

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 029 871**

51 Int. Cl.:

F04D 17/12 (2006.01)

F04D 25/16 (2006.01)

F04D 27/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.06.2022** E 22178050 (5)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.03.2025** EP 4105491

54 Título: **Procedimiento y aparato para comprimir una alimentación de gas con un caudal variable**

30 Prioridad:

14.06.2021 US 202117346856

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

25.06.2025

73 Titular/es:

**AIR PRODUCTS AND CHEMICALS, INC.
(100.00%)
1940 Air Products Boulevard
Allentown, PA 18106-5500, US**

72 Inventor/es:

**ESPIE, DAVID M;
HENZLER, GREGORY W;
ZHU, ZHONG-XIANG (JOHN) y
WILSON, GRAEME RICHARD**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 3 029 871 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

Procedimiento y aparato para comprimir una alimentación de gas con un caudal variable

5 La presente invención se refiere a formas de mejorar la eficiencia energética y la estabilidad en un sistema de compresión de múltiples etapas que comprime una alimentación de gas con un caudal variable. La presente invención se refiere particularmente a formas de ahorrar electricidad y evitar perturbaciones en el flujo de gas comprimido neto del sistema que, de otro modo, serían causadas por la activación de los controles antibombeo.

10 Los compresores centrífugos son un tipo de compresor dinámico, en donde el gas se comprime mediante la acción mecánica de álabes o impulsores giratorios que imparten velocidad al gas. El gas normalmente entra en el centro de los impulsores y es impulsado hacia los bordes radiales bajo un movimiento giratorio para suministrar gases a alta velocidad que impactan contra la carcasa. La velocidad del gas se convierte en una presión estática para suministrar gases a alta presión. Este tipo de compresores son particularmente
15 adecuados para el manejo de grandes volúmenes de gases a menores costes.

Para comprimir adecuadamente los gases de proceso en un compresor centrífugo, normalmente se utilizan sellos de gas seco (o "DGS", por sus siglas en inglés) para minimizar cualquier fuga de gas. Estos sellados de gas seco contienen dos caras o anillos de sellado opuestos que se separan durante el funcionamiento normal
20 del compresor centrífugo para comprimir gas.

Normalmente, el gas para compresión se produce en su totalidad utilizando electricidad generada a partir de una fuente de energía convencional, como generador(es) que funcionan con gasolina, diésel o hidrógeno en el sitio, células de combustible o tomada de una red eléctrica local o nacional. En tales casos, los compresores
25 centrífugos funcionan a su máxima capacidad para producir el mayor rendimiento posible de gas producto comprimido neto. Por tanto, los motores que accionan los impulsores de dichos compresores centrífugos funcionan normalmente a una velocidad fija (por ejemplo, máxima). En estos casos, el flujo de la alimentación de gas al sistema de compresión siempre se mantiene en un flujo máximo sustancialmente constante para maximizar la salida de gas comprimido neto. El documento DE4122631A describe un sistema de compresión
30 comprendiendo un extremo de alimentación, una pluralidad de compresores centrífugos en paralelo y un extremo de producto. Cada compresor centrífugo comprende una entrada, una salida y un sistema de reciclaje local con control antibombeo para reciclar gas de la salida a la entrada.

El documento US7010393A describe un sistema de bombeo comprendiendo una entrada y una salida y dos
35 bombas en paralelo accionadas por turbinas de vapor que proporcionan una velocidad de rotación variable para las bombas, junto con un sistema de reciclaje principal que hace circular el fluido de la salida a la entrada cuando ambas bombas se acercan a su límite de bombeo.

El documento US5743715A hace referencia a un proceso de equilibrado de carga entre compresores para
40 garantizar que las líneas de control de bombeo de todos los compresores de un sistema se alcancen simultáneamente. Este documento no hace referencia a cómo comprimir gas que tiene un caudal variable, tal como el que se produce cuando el gas se produce utilizando una fuente de energía renovable.

Los presentes inventores no conocen actualmente ninguna técnica anterior que aborde los problemas
45 asociados con la compresión de una alimentación de gas que tenga un caudal variable en un amplio intervalo de flujo.

En particular, la invención se refiere a la compresión de una alimentación de gas donde el flujo puede variar en un amplio intervalo (por ejemplo, flujo de 0 a 100 %) en escalas de tiempo relativamente cortas (por ejemplo, 1
50 día), tal como, por ejemplo, el gas producido utilizando electricidad generada al menos en parte por una o más fuentes de energía renovables (por ejemplo, solar y/o eólica).

Según un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un proceso de funcionamiento de un sistema
55 de compresión de múltiples etapas que comprime una alimentación de gas que tiene un caudal variable,

comprendiendo dicho sistema de compresión de múltiples etapas un extremo de alimentación, una pluralidad (N) de compresores centrífugos en paralelo, un extremo de producto y un sistema de reciclaje principal para reciclar gas a través de la pluralidad (N) de compresores centrífugos, en donde cada
60 compresor centrífugo comprende una entrada, una salida y un sistema de reciclaje local con control antibombeo para reciclar gas de la salida a la entrada, comprendiendo dicho proceso:

(a) durante los períodos en que la alimentación de gas es recibida por el sistema de compresión de
65 múltiples etapas con un flujo igual a la capacidad máxima total de un primer número (n) de compresores centrífugos que producen gas comprimido neto, hacer funcionar dicho primer número (n) de compresores centrífugos a plena carga para comprimir la alimentación de gas;

- 5 (b) durante los períