hidrógeno a presión reducida. Sin embargo, si la etapa de compresión centrífuga es una etapa intermedia o final, el calor de compresión también se elimina del gas hidrógeno recibido desde el extremo de producto de una etapa de compresión aguas arriba.

Una ventaja particular del enfriamiento en la alimentación de gas hidrógeno es que solo se requiere un enfriador para implementar la presente invención, ya que un único enfriador entre etapas actúa como (i) un interenfriador para enfriar el gas hidrógeno comprimido en una etapa aguas arriba, y (ii) un enfriador para enfriar el gas hidrógeno a presión reducida reciclado para la etapa actual.

En algunas realizaciones menos preferidas, el gas hidrógeno a presión reducida se enfría parcialmente en el sistema de reciclaje y después se enfría aún más una vez que se agrega a la alimentación de gas hidrógeno.

5 En otras palabras, el gas hidrógeno a presión reducida se enfría sin reducir sustancialmente su peso molecular aparente. Esto también significa que cuando el gas hidrógeno a presión reducida forma parte de la alimentación de gas hidrógeno, no reduce sustancialmente el peso molecular aparente de la alimentación de gas hidrógeno que se alimenta a la etapa de compresión centrífuga.

10 Preferiblemente, el gas hidrógeno a presión reducida se enfría de modo que el peso molecular aparente de la alimentación de gas hidrógeno no disminuya sustancialmente en absoluto.

15 En algunas realizaciones, el gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida se enfría de manera que el peso molecular aparente (en g/mol) de la alimentación de gas hidrógeno que se alimenta a la etapa de compresión centrífuga es de aproximadamente 2,05 a aproximadamente 5, por ejemplo, de aproximadamente 2,1 a aproximadamente 4, o preferiblemente de aproximadamente 2,2 a aproximadamente 3,5.

20 El gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida se puede enfriar utilizando cualquier medio adecuado, incluido, entre otros, el uso de un interenfriador o una unidad de enfriamiento externa. Otros medios podrían incluir la utilización de intercambio de calor indirecto contra el aire, agua de enfriamiento, una corriente de proceso u otro fluido refrigerante, o enfriamiento por contacto directo con agua, por ejemplo.

25 La presente invención proporciona una manera de reciclar gas hidrógeno alrededor de una etapa sin reducir sustancialmente la fracción molar de agua en la alimentación de gas hidrógeno a la etapa de compresión centrífuga, lo que, como se explicó anteriormente, permite que una etapa de compresión centrífuga que recibe el gas mantenga un rendimiento óptimo.

30 Además, esto permite mantener el peso molecular aparente del gas hidrógeno alimentado a la etapa de compresión centrífuga a un nivel en el que hay poca o ninguna caída en el rendimiento del compresor centrífugo. Esto elimina la necesidad de recurrir a métodos convencionales para mitigar las caídas en la relación de presión del compresor centrífugo. Por ejemplo, los métodos convencionales para aumentar la relación de presión normalmente incluyen aumentar la velocidad del impulsor durante el funcionamiento, que está limitada por las velocidades máximas de los impulsores. Alternativamente, otro método es diseñar el sistema de compresión de múltiples etapas con muchos más impulsores en serie. Ninguno de estos métodos es necesario una vez que se ha implementado la presente invención.

35 *Segundo control de temperatura*

En algunas realizaciones del proceso de la presente invención, el sistema de compresión de múltiples etapas comprende:

40 una segunda etapa de compresión centrífuga aguas abajo de la etapa de compresión centrífuga, comprendiendo dicha segunda etapa de compresión centrífuga un extremo de alimentación y un extremo de producto,
un segundo sistema de reciclaje para reciclar una parte del gas hidrógeno desde el extremo de producto hasta el extremo de alimentación de la segunda etapa de compresión centrífuga;

45 en donde la alimentación de gas hidrógeno se alimenta al extremo de alimentación de la segunda etapa de compresión centrífuga a una temperatura y presión de alimentación predeterminadas y que tiene una fracción molar de agua predeterminada:

50 en donde una parte del gas hidrógeno se retira, según sea necesario, del extremo de producto de la segunda etapa de compresión centrífuga, se reduce la presión en el segundo sistema de reciclaje a la presión de alimentación predeterminada antes de cualquier etapa de enfriamiento para proporcionar gas hidrógeno a presión reducida que después se recicla para formar al menos parte de la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa de compresión centrífuga; y

55 en donde el proceso comprende enfriar gas hidrógeno que comprende gas hidrógeno a presión reducida en la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa, de manera que la fracción molar de agua en la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa sea la fracción molar de agua predeterminada.

60 En la siguiente descripción, a veces se puede hacer referencia a la primera etapa de compresión centrífuga y a la segunda etapa de compresión centrífuga como "primera etapa" y "segunda etapa", respectivamente, por motivos de brevedad. Las referencias en el presente documento a "una etapa" o "la etapa" pueden hacer referencia a cualquier etapa en particular, dependiendo del contexto utilizado.

65 Se apreciará que la presión de alimentación predeterminada para la segunda etapa será diferente de la presión de alimentación predeterminada para la primera etapa, ya que el gas hidrógeno se comprime más en cada etapa aguas abajo.

En algunas realizaciones preferidas, la segunda temperatura de alimentación predeterminada puede ser la misma que la primera temperatura de alimentación predeterminada. En realizaciones alternativas, como se explicó anteriormente, la segunda temperatura de alimentación predeterminada puede ser mayor que la primera temperatura de alimentación predeterminada, tal como de aproximadamente 5 a aproximadamente 30° C más alta, preferiblemente de aproximadamente 5 a aproximadamente 15° C más alta. En algunas realizaciones, la segunda temperatura de alimentación predeterminada es de aproximadamente 20 a aproximadamente 90° C, preferiblemente de aproximadamente 30 a aproximadamente 70° C, más preferiblemente de aproximadamente 35 a aproximadamente 60° C.

Se apreciará que la fracción molar de agua predeterminada con respecto a la segunda etapa puede diferir de la primera etapa. Por ejemplo, si la fracción molar de agua predeterminada es la fracción molar máxima posible para las condiciones de alimentación de la etapa, entonces, bajo las condiciones de presión más alta en la entrada de la segunda etapa (y siempre que la temperatura de alimentación sea la misma), la fracción molar máxima de agua será menor.

En la presente invención, la "fracción molar de agua predeterminada" corresponde a la fracción molar de agua deseada que se mantendrá en la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa durante el reciclaje, y es seleccionada por el usuario. Preferiblemente, la fracción molar de agua predeterminada es la fracción molar de agua en la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa en ausencia de cualquier reciclaje, es decir, preferiblemente la fracción molar de agua se mantiene al nivel en el que estaba originalmente sin que tenga lugar ningún reciclaje.

En todavía otras realizaciones preferidas, la fracción molar de agua predeterminada para la segunda etapa es la fracción molar máxima posible para las condiciones de alimentación de la segunda etapa, es decir, preferiblemente, la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa está completamente saturada con vapor de agua.

En algunas realizaciones, la fracción molar predeterminada de agua para la segunda etapa (mol/mol) es aproximadamente 0,0005 o más, aproximadamente 0,002 o más, preferiblemente aproximadamente 0,005 o más, y aproximadamente 0,12 o menos, 0,10 o menos, preferiblemente 0,08 o menos, o de aproximadamente 0,0005 a aproximadamente 0,12, de aproximadamente 0,002 a aproximadamente 0,10, preferiblemente de aproximadamente 0,005 a aproximadamente 0,08.

En algunas realizaciones en las que la etapa de compresión centrífuga es una etapa intermedia o final, la fracción molar predeterminada de agua (mol/mol) es aproximadamente 0,001 o más, aproximadamente 0,0015 o más, preferiblemente aproximadamente 0,004 o más y aproximadamente 0,10 o menos, 0,08 o menos, preferentemente 0,07 o menos, o de aproximadamente 0,001 a aproximadamente 0,10, de aproximadamente 0,0015 a aproximadamente 0,08, preferentemente de aproximadamente 0,004 a aproximadamente 0,07.

También se apreciará, por lo tanto, que el peso molecular aparente del gas hidrógeno que se alimenta a la segunda etapa puede no ser el mismo que el del gas hidrógeno que se alimenta a la primera etapa.

El segundo sistema de reciclaje puede, en algunas realizaciones, ser idéntico al primer sistema de reciclaje. Por lo tanto, la exposición anterior en relación con el primer sistema de reciclaje es aplicable para el segundo. En el segundo sistema de reciclaje, una parte del gas hidrógeno se retira, según sea necesario, del extremo de producto de la segunda etapa de compresión centrífuga, se reduce la presión en el segundo sistema de reciclaje a la presión de alimentación predeterminada antes de cualquier etapa de enfriamiento para proporcionar gas hidrógeno a presión reducida que después se recicla para formar al menos parte de la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa de compresión centrífuga.

Después de que sea reducida la presión de la parte reciclada de hidrógeno en el segundo sistema de reciclaje, en lo sucesivo se puede denominar "gas hidrógeno a presión reducida" o "gas hidrógeno reciclado". La presión se puede reducir de cualquier manera convencional, particularmente haciendo pasar un gas a través de una válvula.

En realizaciones con un segundo reciclaje, el proceso comprende enfriar gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida en la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa de compresión centrífuga, de manera que la fracción molar de agua en dicha alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa esté en la fracción molar de agua predeterminada.

Por tanto, en estas realizaciones el proceso comprende enfriar la alimentación de gas hidrógeno antes de alimentarla a la segunda etapa de compresión centrífuga. El gas enfriado de esta alimentación incluye por tanto:

- (i) el gas hidrógeno del extremo de producto de la primera etapa de compresión centrífuga, y
- (ii) el gas hidrógeno reciclado a presión reducida del segundo sistema de reciclaje.

En otras palabras, el enfriamiento elimina el calor de compresión en (i) de la primera etapa y, al mismo tiempo, elimina el calor de compresión en (ii) reciclado de la segunda etapa.

Por lo tanto, en esta realización el gas hidrógeno del extremo de producto de la primera etapa y el gas hidrógeno a presión reducida del segundo sistema de reciclaje se enfrían como una corriente combinada aguas arriba de la segunda etapa. Esto contrasta con las disposiciones conocidas de sistemas de reciclaje para compresores, ya que el segundo gas hidrógeno a presión reducida se combina con el gas hidrógeno del extremo de producto de la primera etapa aguas arriba de donde se produce el enfriamiento en lugar de aguas abajo, es decir, aguas arriba del interenfriador en lugar de aguas abajo de él.

Cuando se enfría el gas hidrógeno del extremo de producto de la primera etapa, se apreciará que esto es efectivamente un "interenfriamiento" del gas comprimido entre etapas. Como se explicó anteriormente, la fracción molar máxima posible de agua en gas hidrógeno a la presión de alimentación para la segunda etapa será menor que para la primera etapa. Por lo tanto, el enfriamiento del gas hidrógeno desde el extremo de producto de la primera etapa de compresión necesariamente da como resultado una pérdida de algo de vapor de agua de este gas en preparación para las condiciones de alimentación de la segunda etapa. En otras palabras, la fracción molar de agua en el gas no reciclado disminuirá durante el "interenfriamiento", pero dicho gas hidrógeno seguirá estando completamente saturado de vapor de agua, para las condiciones de alimentación de la segunda etapa.

Cabe señalar que, aunque puede haber cierta pérdida de vapor de agua al enfriar el gas hidrógeno del extremo de producto de la primera etapa, aún no habrá sustancialmente ninguna pérdida de vapor de agua al enfriar el gas hidrógeno a presión reducida del segundo sistema de reciclaje - dado que este gas ya ha sido "interenfriado", en preparación para la segunda etapa antes de ser reciclado.

Una ventaja particular de esta realización es que, además de los enfriadores intermedios, para implementar este proceso no se necesitan unidades de enfriamiento adicionales. En esta realización, el proceso elimina la parte de gas hidrógeno reciclado del extremo de producto de la segunda etapa y reduce su presión antes de cualquier paso de enfriamiento. Después se alimenta al extremo de alimentación de la segunda etapa de compresión centrífuga aguas arriba del interenfriador entre la primera y la segunda etapa. Después, el interenfriador ajusta la temperatura de la corriente combinada en consecuencia para enfriar (i) el gas hidrógeno del extremo de producto de la primera etapa de compresión centrífuga, y (ii) el gas hidrógeno reciclado a presión reducida del segundo sistema de reciclaje.

De esta manera, (i) el gas hidrógeno del extremo de producto de la primera etapa se interenfria, y (ii) el gas hidrógeno a presión reducida del sistema de reciclaje se enfría sin reducir sustancialmente su fracción molar de agua, proporcionando así la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa de compresión centrífuga con la fracción molar de agua predeterminada.

La temperatura del gas hidrógeno del extremo de producto de la primera etapa y del segundo gas hidrógeno a presión reducida se puede reducir de la misma manera que se describe anteriormente para el proceso con una primera etapa de compresión centrífuga y un primer sistema de reciclaje.

Sin embargo, se apreciará que dado que el gas hidrógeno del extremo de producto de la primera etapa siempre incluirá calor de la compresión, será necesario eliminar dicho calor al menos parcialmente, pero preferiblemente en su totalidad, independientemente de la cantidad de reciclaje de gas hidrógeno. Como se explicó anteriormente, esto es efectivamente un "interenfriamiento" y, por lo tanto, necesariamente puede dar lugar a la condensación de algo de vapor de agua de este gas. Será evidente que cualquier enfriamiento adicional solo será necesario debido a la adición del gas hidrógeno caliente a presión reducida procedente del sistema de reciclaje.

Al enfriar el gas hidrógeno reciclado a presión reducida, no se produce sustancialmente condensación de agua de dicho gas hidrógeno reciclado y, por lo tanto, su fracción molar de agua no se reduce sustancialmente. Esto da como resultado que una fracción molar de agua en la alimentación de gas hidrógeno se alimenta a la segunda etapa que está en la fracción molar de agua predeterminada. Esto, a su vez, permite que los compresores centrífugos que reciben el gas mantengan un rendimiento óptimo.

En algunas realizaciones, el gas hidrógeno a presión reducida en la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa de compresiones centrífugas se enfría a una temperatura igual o superior a su temperatura de punto de rocío. En otras palabras, el gas hidrógeno a presión reducida no se enfría por debajo de una temperatura a la que el vapor de agua comenzará a condensarse. La temperatura del punto de rocío se puede medir utilizando métodos conocidos en la técnica, tales como un sensor de impedancia del tipo de punto de rocío, un sensor de condensación o una sonda de cloruro de litio saturado.

Sin embargo, en realizaciones en las que el gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida se enfría a una temperatura igual o superior a la segunda temperatura de alimentación predeterminada, no se necesita ningún sensor de temperatura de punto de rocío. Esto se debe a que la segunda temperatura de alimentación predeterminada es siempre igual o superior a la temperatura del punto de rocío del gas hidrógeno reciclado a presión reducida.

Por lo tanto, en otras palabras, siempre que el gas hidrógeno a presión reducida se enfríe de nuevo a la temperatura a la que estaba la alimentación de gas hidrógeno en ausencia de cualquier reciclaje, es decir, la segunda temperatura de alimentación predeterminada, o superior, entonces no habrá condensación de vapor de agua ni reducción de la fracción molar de agua en el gas hidrógeno a presión reducida. En este caso, solo sería necesario controlar o medir la temperatura.

En algunas realizaciones, el gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida se enfría en la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa de compresión centrífuga hasta aproximadamente $\pm 5^{\circ}\text{C}$, o dentro de aproximadamente $\pm 2^{\circ}\text{C}$, o preferiblemente dentro de aproximadamente $\pm 1^{\circ}\text{C}$ de la segunda temperatura de alimentación predeterminada. En algunas realizaciones preferidas, el gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida se enfría en la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa de compresión centrífuga hasta sustancialmente la segunda temperatura de alimentación predeterminada.

En algunas realizaciones, el proceso comprende medir la temperatura de la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa de compresión centrífuga y enfriar en función de la temperatura medida. En otras palabras, el proceso puede comprender el enfriamiento del gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida en la alimentación de gas hidrógeno hasta que la temperatura medida de la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa alcanza la segunda temperatura de alimentación predeterminada.

El grado en el que se enfría el gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida en la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa podría determinarse y ejecutarse utilizando, por ejemplo, un sistema de control.

En algunas realizaciones, el gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida se enfría eliminando el calor de compresión del gas hidrógeno del extremo de producto de la primera etapa y eliminando el calor de compresión del gas hidrógeno a presión reducida del segundo sistema de reciclaje.

En realizaciones en las que la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa está completamente saturada de agua en ausencia de cualquier reciclaje, su temperatura de punto de rocío es igual a la segunda temperatura de alimentación predeterminada, y el proceso puede comprender enfriar gas hidrógeno que comprende gas hidrógeno a presión reducida hasta que una cantidad insignificante de exceso de agua comienza a condensarse a partir del gas hidrógeno a presión reducida. Por ejemplo, un aumento en la tasa de formación de agua líquida dentro de la alimentación puede indicar que se ha alcanzado la temperatura del punto de rocío (y la temperatura de alimentación predeterminada). Por ejemplo, la detección de la tasa de formación de agua líquida se podría lograr midiendo la tasa de eliminación de agua líquida a través de un separador de fases aguas arriba de la segunda etapa de compresión centrífuga (que también puede servir para garantizar que no entre agua líquida en el compresor).

En otras palabras, el gas hidrógeno a presión reducida se enfría sin reducir sustancialmente su peso molecular aparente. Esto también significa que cuando el gas hidrógeno a presión reducida forma parte de la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa, no reduce sustancialmente el peso molecular aparente de la alimentación de gas hidrógeno que se alimenta a la segunda etapa de compresión centrífuga. Preferiblemente, el gas hidrógeno a presión reducida se enfría de modo que el peso molecular aparente del gas hidrógeno a presión reducida no disminuya sustancialmente en absoluto. En algunas realizaciones, el gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida se enfría de modo que el peso molecular aparente (en g/mol) de la alimentación de gas hidrógeno que se alimenta a la segunda etapa de compresión centrífuga sea de aproximadamente 2,05 a aproximadamente 5, por ejemplo 2,05 a 5, por ejemplo, de aproximadamente 2,1 a aproximadamente 4, o preferiblemente de aproximadamente 2,2 a aproximadamente 3,5.

El gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida se puede enfriar utilizando cualquier medio adecuado, que puede ser cualquiera de los ya identificados anteriormente.

Esto proporciona una manera de reciclar gas hidrógeno alrededor de una segunda etapa sin reducir sustancialmente la fracción molar de agua en la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa, lo que, como se explicó anteriormente, permite que la segunda etapa del compresor que recibe el gas mantenga un rendimiento óptimo. Además, esto permite que el peso molecular aparente de la alimentación de gas hidrógeno que se alimenta a la segunda etapa se mantenga a un nivel en el que el rendimiento del segundo compresor centrífugo no se vea afectado negativamente. Esto elimina la necesidad de recurrir a métodos convencionales para mitigar las caídas en la relación de presión del compresor centrífugo. Por ejemplo, los métodos convencionales para aumentar la relación de presión normalmente incluyen aumentar la velocidad del impulsor durante el funcionamiento, que está limitada por las velocidades máximas de los impulsores. Alternativamente, otro método es diseñar el sistema de compresión de múltiples etapas con muchos más impulsores en serie. Ninguno de estos métodos es necesario una vez que se ha implementado la presente invención. Una ventaja particular de esta disposición es que también permite lograr estos efectos sin la utilización de enfriadores adicionales.

Almacenamiento de hidrógeno

Dependiendo del tipo de electricidad generada para la electrólisis, la presente invención puede incluir la utilización de almacenamiento de hidrógeno en el método.

La Solicitud de Patente europea N° 20188259.4 al mismo nombre que el presente Solicitante describe un método para almacenar gas hidrógeno para su utilización en un sistema de compresión de múltiples etapas y este documento se incorpora aquí como referencia en su totalidad.

En algunas realizaciones en las que la electricidad generada para la electrólisis puede provenir de una fuente de energía renovable, la disponibilidad de la fuente de energía fluctuará inherentemente. Esto da como resultado que la electrólisis produzca menos gas hidrógeno. Una manera de abordar este problema consiste en proporcionar un sistema para recoger y almacenar al menos parte, preferiblemente todo, del exceso de gas hidrógeno producido durante los períodos en los que la producción excede la demanda de uno o varios procesos aguas abajo, y distribuir el gas hidrógeno almacenado a los proceso(s) aguas abajo durante los períodos en los que la demanda excede la producción.

En algunas realizaciones, el hidrógeno comprimido se puede almacenar sin compresión adicional. En estas realizaciones, el gas se almacena a una presión hasta una presión máxima de la presión a la que se comprime el hidrógeno en el sistema de compresión de múltiples etapas, por ejemplo, una presión hasta un máximo de aproximadamente la presión de alimentación de un proceso aguas abajo (donde solo hay uno) o alrededor de la alimentación de uno de los procesos aguas abajo (si hay más de uno). En tales realizaciones, el hidrógeno comprimido quizás se pueda almacenar a una presión hasta una presión máxima en la región de aproximadamente 25 bar a aproximadamente 30 bar.

Sin embargo, el hidrógeno comprimido se puede comprimir aún más antes del almacenamiento. En estas realizaciones, el gas hidrógeno comprimido se puede almacenar a una presión de hasta un máximo de aproximadamente 200 bar, o hasta un máximo de aproximadamente 150 bar, o hasta un máximo de aproximadamente 100 bar, o hasta un máximo de aproximadamente 90 bar, o hasta un máximo de aproximadamente 80 bar, o hasta un máximo de aproximadamente 70 bar, o hasta un máximo de aproximadamente 60 bar, o hasta un máximo de aproximadamente 50 bar.

Durante los períodos en los que el nivel de demanda de hidrógeno excede el nivel de producción, el gas hidrógeno comprimido se retira del almacenamiento y se reduce su presión para producir gas hidrógeno a presión reducida procedente del almacenamiento. La presión se puede reducir de cualquier manera convencional, particularmente haciendo pasar el gas a través de una válvula. Las referencias a "gas hidrógeno a presión reducida" en esta sección se refieren al gas hidrógeno almacenado (y por lo tanto se distingue del gas hidrógeno a presión reducida en el(los) sistema(s) de reciclaje).

La presión del gas hidrógeno a presión reducida procedente del almacenamiento dependerá de la presión en el punto del sistema de compresión de múltiples etapas al que se va a añadir el gas hidrógeno a presión reducida. Preferiblemente, la presión del gas hidrógeno a presión reducida procedente del almacenamiento es la presión de alimentación predeterminada para la etapa de compresión particular a la que se va a alimentar el gas hidrógeno a presión reducida.

En algunas realizaciones, se puede alimentar gas hidrógeno a presión reducida procedente del almacenamiento a la etapa final del sistema de compresión de múltiples etapas. En estas realizaciones, el gas hidrógeno a presión reducida procedente del almacenamiento estará a la presión de entrada de la alimentación a la etapa final, es decir, la presión de alimentación predeterminada para la etapa final.

En otras realizaciones, se puede alimentar gas hidrógeno a presión reducida procedente del almacenamiento a una etapa intermedia del sistema de compresión de múltiples etapas. En estas realizaciones, el gas hidrógeno a presión reducida procedente del almacenamiento estará a la presión de entrada de la alimentación a la etapa intermedia, es decir, la presión de alimentación predeterminada para la etapa intermedia.

Preferiblemente, el gas hidrógeno a presión reducida procedente del almacenamiento también se alimenta a la etapa de compresión centrífuga a la temperatura de alimentación predeterminada.

La etapa intermedia puede ser una etapa intermedia dentro de una sección de compresión o, cuando hay dos o más secciones en el sistema de compresión de múltiples etapas, la etapa inicial dentro de una sección de compresión adicional aguas abajo de una primera sección de compresión. En estas realizaciones, el gas hidrógeno a presión reducida procedente del almacenamiento estará a la presión de entrada de la alimentación a la sección de compresión adicional, es decir, la presión de "inter-sección".

En todavía otras realizaciones, el gas hidrógeno a presión reducida procedente del almacenamiento se puede alimentar al extremo de alimentación, es decir, a la etapa inicial, del sistema de compresión de múltiples etapas. En estas realizaciones, el gas hidrógeno a presión reducida procedente del almacenamiento será la presión de alimentación predeterminada al sistema de compresión de múltiples etapas, por ejemplo, alrededor de 1,1 bares.

Durante los períodos en los que la demanda supere la producción, el método podrá comprender:

5 reducir la presión del gas hidrógeno comprimido extraído del almacenamiento para producir gas hidrógeno a presión reducida a la presión de entrada a una primera etapa del sistema de compresión de múltiples etapas (una primera presión intermedia); y

 alimentar el gas hidrógeno a presión reducida a la primera etapa.

10 En tales realizaciones, una vez que la presión del gas hidrógeno comprimido almacenado cae hasta aproximadamente la presión de entrada de la primera etapa, el método puede comprender:

15 reducir aún más la presión del gas hidrógeno comprimido extraído del almacenamiento para producir gas hidrógeno a presión reducida a una presión de entrada a una segunda etapa del sistema de compresión de múltiples etapas aguas arriba de la primera etapa (una segunda presión intermedia); y

 alimentar el gas hidrógeno a presión reducida a la segunda etapa.

20 Se entenderá que los términos "primera etapa" y "segunda etapa" en este contexto no se refieren a las posiciones relativas de las etapas en el sistema de compresión de múltiples etapas en la dirección aguas abajo durante el funcionamiento normal. Por el contrario, los términos simplemente pretenden reflejar el orden de las etapas a las que se alimenta gas hidrógeno a presión reducida al sistema de compresión de múltiples etapas durante los períodos en los que la demanda excede la producción. Los términos "primera presión intermedia" y "segunda presión intermedia" se deben interpretar en consecuencia, siendo la primera presión intermedia más alta que la segunda presión intermedia.

25 Estas realizaciones pueden comprender además alimentar gas hidrógeno a presión reducida desde el almacenamiento a otras etapas del sistema de compresión de múltiples etapas aguas arriba de la primera y segunda etapas. En estas realizaciones adicionales, la presión del gas hidrógeno comprimido extraído del almacenamiento se reduce a la presión de entrada a las respectivas etapas.

30 En algunas realizaciones preferidas, la segunda etapa es la etapa inicial del sistema de compresión de múltiples etapas.

35 Se apreciará que, en realizaciones en las que se alimenta gas hidrógeno a presión reducida procedente del almacenamiento a una segunda etapa después de la primera etapa, el flujo de gas a la primera etapa se detiene cuando comienza el flujo de gas a la segunda etapa. En términos generales, el flujo de gas hidrógeno a presión reducida desde el almacenamiento a una etapa de compresión determinada se detiene cuando comienza el flujo de gas hidrógeno a presión reducida a otra etapa de compresión.

40 Dado que el gas hidrógeno puede ser devuelto desde el almacenamiento a una etapa intermedia y/o a la etapa inicial del sistema de compresión de múltiples etapas, el gas hidrógeno comprimido se puede almacenar a una presión de hasta un mínimo de aproximadamente 5 bar, quizás incluso hasta un mínimo de aproximadamente 1,3 bares.

45 En realizaciones en las que el gas hidrógeno comprimido se comprime aún más antes de ser almacenado, otra opción sería que el gas hidrógeno comprimido retirado del almacenamiento sea alimentado, después de una reducción de presión adecuada, directamente a los procesos aguas abajo hasta que la presión de almacenamiento caiga hasta la presión de alimentación de los procesos aguas abajo. En ese punto, la presión del gas hidrógeno comprimido retirado del almacenamiento se reduciría aún más y el gas hidrógeno a presión reducida procedente del almacenamiento se alimentaría a una etapa del sistema de compresión de múltiples etapas de acuerdo con la presente invención. Sin embargo, estas realizaciones no son preferidas, por ejemplo, debido al gasto de capital adicional del sistema de almacenamiento de alta presión.

50 En comparación con un sistema de almacenamiento de hidrógeno a alta presión con descarga solo a la presión de alimentación de un proceso aguas abajo, esto permite reducir el volumen de almacenamiento de hidrógeno mediante la utilización del sistema de compresión de múltiples etapas que ya está presente en el proceso para recomprimir el hidrógeno del almacenamiento cuando la presión de almacenamiento cae por debajo de esa presión de alimentación. De este modo, el hidrógeno puede seguir extrayéndose del almacenamiento hasta que la presión de almacenamiento caiga a un mínimo de la presión de alimentación al sistema de compresión de múltiples etapas.

55 Se requiere potencia de compresión adicional durante los períodos en los que la producción de hidrógeno está limitada por la falta de energía a los electrolizadores, pero la potencia de compresión adicional se puede minimizar suministrando hidrógeno a la presión entre etapas del compresor más alta posible dada la presión de almacenamiento en un momento particular. También permite que la presión máxima de almacenamiento de hidrógeno sea igual o inferior a la presión de alimentación del proceso aguas abajo para eliminar cualquier requisito de compresión adicional para el almacenamiento de hidrógeno.

Se apreciará que el mismo volumen de gas se almacena en el mismo volumen de almacenamiento a la misma presión máxima y que la reducción de la presión mínima de almacenamiento aumenta el volumen "liberable" de gas del almacenamiento, es decir, el volumen utilizable de gas almacenado.

Cuando el hidrógeno es producido y después se comprime en un sistema de compresión de múltiples etapas para su utilización en al menos un proceso aguas abajo, el volumen liberable de hidrógeno almacenado se puede aumentar devolviendo el hidrógeno del almacenamiento a una etapa en el sistema de compresión de múltiples etapas en lugar de directamente al proceso aguas abajo, esta disposición reduce el volumen total del recipiente de almacenamiento requerido por el proceso.

A modo de ejemplo, el almacenamiento desde una presión máxima de 200 bar hasta una presión mínima de 1,5 bar requiere un 15% menos de volumen del recipiente de almacenamiento para una masa determinada de hidrógeno liberable en comparación con el almacenamiento desde una presión máxima de 200 bar hasta una presión mínima de 30 bar.

De manera similar, el almacenamiento desde una presión máxima de 100 bar hasta una presión mínima de 1,5 bar requiere un 30% menos de volumen del recipiente de almacenamiento para una masa determinada de hidrógeno liberable en comparación con el almacenamiento desde una presión máxima de 100 bar hasta una presión mínima de 30 bar.

Además, el almacenamiento desde una presión máxima de 50 bar hasta una presión mínima de 1,5 bar requiere un 60% menos de volumen del recipiente de almacenamiento para una masa determinada de hidrógeno liberable en comparación con el almacenamiento desde una presión máxima de 50 bar hasta una presión mínima de 30 bar.

Además, el almacenamiento desde una presión máxima de 30 bar hasta una presión mínima de 1,5 bar es factible en comparación con 30 bar a 30 bar que no permitiría almacenamiento.

Además, aunque el volumen total del recipiente de almacenamiento aumenta a medida que se reduce la presión máxima de almacenamiento, la presión de diseño más baja hace que las paredes del recipiente sean más delgadas y se puede reducir el coste de capital general del sistema de almacenamiento. El espesor del recipiente a menudo está limitado a un valor máximo por consideraciones tales como la capacidad de fabricación y, en ese caso, la presión de diseño más baja conducirá a menos recipientes (aunque cada recipiente será más grande). Además, el esfuerzo permitido para el diseño de un recipiente puede aumentar por debajo de un espesor de pared del recipiente particular, y si la presión de diseño más baja permite que el espesor esté por debajo de este umbral, la masa metálica total del recipiente (y por lo tanto el coste total) puede ser reducido.

En realizaciones preferidas, el gas hidrógeno a presión reducida procedente del almacenamiento se puede alimentar a cualquiera de las etapas de compresión centrífuga mencionadas anteriormente alimentándolo aguas arriba del interenfriador de dicha etapa. Una ventaja particular de esto es que, cuando el gas hidrógeno a presión reducida está seco (por ejemplo, ha sido purificado), su adición al gas hidrógeno húmedo reducirá la fracción molar total de agua en la corriente combinada por debajo de un nivel en el que el interenfriador provoca la eliminación del vapor de agua del gas hidrógeno húmedo a través de la condensación. Por tanto, añadiendo gas hidrógeno a presión reducida antes de una etapa de interenfriamiento, se puede reducir la cantidad total de vapor de agua eliminado durante dicha etapa.

Se preverá que cuando se añade gas hidrógeno a presión reducida procedente del almacenamiento a la alimentación de gas hidrógeno, esto reduzca la fracción molar de agua en la alimentación de gas hidrógeno, incluso en ausencia de cualquier reciclaje.

En estos casos, la fracción molar de agua predeterminada para la etapa se seleccionará de manera que sea equivalente a la fracción molar de agua en la alimentación de gas hidrógeno que contiene el gas hidrógeno a presión reducida procedente del almacenamiento, tal como se alimenta a la etapa de compresión centrífuga en ausencia de cualquier reciclaje. De acuerdo con la presente invención, esta fracción molar predeterminada de agua se mantiene después en la alimentación de gas hidrógeno durante el reciclaje de gas hidrógeno desde el extremo de producto desde el extremo de alimentación de la etapa.

Alternativamente, cuando se desea una fracción molar de agua predeterminada más alta para una etapa, se pueden emplear métodos para aumentar la fracción molar de agua en el gas hidrógeno que comprende gas hidrógeno a presión reducida procedente del almacenamiento, tal como, por ejemplo, mediante inyección de agua.

Proceso(s) aguas abajo

En algunas realizaciones, el gas hidrógeno comprimido, una vez comprimido, se puede consumir en un proceso aguas abajo, o en más de un proceso aguas abajo dispuesto en paralelo.

Los procesos aguas abajo podrían incluir cualquier proceso que actualmente utilice hidrógeno "gris" o hidrógeno "azul". Estos procesos incluyen el refinado de petróleo y la fabricación de acero.

A modo de ejemplo, al menos algo, por ejemplo todo, el hidrógeno comprimido se podría utilizar para producir amoníaco por medio del proceso Haber (o Haber-Bosch). En este proceso, el amoníaco se produce haciendo reaccionar una mezcla de gases de hidrógeno y nitrógeno sobre un catalizador con base de hierro a alta temperatura, típicamente de aproximadamente 400°C a aproximadamente 500°C, y a alta presión, típicamente a una presión en el rango desde aproximadamente 100 bar hasta 200 bar. O alternativamente, al menos algo, por ejemplo, todo el gas hidrógeno comprimido se podría licuar mediante enfriamiento criogénico. O bien, una primera parte del gas hidrógeno comprimido se podría utilizar para producir amoníaco y una segunda parte del gas hidrógeno comprimido se podría licuar.

APARATO

Según un segundo aspecto de la presente invención, se proporciona un aparato para producir gas hidrógeno comprimido, comprendiendo el aparato:

una pluralidad de electrolizadores dispuestos en paralelo para electrolizar agua para proporcionar gas hidrógeno;

un sistema de generación de electricidad para generar electricidad para alimentar la pluralidad de electrolizadores, estando el sistema de generación de electricidad en comunicación eléctricamente conductora con la pluralidad de electrolizadores;

un sistema de compresión de múltiples etapas para comprimir el gas hidrógeno para proporcionar un gas hidrógeno comprimido, comprendiendo el sistema de compresión de múltiples etapas:

un extremo de entrada, un extremo de salida y una etapa de compresión centrífuga que tiene un extremo de alimentación y un extremo de producto, estando el extremo de entrada en comunicación de flujo de fluido con la pluralidad de electrolizadores a través de un cabezal de alimentación; y

un sistema de reciclaje en comunicación de flujo de fluido con el extremo de producto y con el extremo de alimentación de la etapa de compresión centrífuga, comprendiendo el sistema de reciclaje: una válvula para reducir la presión del gas hidrógeno reciclado a una presión de alimentación predeterminada antes de cualquier paso de enfriamiento para proporcionar una presión reducida gas de hidrogeno;

un enfriador para enfriar gas hidrógeno que comprende gas hidrógeno a presión reducida en el sistema de reciclaje y/o en el cabezal de alimentación a la etapa de compresión centrífuga.

En algunas realizaciones, el sistema de compresión de múltiples etapas comprende:

una segunda etapa de compresión centrífuga aguas abajo de la primera etapa de compresión centrífuga, comprendiendo la segunda etapa un extremo de alimentación y un extremo de producto y estando el extremo de alimentación en comunicación de flujo de fluido con el extremo de producto de la primera etapa de compresión centrífuga a través de un cabezal de alimentación; y

un segundo sistema de reciclaje en comunicación de flujo de fluido con el extremo de producto y con el extremo de alimentación de la segunda etapa, comprendiendo el segundo sistema de reciclaje: una válvula para reducir la presión del gas hidrógeno reciclado a una presión de alimentación predeterminada para la segunda etapa antes de cualquier etapa de enfriamiento para proporcionar gas hidrógeno a presión reducida;

un segundo enfriador para enfriar gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida en el cabezal de alimentación a la segunda etapa de compresión centrífuga.

Electrolizadores

La electrólisis del agua se realiza mediante una pluralidad de unidades de electrólisis o "celdas". Cada unidad o celda se puede denominar "electrolizador".

La pluralidad de electrolizadores puede tener una capacidad total de al menos 1 GW. La capacidad total máxima de los electrolizadores está limitada únicamente por consideraciones prácticas, por ejemplo, generar suficiente energía a partir de la(s) fuente(s) de energía renovable para alimentar la pluralidad de electrolizadores. Así, los electrolizadores podrán tener una capacidad total máxima de 10 GW o más. La capacidad total de los electrolizadores que realizan la electrólisis puede ser de 1 GW a 5 GW, por ejemplo, desde aproximadamente 1,5 GW hasta aproximadamente 3 GW.

La pluralidad de electrolizadores se compone normalmente de un gran número, por ejemplo, cientos de celdas individuales combinadas en "módulos" que también incluyen equipos de proceso, por ejemplo, bombas, enfriadores y/o separadores, etc., y los grupos de estos módulos normalmente están dispuestos en edificios separados.

- 5 Cada módulo suele tener una capacidad máxima de al menos 10 MW, por ejemplo, 20 MW, y cada edificio suele tener una capacidad total de al menos 100 MW, por ejemplo, 400 MW.

10 Con la presente invención se puede utilizar cualquier tipo adecuado de electrolizador. En este sentido, existen tres tipos convencionales de electrolizadores: electrolizadores alcalinos, electrolizadores de PEM y electrolizadores de óxido sólido, y cada uno de estos tipos de electrolizadores es, en teoría, adecuado para su utilización con la presente invención.

15 Los electrolizadores alcalinos funcionan por medio del transporte de iones hidróxido (OH^-) a través del electrolito desde el cátodo hasta el ánodo, generándose hidrógeno en el lado del cátodo. Están disponibles comercialmente electrolizadores que utilizan una solución alcalina líquida de hidróxido de sodio o hidróxido de potasio como electrolito. Los electrolizadores alcalinos comerciales normalmente funcionan a una temperatura dentro del intervalo de aproximadamente 100°C a aproximadamente 150°C.

20 En un electrolizador PEM, el electrolito es un material plástico sólido. El agua reacciona en el ánodo para formar oxígeno e iones de hidrógeno cargados positivamente. Los electrones fluyen a través de un circuito externo y los iones de hidrógeno se mueven selectivamente a través del PEM hasta el cátodo. En el cátodo, los iones de hidrógeno se combinan con los electrones del circuito externo para formar gas hidrógeno. Los electrolizadores PEM normalmente funcionan a una temperatura dentro del intervalo de aproximadamente 70°C a aproximadamente 90°C.

25 Los electrolizadores de óxido sólido utilizan un material cerámico sólido como electrolito el cual conduce selectivamente iones de oxígeno cargados negativamente (O^{2-}) a temperaturas elevadas. El agua en el cátodo se combina con los electrones del circuito externo para formar gas hidrógeno e iones de oxígeno cargados negativamente. Los iones de oxígeno pasan a través de la membrana cerámica sólida y reaccionan en el ánodo para formar oxígeno gaseoso y generar electrones para el circuito externo. Los electrolizadores de óxido sólido deben funcionar a temperaturas lo suficientemente altas para que las membranas de óxido sólido funcionen correctamente, por ejemplo, de aproximadamente 700°C a aproximadamente 800°C.

Debido a las temperaturas de funcionamiento más bajas, normalmente se prefiere el uso de electrolizadores alcalinos y/o electrolizadores PEM.

35 La pluralidad de electrolizadores puede estar dispuesta en al menos dos grupos paralelos. En estas realizaciones, el aparato comprende:

- 40 un primer cabezal para recoger gas hidrógeno de cada electrolizador de cada grupo; y
un segundo cabezal para recoger gas hidrógeno de los primeros cabezales y alimentar el gas hidrógeno al extremo de alimentación del sistema de compresión de múltiples etapas.

45 En algunas realizaciones, en las que el aparato comprende además un sistema de almacenamiento para el exceso de hidrógeno, el aparato comprende un conducto para alimentar gas hidrógeno comprimido desde el sistema de almacenamiento después de una reducción adecuada de la presión al segundo cabezal.

Sistema de generación de electricidad para electrolizadores.

50 La electricidad para la electrólisis se puede generar a partir de cualquier fuente de energía adecuada, incluidas fuentes de energía renovables o no renovables. Preferiblemente, la electricidad se puede generar a partir de al menos una fuente de energía renovable, por ejemplo, energía eólica y/o energía solar.

55 En realizaciones en las que se utiliza energía eólica para generar electricidad, el sistema de generación de electricidad comprenderá una pluralidad de turbinas eólicas. En realizaciones en las que se utiliza energía solar para generar electricidad, el sistema de generación de electricidad comprenderá una pluralidad de células fotovoltaicas o "células solares".

60 Algunas realizaciones comprenderán una pluralidad de turbinas eólicas y una pluralidad de células fotovoltaicas.

Se entenderá que la expresión "comunicación eléctricamente conductora" significa que se utilizarán hilos y/o cables apropiados, junto con cualquier otro equipo relevante, para conectar el sistema de generación de electricidad con los electrolizadores de manera segura y eficiente.

65 *Sistema de compresión de múltiples etapas*

En la presente invención, el sistema de compresión de múltiples etapas comprende una etapa de compresión centrífuga con un extremo de alimentación y un extremo de producto. Como se mencionó anteriormente, el sistema de compresión de múltiples etapas puede comprender una pluralidad de etapas que típicamente tienen una relación de compresión en el rango de aproximadamente 1,5 a aproximadamente 2,5, por ejemplo, de aproximadamente 1,5 a aproximadamente 2,5, de aproximadamente 2 a aproximadamente 2,5. Normalmente están dispuestos interenfriadores entre etapas adyacentes y es posible que se requieran postenfriadores después de una etapa final.

Las etapas de un sistema de compresión de múltiples etapas también están dispuestas en una o más secciones de compresión. Cada sección puede comprender una o más etapas de compresión, junto con los enfriadores asociados.

En realizaciones particulares, el sistema de compresión de múltiples etapas tiene dos secciones, una primera sección (baja presión o "LP") en la que se comprime gas hidrógeno desde la presión de alimentación al sistema de compresión de múltiples etapas hasta una primera presión elevada, y una segunda (presión media o sección "MP") en la que se comprime gas hidrógeno desde la primera presión elevada hasta la presión elevada final deseada para cualquier proceso aguas abajo.

Una sección de LP puede tener una o más, por ejemplo, dos, etapas de compresión y una sección MP puede tener dos o más, por ejemplo, 3 o 4, etapas de compresión. En algunas realizaciones, las secciones LP y MP pueden comprender ambas etapas de compresión centrífuga. En otras realizaciones, la sección LP y/o MP puede comprender una combinación de compresores centrífugos y alternativos. En algunas realizaciones, la sección LP comprende al menos una etapa de compresión centrífuga, y la sección MP comprende al menos una etapa de compresión alternativa. En algunas realizaciones, la sección LP comprende al menos una etapa de compresión centrífuga, y la sección MP comprende etapas de compresión centrífuga y/o alternativa. Se preverá que en algunas realizaciones particularmente preferidas todas las etapas del sistema de compresión de múltiples etapas sean etapas de compresión centrífuga.

A modo de ejemplo, para un proceso que tiene una capacidad total de electrolizador de 1 GW, el sistema de compresión de múltiples etapas puede tener de 2 a 4 compresores. El experto apreciará que un proceso que tenga una capacidad total mayor requeriría un mayor número de compresores, es decir, 5 compresores en un sistema de compresión de múltiples etapas para un proceso con una capacidad total de electrolizador de 2 GW.

Los compresores en una sección LP pueden sobredimensionarse según corresponda, por ejemplo, en un 10%, para cubrir la pérdida de una máquina. Adicional o alternativamente, el sistema de compresión de múltiples etapas puede comprender un compresor de repuesto en la sección LP o MP que entraría en funcionamiento para reemplazar otra máquina en la sección relevante que se haya averiado.

Como se mencionó anteriormente, el sistema de compresión de múltiples etapas puede comprender una sola sección. En estas realizaciones, la sección puede comprender una pluralidad de compresores dispuestos en paralelo, comprendiendo cada compresor al menos una etapa de compresión centrífuga. El aparato puede comprender además un tercer cabezal para recoger gas hidrógeno comprimido de cada compresor y alimentar el gas hidrógeno comprimido a, al menos, una unidad de procesamiento aguas abajo, o a un sistema de purificación aguas arriba de al menos una unidad de proceso aguas abajo.

En algunas realizaciones en las que se utiliza un sistema de almacenamiento, el aparato puede comprender además un conducto para alimentar gas hidrógeno comprimido desde el sistema de almacenamiento después de una reducción de presión adecuada al segundo cabezal.

Sin embargo, el sistema de compresión de múltiples etapas puede comprender:

- una primera sección que comprende una pluralidad de compresores dispuestos en paralelo, comprendiendo cada compresor al menos una etapa; y
- una segunda sección aguas abajo de la primera sección, comprendiendo la segunda sección una pluralidad de compresores dispuestos en paralelo, comprendiendo cada compresor al menos dos etapas dispuestas en serie.

En estas realizaciones, el aparato puede comprender:

un tercer cabezal para recoger gas hidrógeno comprimido de cada compresor en la primera sección y alimentar el gas hidrógeno comprimido a los compresores de la segunda sección; y

un cuarto cabezal para recoger gas hidrógeno comprimido de cada compresor en la segunda sección y alimentar gas hidrógeno comprimido a la(s) unidad(es) de procesamiento aguas abajo, o a un sistema de purificación aguas arriba de la(s) unidad(es) de proceso aguas abajo.

En algunas realizaciones en las que se utiliza un sistema de almacenamiento, el aparato puede comprender además un conducto para alimentar gas hidrógeno comprimido desde el sistema de almacenamiento después de una reducción

de presión adecuada al tercer cabezal, preferiblemente aguas arriba de cualquier interenfriamiento en el tercer cabezal.

5 La pluralidad de electrolizadores puede estar dispuesta en al menos dos grupos. En estas realizaciones, el sistema de compresión de múltiples etapas puede comprender:

una primera sección que comprende una pluralidad de compresores dispuestos en paralelo en al menos dos grupos, comprendiendo cada compresor al menos dos etapas dispuestas en serie; y

10 una segunda sección aguas abajo de la primera sección, comprendiendo la segunda sección una pluralidad de compresores dispuestos en paralelo, comprendiendo cada compresor al menos dos etapas dispuestas en serie.

El aparato puede comprender además:

15 al menos dos primeros cabezales, cada primer cabezal para recoger gas hidrógeno de cada electrolizador en un grupo y alimentar el gas hidrógeno al extremo de alimentación de un grupo respectivo de compresores en la primera sección del sistema de compresión de múltiples etapas;

20 un segundo cabezal para recoger gas hidrógeno comprimido de cada grupo de compresores en la primera sección y alimentar el gas hidrógeno comprimido a los compresores de dicha segunda sección; y

un tercer cabezal para recoger gas hidrógeno comprimido de cada compresor en la segunda sección y alimentar el gas hidrógeno comprimido a la(s) unidad(es) de procesamiento aguas abajo, o a un sistema de purificación aguas arriba de la(s) unidad(es) de proceso aguas abajo.

25 En algunas realizaciones en las que se utiliza un sistema de almacenamiento, el aparato puede comprender además un conducto para alimentar gas hidrógeno comprimido desde el sistema de almacenamiento después de una reducción de presión adecuada a, al menos uno, de dichos primeros cabezales. Adicional o alternativamente, el aparato de estas realizaciones puede comprender un conducto para alimentar gas hidrógeno comprimido desde el sistema de almacenamiento, después de una reducción de presión adecuada, al segundo cabezal, preferiblemente aguas arriba de un interenfriador en el segundo cabezal.

30 Cada etapa de compresión en el sistema de compresión de múltiples etapas tendrá una temperatura y presión de alimentación predeterminadas para una compresión óptima en esa etapa. Los rangos preferidos para estos valores son idénticos a los descritos anteriormente en relación con el proceso para implementar la presente invención. Cada etapa de compresión también tendrá una fracción molar de agua predeterminada.

Sistema de reciclaje

40 El aparato comprende uno o más sistemas de reciclaje. El sistema de reciclaje está en comunicación de flujo de fluido con el extremo de producto y el extremo de alimentación de la etapa de compresión centrífuga. El sistema de reciclaje comprende una válvula para reducir la presión del gas hidrógeno reciclado a la presión de alimentación predeterminada antes de cualquier etapa de enfriamiento para proporcionar gas hidrógeno a presión reducida.

45 La válvula controla la cantidad de gas hidrógeno que se recicla dependiendo de la cantidad de gas hidrógeno reciclado que se requiere, es decir, dependiendo de la variación en el flujo de gas hidrógeno al extremo de alimentación del compresor.

Enfriador

50 El aparato comprende un enfriador. El enfriador sirve para enfriar el gas hidrógeno necesario, que comprende el gas hidrógeno a presión reducida. El enfriador puede estar ubicado en el sistema de reciclaje y/o en el cabezal de alimentación a la etapa de compresión centrífuga.

55 Se conocen en la técnica tipos de enfriadores adecuados, tales como un enfriador capaz de utilizar intercambio de calor indirecto contra el aire, agua de enfriamiento, una corriente de proceso u otro fluido refrigerante, o enfriamiento por contacto directo con agua, por ejemplo. En un ejemplo particular, el enfriador puede ser un enfriador de tipo "carcasa y tubo" que utiliza una corriente de agua de enfriamiento para ajustar la temperatura del gas.

60 *Sistema de control*

En algunas realizaciones, el aparato comprende un sistema de control para monitorizar y enfriar gas hidrógeno que comprende gas hidrógeno a presión reducida, de modo que la fracción molar de agua en la alimentación de gas hidrógeno sea la fracción molar de agua predeterminada. Se apreciará que las características anteriores descritas en relación con el método de la presente invención podrían implementarse utilizando dicho sistema de control.

65

En algunas realizaciones, el sistema de control puede implementar un circuito de retroalimentación, que tenga en cuenta información sobre la temperatura de la alimentación de gas hidrógeno que se alimenta al extremo de alimentación de una etapa de compresión centrífuga. En algunas realizaciones donde el enfriamiento se produce en el sistema de reciclaje, el sistema de control puede tener en cuenta la temperatura del gas hidrógeno a presión reducida para controlar el alcance del enfriamiento.

Controlando la temperatura del gas hidrógeno que comprende gas hidrógeno a presión reducida enfriándolo a la temperatura de alimentación predeterminada, la fracción molar de agua en la alimentación de gas hidrógeno se mantiene en la fracción molar de agua predeterminada.

Una manera de controlar el grado de enfriamiento es mediante la utilización de una derivación que dirige cantidades variables de gas hidrógeno a presión reducida alrededor del enfriador antes de volver a combinarlo con gas hidrógeno a presión reducida enfriado, por ejemplo.

En realizaciones en las que se utiliza un sistema de almacenamiento, el aparato puede comprender un sistema de control que controla no solo el caudal de hidrógeno comprimido desde el sistema de compresión de múltiples etapas al sistema de almacenamiento, por ejemplo, durante los períodos en los que la producción de hidrógeno supera la demanda, pero también el caudal de gas hidrógeno comprimido al sistema de compresión de múltiples etapas desde el sistema de almacenamiento, por ejemplo, durante los períodos en los que la demanda de hidrógeno supera la producción.

En algunas realizaciones, el sistema de control simplemente buscaría mantener la presión del gas hidrógeno en un cabezal aguas abajo del proceso aguas abajo. Por lo tanto, para proporcionar continuamente una cantidad determinada de hidrógeno al proceso aguas abajo, se mantendría un controlador de presión en un cabezal de descarga que alimenta el proceso aguas abajo.

Si la presión en el cabezal de descarga excedió la presión de alimentación requerida (por ejemplo, debido a que hay más hidrógeno disponible del que consume el proceso aguas abajo), la presión se aliviaría abriendo una válvula en la línea de alimentación al almacenamiento.

Una vez que la presión en el cabezal de descarga cayera a la presión de alimentación requerida, se cerraría la válvula en la línea de alimentación al almacenamiento.

Si la presión en el cabezal de descarga cayó por debajo de la presión de alimentación requerida (por ejemplo, debido a que hay menos hidrógeno disponible del que consume el proceso aguas abajo), la presión se aumentaría abriendo una válvula en una primera línea de retorno desde el almacenamiento a una primera etapa en el sistema de compresión de múltiples etapas.

La válvula en la primera línea de retorno permanecería abierta hasta el momento en que la presión en el cabezal de descarga excediera la presión de alimentación requerida, lo que indica que el nivel de producción de hidrógeno ha regresado al nivel requerido, momento en el cual la válvula se cerraría, o hasta que la presión en el recipiente de almacenamiento caiga aproximadamente a la presión de entrada a la primera etapa del sistema de compresión de múltiples etapas que es alimentado por la primera línea de retorno.

En el último caso, no solo se cerraría la válvula en la primera línea de retorno, sino que también se abriría una válvula en una segunda línea de retorno desde el almacenamiento a una segunda etapa en el sistema de compresión de múltiples etapas (aguas arriba de la primera etapa) para que continúe suministrando hidrógeno desde el almacenamiento al proceso aguas abajo.

Un sistema de control de este tipo se puede denominar sistema de control de "rango dividido".

Sistema de purificación

En realizaciones en las que hay uno o varios procesos aguas abajo que no pueden tolerar los niveles de agua y oxígeno inherentemente presentes en el gas hidrógeno comprimido producido por la electrólisis del agua, el aparato puede comprender un sistema de purificación en el que se purifica el gas hidrógeno comprimido.

El sistema de purificación normalmente comprenderá una unidad "DeOx" en la que se elimina el oxígeno mediante la combustión catalítica de hidrógeno para producir agua y gas hidrógeno comprimido sin oxígeno.

A continuación, el gas empobrecido en oxígeno se puede secar en una secadora, por ejemplo, una unidad de adsorción, tal como una unidad de adsorción por cambio de temperatura (TSA), para producir gas hidrógeno seco comprimido para los procesos aguas abajo.

Unidad(es) de procesamiento aguas abajo

En algunas realizaciones puede haber una unidad o unidades de procesamiento aguas abajo. Una unidad de procesamiento aguas abajo puede ser cualquier unidad que utilice gas hidrógeno como materia prima.

Ejemplos de unidades de procesamiento aguas abajo adecuadas incluyen una refinería de petróleo, una instalación de fabricación de acero, una planta de síntesis de amoníaco o una planta de licuefacción de hidrógeno. En algunas realizaciones, hay una planta de síntesis de amoníaco y una planta de licuefacción de hidrógeno dispuestas en paralelo.

Sistema de almacenamiento

En algunas realizaciones, el aparato comprende un sistema de almacenamiento de gas hidrógeno para almacenar gas hidrógeno comprimido. En tales realizaciones, el sistema de almacenamiento está en comunicación de flujo de fluido con el extremo de salida del sistema de compresión de múltiples etapas y al menos una etapa de compresión del sistema de compresión de múltiples etapas.

El sistema de almacenamiento normalmente comprende varios recipientes a presión y/o segmentos de tubería conectados a un cabezal de entrada/salida común.

Los recipientes a presión pueden ser esferas, por ejemplo, de hasta unos 25 m de diámetro, o "balas", es decir, recipientes horizontales con grandes relaciones LID (típicamente hasta aproximadamente 12:1) con diámetros de hasta aproximadamente 12 m.

También se pueden utilizar domos de sal si la geología del sitio lo permite.

Fuente de agua

Se puede utilizar cualquier fuente de agua adecuada con la presente invención. Sin embargo, en realizaciones en las que se utiliza agua de mar para producir agua para la electrólisis, el aparato comprendería además al menos una unidad (o planta) para desalinización y desmineralización del agua de mar.

Los aspectos de la presente invención incluyen: #1. Un proceso para producir gas hidrógeno comprimido, comprendiendo el proceso:

electrolizar agua para producir gas hidrógeno, y

comprimir el gas hidrógeno en un sistema de compresión de múltiples etapas para producir gas hidrógeno comprimido;

comprendiendo el sistema de compresión de múltiples etapas:

una etapa de compresión centrífuga con un extremo de alimentación y un extremo de producto, y

un sistema de reciclaje para reciclar una parte del gas hidrógeno desde el extremo de producto hasta el extremo de alimentación de la etapa de compresión centrífuga;

en donde la alimentación de gas hidrógeno se alimenta al extremo de alimentación de la etapa de compresión centrífuga a una temperatura y presión de alimentación predeterminadas y que tiene una fracción molar de agua predeterminada;

en donde una parte del gas hidrógeno se elimina, según sea necesario, del extremo de producto, se reduce la presión en el sistema de reciclaje a la presión de alimentación predeterminada antes de cualquier etapa de enfriamiento para proporcionar gas hidrógeno a presión reducida que después se recicla para formar al menos parte de la alimentación de gas hidrógeno a la etapa de compresión centrífuga; y

en donde el proceso comprende enfriar gas hidrógeno que comprende gas hidrógeno a presión reducida de modo que la fracción molar de agua en la alimentación de gas hidrógeno sea la fracción molar de agua predeterminada.

#2. El proceso según el Aspecto #1, en el que el gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida se enfría a una temperatura dentro del rango de aproximadamente $\pm 2^\circ \text{C}$ de la temperatura de alimentación predeterminada.

#3. El proceso según cualquier Aspecto anterior, en el que la temperatura de alimentación predeterminada es de aproximadamente 20 a aproximadamente 60°C .

#4. El proceso según cualquier Aspecto anterior, en el que el gas hidrógeno alimentado a la etapa de compresión centrífuga tiene un peso molecular aparente dentro de un intervalo de aproximadamente 2,2 a aproximadamente 3,5.

5 #5. El proceso según cualquier Aspecto anterior, en el que el peso molecular aparente del gas hidrógeno que comprende gas hidrógeno a presión reducida después del enfriamiento es equivalente al peso molecular aparente de la alimentación de gas hidrógeno.

10 #6. El proceso según cualquier Aspecto anterior, en el que la etapa de compresión centrífuga es una etapa inicial del sistema de compresión de múltiples etapas.

#7. El proceso según cualquier Aspecto anterior, en el que el sistema de compresión de múltiples etapas comprende una primera sección y al menos una sección adicional aguas abajo de la primera sección.

15 #8. El proceso según cualquier Aspecto anterior, en el que el gas hidrógeno comprimido se consume en al menos un proceso aguas abajo, y en donde durante los períodos en los que la electrólisis produce más gas hidrógeno del requerido por el proceso o procesos aguas abajo, el proceso comprende alimentar el exceso de gas hidrógeno comprimido al almacenamiento, opcionalmente después de una compresión adicional; y en donde durante los períodos en los que el(los) proceso(s) aguas abajo requieren más gas hidrógeno del que se produce mediante la electrólisis, el proceso comprende retirar gas hidrógeno comprimido del almacenamiento y, después de una reducción adecuada de la presión, alimentar dicho gas hidrógeno desde el almacenamiento a una etapa del sistema de compresión de múltiples etapas.

20 #9. El proceso según el Aspecto #8, en el que dicho gas hidrógeno procedente del almacenamiento se alimenta a una etapa del sistema de compresión de múltiples etapas alimentándolo a un interenfriador aguas arriba de dicha etapa.

25 #10. El proceso según cualquier Aspecto anterior, en el que el gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida se enfría en el sistema de reciclaje.

30 #11. El proceso según cualquier Aspecto anterior, en el que el gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida se enfría en la alimentación de gas hidrógeno.

35 #12. El proceso según cualquier Aspecto anterior, en el que el sistema de compresión de múltiples etapas comprende:

una segunda etapa de compresión centrífuga aguas abajo de la etapa de compresión centrífuga, comprendiendo dicha segunda etapa un extremo de alimentación y un extremo de producto,

40 un segundo sistema de reciclaje para reciclar una parte del gas hidrógeno desde el extremo de producto hasta el extremo de alimentación de la segunda etapa;

45 en donde la alimentación de gas hidrógeno se alimenta al extremo de alimentación de la segunda etapa a una temperatura y presión de alimentación predeterminadas y que tiene una fracción molar de agua predeterminada:

50 en donde una parte del gas hidrógeno se elimina, según sea necesario, del extremo de producto de la segunda etapa, se reduce la presión en el segundo sistema de reciclaje a la presión de alimentación predeterminada antes de cualquier etapa de enfriamiento para proporcionar gas hidrógeno a presión reducida que después es reciclado para formar al menos parte de la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa; y

55 en donde el proceso comprende enfriar gas hidrógeno que comprende gas hidrógeno a presión reducida en la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa de modo que la fracción molar de agua en dicha alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa sea la fracción molar de agua predeterminada.

#13. Un aparato para producir gas hidrógeno comprimido, comprendiendo el aparato:

60 una pluralidad de electrolizadores dispuestos en paralelo para electrolizar agua para proporcionar gas hidrógeno;

un sistema de generación de electricidad para generar electricidad para alimentar la pluralidad de electrolizadores, estando el sistema de generación de electricidad en comunicación eléctricamente conductora con la pluralidad de electrolizadores;

65

un sistema de compresión de múltiples etapas para comprimir el gas hidrógeno para proporcionar un gas hidrógeno comprimido, comprendiendo el sistema de compresión de múltiples etapas:

- 5 un extremo de entrada, un extremo de salida y una etapa de compresión centrífuga que tiene un extremo de alimentación y un extremo de producto, estando el extremo de entrada en comunicación de flujo de fluido con la pluralidad de electrolizadores a través de un cabezal de alimentación; y
- 10 un sistema de reciclaje en comunicación de flujo de fluido con el extremo de producto y con el extremo de alimentación de la etapa de compresión centrífuga, comprendiendo el sistema de reciclaje: una válvula para reducir la presión del gas hidrógeno reciclado a una presión de alimentación predeterminada antes de cualquier paso de enfriamiento para proporcionar una presión reducida gas de hidrogeno;
- 15 un enfriador para enfriar gas hidrógeno que comprende gas hidrógeno a presión reducida en el sistema de reciclaje y/o en el cabezal de alimentación a la etapa de compresión centrífuga.

#14. El aparato según el Aspecto #13, en el que el sistema de compresión de múltiples etapas comprende:

- 20 una segunda etapa de compresión centrífuga aguas abajo de la primera etapa de compresión centrífuga, comprendiendo la segunda etapa un extremo de alimentación y un extremo de producto y estando el extremo de alimentación en comunicación de flujo de fluido con el extremo de producto de la primera etapa de compresión centrífuga a través de un cabezal de alimentación; y
- 25 un segundo sistema de reciclaje en comunicación de flujo de fluido con el extremo de producto y el extremo de alimentación de la segunda etapa, comprendiendo el segundo sistema de reciclaje: una válvula para reducir la presión del gas hidrógeno reciclado a una presión de alimentación predeterminada para la segunda etapa antes de cualquier etapa de enfriamiento para proporcionar gas hidrógeno a presión reducida;
- 30 un segundo enfriador para enfriar gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida en el cabezal de alimentación a la segunda etapa de compresión centrífuga.

La invención se describirá ahora solo a modo de ejemplo y con referencia a las figuras en las que:

- 35 La FIGURA 1 es un diagrama de flujo simplificado para un primer ejemplo de la presente invención; la FIGURA 2 es un diagrama de flujo simplificado para un segundo ejemplo de la presente invención; la FIGURA 3 es un diagrama de flujo simplificado para un tercer ejemplo de la presente invención.

40 Según la Figura 1, la alimentación 1 contiene gas hidrógeno suministrado desde electrolizadores (y/o desde el almacenamiento) y se mezcla con gas hidrógeno reciclado de la corriente 19 antes de alimentarse al separador de fases S100. El separador de fases S100 elimina el agua líquida del gas hidrógeno para proporcionar alimentación de gas hidrógeno 7 que se alimenta a la etapa del compresor K102 para su compresión.

45 Un sistema de reciclaje (17, V110 y 19) recoge gas de hidrógeno comprimido caliente de la corriente 9 en el extremo de producto del compresor K102 como corriente 17. En este sistema, la corriente de reciclaje de hidrógeno comprimido caliente 17 reduce su presión a través de la válvula de reciclaje V110 a la presión de alimentación predeterminada para la etapa de compresión K102 antes de enfriarse en el enfriador de reciclaje E116 a la temperatura de alimentación predeterminada para la etapa de compresión K102 para proporcionar una corriente de gas hidrógeno 19 a presión reducida enfriada. La temperatura de la corriente 19 también puede ser controlada desviando una parte del flujo 50 alrededor del enfriador E116 y recombinándolo con la corriente enfriada en diversos grados (no mostrada).

Esto significa que no se ha condensado agua líquida durante el enfriamiento y no hay agua líquida presente en la corriente 19. Después, la corriente 19 se mezcla con la alimentación 1 para proporcionar la corriente mezclada 3. El contenido de agua de la corriente mezclada 3 y la alimentación al compresor 7 por lo tanto no cambia en comparación 55 con la alimentación 1.

La Figura 2 describe una disposición de la presente invención que es una alternativa a la disposición mostrada en el diagrama de flujo de la Figura 1.

60 Se han utilizado las mismas referencias numéricas para indicar características del diagrama de flujo de la Figura 2 que son comunes al diagrama de flujo de la Figura 1. A continuación se presenta una descripción de las características que distinguen la realización de la Figura 2 del proceso mostrado en la Figura 1.

65 A diferencia de la Figura 1, en la Figura 2 no hay un enfriador en el sistema de reciclaje, sino que hay uno ubicado en la alimentación de gas hidrógeno para enfriar la alimentación mixta 3. Por lo tanto, en este ejemplo el gas hidrógeno reciclado a presión reducida en la corriente 19 no se enfría hasta después de que se mezcla con la alimentación 1

como corriente combinada 3. Este ejemplo es particularmente adecuado para etapas de compresión centrífuga que son una etapa intermedia o final de compresión, donde el enfriador puede actuar como un "interenfriador" y un enfriador para el gas hidrógeno reciclado caliente en la corriente 19.

- 5 La Figura 3 describe un sistema de reciclaje idéntico alrededor de una etapa como en la Figura 1, pero describe además un ejemplo en el que se utiliza junto con una etapa aguas abajo en serie con la disposición que se muestra en la Figura 2.

- 10 Se han utilizado las mismas referencias numéricas para indicar características del diagrama de flujo de la Figura 3 que son comunes a los diagramas de flujo de las Figuras 1 y 2. A continuación se presenta una descripción de las características que distinguen la realización de la Figura 3 de los procesos mostrados en las Figuras 1 y 2.

- 15 En este ejemplo donde hay otra etapa aguas abajo en serie, la segunda corriente de gas hidrógeno de reciclaje a presión reducida 23 de la segunda etapa aguas abajo (no mostrada) se puede mezclar con la corriente de descarga caliente 9 de la primera etapa K102 aguas arriba antes de enfriarse en el interenfriador de etapa anterior E106 como alternativa a un enfriador de reciclaje separado.

- 20 Esta disposición evita cambios en la concentración de agua durante el reciclaje de las etapas del compresor. Este no sería el caso de los sistemas de compresión convencionales, donde el reciclaje alrededor de una etapa (K102) siempre se realiza después de los pasos de enfriamiento (E106) y de la eliminación de agua líquida (S100), lo que disminuiría la concentración de agua en la alimentación de reciclaje.

- 25 El sistema representado en la Figura 3 se explicará ahora con más detalle haciendo referencia al siguiente ejemplo que contiene datos simulados. Estos datos se generaron utilizando un paquete de simulación por ordenador, Aspen Plus con versión nº 10.

<i>Ejemplo</i>								
<i>Corriente</i>	1	3	5	7	9	10	11	15
<i>Temperatura, °C</i>	40.0	40.0	40.0	40.0	140.9	141.0	40.0	40.0
<i>P, bar</i>	1.10	1.10	1.10	1.10	2.54	2.54	2.50	2.50
<i>Flujo molar, kmol/hora</i>	321.6	1072.0	1072.0	1072.0	1072.0	1043.0	1043.0	1030.6
<i>Frac. de Vapor</i>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00
<i>Frac. Mol. de Agua</i>	0.0671	0.0671	0.0671	0.0671	0.0671	0.0412	0.0412	0.0296
<i>Humedad relativa</i>	100%	100%	100%	100%	5%	3%	100%	100%
<i>Peso Mol</i>	3.090	3.090	3.090	3.090	3.090	2.675	2.675	2.490

(cont.)

<i>Ejemplo</i>					
<i>Corriente</i>	17	19	23	52	60
<i>Temperatura, °C</i>	140.9	40.0	141.0		40.0
<i>P, bar</i>	2.54	1.10	2.54		2.50
<i>Flujo molar, kmol/hora</i>	750.4	750.4	721.4	0.0	12.4
<i>Frac. de Vapor</i>	1.00	1.00	1.00		0.00
<i>Frac. Mol. de Agua</i>	0.0671	0.0671	0.0296		1.0000
<i>Humedad relativa</i>	5%	100%	2%		
<i>Peso Mol.</i>	3.090	3.090	2.490		

- 30 El ejemplo anterior ilustra la utilización de un enfriador de reciclaje de baja presión para evitar la condensación de agua que se produce cuando el gas se enfría a alta presión. La alimentación 1 está saturada con una humedad relativa del 100% pero con un flujo del 30% del flujo total. Debido al flujo reducido, el sistema de reciclaje se activa para que la etapa de compresión opere al 100% de flujo. La reducción de presión en la válvula V110 antes del enfriamiento en el enfriador E116 significa que no se condensa agua antes de que la corriente de reciclaje 19 se vuelva a mezclar con

la alimentación 1. Este ejemplo también ilustra el enfriamiento de la corriente de reciclaje 23 alimentada desde una etapa aguas abajo en el interenfriador E106.

5 Se puede observar a partir del ejemplo anterior que la presente invención demuestra una manera de reciclar gas hidrógeno alrededor de una etapa sin reducir sustancialmente la fracción molar de agua en la alimentación de gas hidrógeno a una etapa de compresión centrífuga. Esto a su vez da como resultado que la alimentación de gas hidrógeno tenga un peso molecular aparente que mantiene el rendimiento óptimo del compresor centrífugo.

10 Si bien la invención se ha descrito con referencia a las realizaciones preferidas representadas en las figuras, se apreciará que son posibles diversas modificaciones dentro del alcance de la invención como está definida en las siguientes reivindicaciones.

15 En esta memoria descriptiva, a menos que se indique expresamente lo contrario, la palabra "o" se utiliza en el sentido de un operador que devuelve un valor verdadero cuando se cumplen una o ambas de las condiciones establecidas, a diferencia del operador " exclusivo o" que requiere solo que se cumpla una de las condiciones. La expresión "que comprende" se utiliza en el sentido de "incluido" en lugar de "que consta de".

20 Todas las enseñanzas anteriores se incorporan aquí como referencia. Ningún reconocimiento de ningún documento publicado anteriormente en este documento debe considerarse una admisión o representación de que la enseñanza del mismo era de conocimiento general común en Australia o en otro lugar en la fecha del mismo.

REIVINDICACIONES

1. Un proceso para producir gas hidrógeno comprimido, comprendiendo el proceso:

- 5 electrolizar agua para producir gas hidrógeno, y
 comprimir el gas hidrógeno en un sistema de compresión de múltiples etapas para producir gas hidrógeno
 comprimido;
 comprendiendo el sistema de compresión de múltiples etapas:
- 10 una etapa de compresión centrífuga (K102) con un extremo de alimentación (7) y un extremo de
 producto (9), y
 un sistema de reciclaje (17, V110, 19) para reciclar una parte del gas hidrógeno desde el extremo de
 producto (9) al extremo de alimentación (7) de la etapa de compresión centrífuga (K102);
- 15 en donde la alimentación de gas hidrógeno se alimenta al extremo de alimentación (7) de la etapa de
 compresión centrífuga (K102) a una temperatura y presión de alimentación predeterminadas y que tiene una
 fracción molar de agua predeterminada;
 en donde una parte del gas hidrógeno se elimina, según sea necesario, del extremo de producto (9), se reduce
 la presión en el sistema de reciclaje (V110) a la presión de alimentación predeterminada antes de cualquier
20 etapa de enfriamiento para proporcionar gas hidrógeno a presión reducida que después se recicla para formar
 al menos parte de la alimentación de gas hidrógeno a la etapa de compresión centrífuga (K102); y
 en donde el proceso comprende enfriar gas hidrógeno (E100) que comprende gas hidrógeno a presión
 reducida, de manera que la fracción molar de agua en la alimentación de gas hidrógeno sea la fracción molar
 de agua predeterminada.
- 25 2. Un proceso según la reivindicación 1, en el que el gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida
 se enfría a una temperatura dentro de aproximadamente $\pm 2^\circ$ C de la temperatura de alimentación predeterminada.
- 30 3. Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la temperatura de alimentación
 predeterminada es de aproximadamente 20 a aproximadamente 60° C.
4. Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el gas hidrógeno alimentado a la etapa
 de compresión centrífuga (K102) tiene un peso molecular aparente dentro de un intervalo de aproximadamente 2,2 a
 aproximadamente 3,5.
- 35 5. Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el peso molecular aparente del gas
 hidrógeno que comprende gas hidrógeno a presión reducida después del enfriamiento es equivalente al peso
 molecular aparente de la alimentación de gas hidrógeno.
- 40 6. Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la etapa de compresión centrífuga (K102)
 es una etapa inicial del sistema de compresión de múltiples etapas.
7. Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el sistema de compresión de múltiples
 etapas comprende una primera sección y al menos una sección adicional aguas abajo de la primera sección.
- 45 8. Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el gas hidrógeno comprimido se consume
 en al menos un proceso aguas abajo, y en el que durante los períodos en los que la electrólisis produce más gas
 hidrógeno del requerido por el proceso o procesos aguas abajo, el proceso comprende alimentar el exceso de gas
 hidrógeno comprimido al almacenamiento, opcionalmente después de una compresión adicional; y en donde durante
50 los períodos en los que el(los) proceso(s) aguas abajo requieren más gas hidrógeno del que se produce mediante la
 electrólisis, el proceso comprende retirar gas hidrógeno comprimido del almacenamiento y, después de una reducción
 adecuada de la presión, alimentar dicho gas hidrógeno desde el almacenamiento a una etapa del sistema de
 compresión de múltiples etapas.
- 55 9. Un proceso según la reivindicación 8, en el que dicho gas hidrógeno procedente del almacenamiento se alimenta a
 una etapa (K102) del sistema de compresión de múltiples etapas alimentándolo a un interenfriador aguas arriba de
 dicha etapa (K102).
10. Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el gas hidrógeno que comprende gas
 hidrógeno a presión reducida se enfría (E116) en el sistema de reciclaje (17, V110, 19).
- 60 11. Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el gas hidrógeno que comprende gas
 hidrógeno a presión reducida se enfría (E100) en la alimentación de gas hidrógeno.
12. Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el sistema de compresión de múltiples
 etapas comprende:
- 65 12. Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el sistema de compresión de múltiples
 etapas comprende:

una segunda etapa de compresión centrífuga aguas abajo de la etapa de compresión centrífuga (K102), comprendiendo dicha segunda etapa un extremo de alimentación (15) y un extremo de producto, un segundo sistema de reciclaje (23) para reciclar una parte del gas hidrógeno desde el extremo de producto hasta el extremo de alimentación (15) de la segunda etapa; en donde la alimentación de gas hidrógeno se alimenta al extremo de alimentación (15) de la segunda etapa a una temperatura y presión de alimentación predeterminadas y teniendo una fracción molar de agua predeterminada; en donde una parte del gas hidrógeno se elimina, según sea necesario, del extremo de producto de la segunda etapa, se reduce la presión en el segundo sistema de reciclaje (23) a la presión de alimentación predeterminada antes de cualquier etapa de enfriamiento para proporcionar gas hidrógeno a presión reducida. que después se recicla para formar al menos parte de la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa; y en donde el proceso comprende enfriar (E106) gas hidrógeno que comprende gas hidrógeno a presión reducida en la alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa, de manera que la fracción molar de agua en dicha alimentación de gas hidrógeno a la segunda etapa sea la fracción molar de agua predeterminada.

13. Un aparato para producir gas hidrógeno comprimido, comprendiendo el aparato:

una pluralidad de electrolizadores dispuestos en paralelo para electrolizar agua para proporcionar gas hidrógeno; un sistema de generación de electricidad para generar electricidad para alimentar la pluralidad de electrolizadores, estando el sistema de generación de electricidad en comunicación eléctricamente conductora con la pluralidad de electrolizadores; un sistema de compresión de múltiples etapas para comprimir el gas hidrógeno para proporcionar un gas hidrógeno comprimido, comprendiendo el sistema de compresión de múltiples etapas:

un extremo de entrada (1), un extremo de salida y una etapa de compresión centrífuga (K102) que tiene un extremo de alimentación (7) y un extremo de producto (9), estando el extremo de entrada en comunicación de flujo de fluido con la pluralidad de electrolizadores a través de un cabezal de alimentación. (1, 3); y un sistema de reciclaje (17, V110, 19) en comunicación de flujo de fluido con el extremo de producto (9) y el extremo de alimentación (7) de la etapa de compresión centrífuga (K102), comprendiendo el sistema de reciclaje (17, 19): una válvula (V110) para reducir la presión del gas hidrógeno reciclado a una presión de alimentación predeterminada antes de cualquier etapa de enfriamiento para proporcionar gas hidrógeno a presión reducida;

un enfriador (E116) para enfriar gas hidrógeno, que comprende el gas hidrógeno a presión reducida en el sistema de reciclaje (17, V110, 19) y/o en el cabezal de alimentación (1), a la etapa de compresión centrífuga (K102).

14. Un aparato según la reivindicación 13, en el que el sistema de compresión de múltiples etapas comprende:

una segunda etapa de compresión centrífuga aguas abajo de la primera etapa de compresión centrífuga (K102), comprendiendo la segunda etapa un extremo de alimentación (15) y un extremo de producto y estando el extremo de alimentación (15) en comunicación de flujo de fluido con el extremo de producto (9) de la primera etapa de compresión centrífuga (K102) a través de un cabezal de alimentación (10, 11); y un segundo sistema de reciclaje (23) en comunicación de flujo de fluido con el extremo de producto y el extremo de alimentación (15) de la segunda etapa, comprendiendo el segundo sistema de reciclaje (23): una válvula para reducir la presión del gas hidrógeno reciclado a una presión de alimentación predeterminada para la segunda etapa antes de cualquier etapa de enfriamiento para proporcionar gas hidrógeno a presión reducida; un segundo enfriador (E106) para enfriar gas hidrógeno que comprende el gas hidrógeno a presión reducida en el cabezal de alimentación (10) a la segunda etapa de compresión centrífuga.

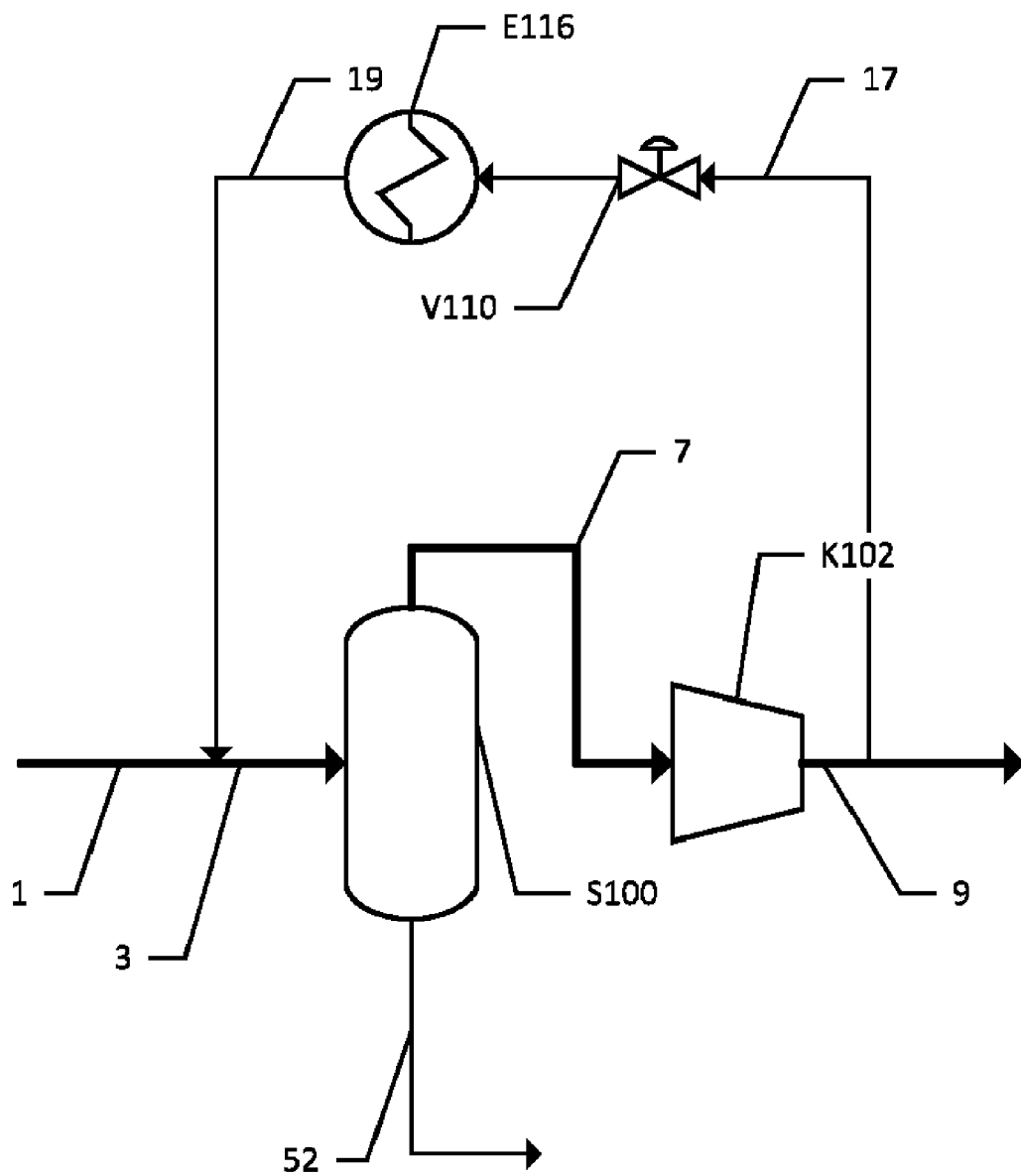


Fig. 1

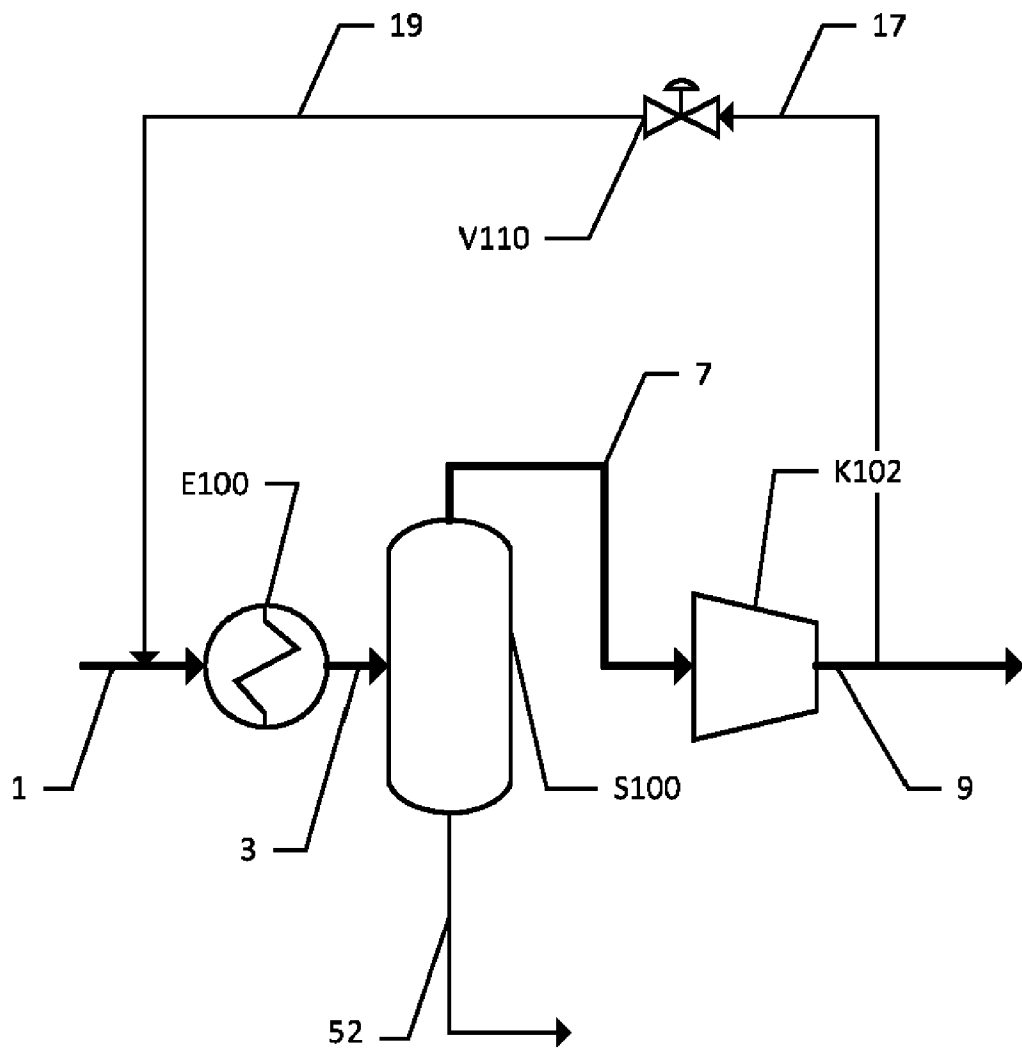


Fig. 2

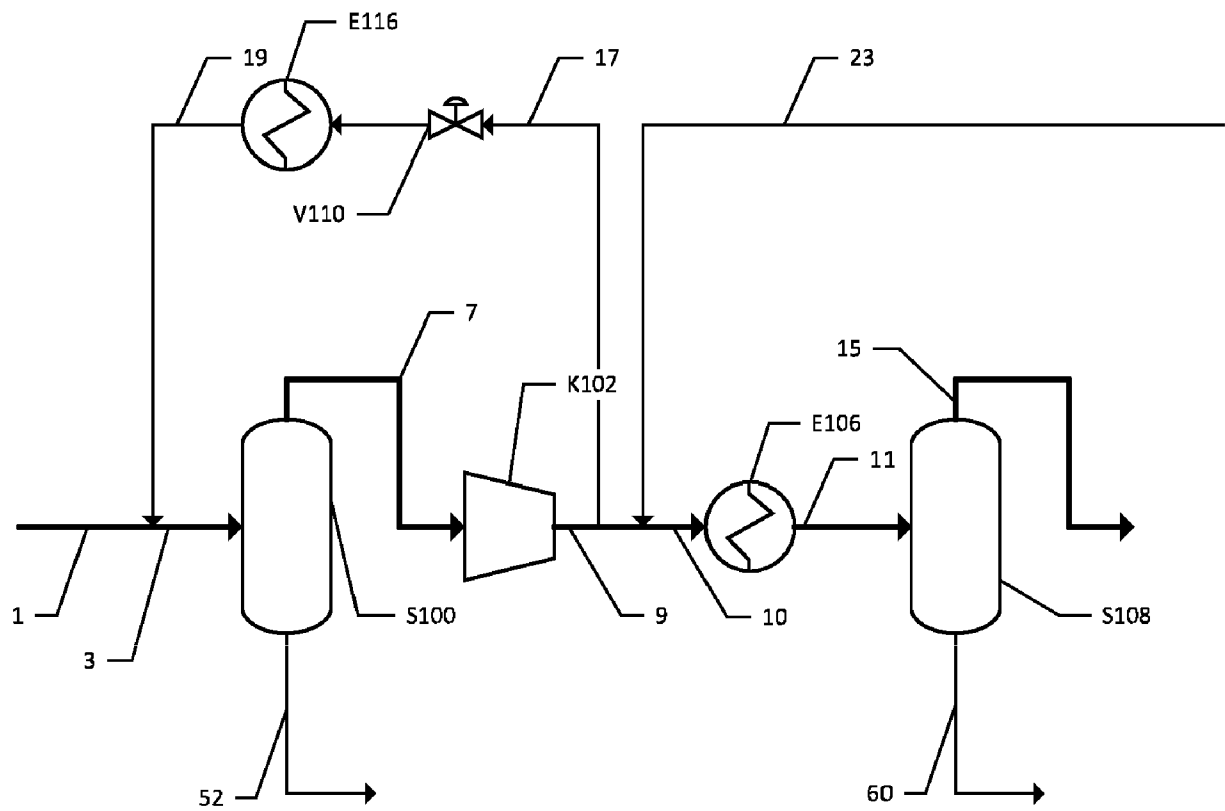


Fig. 3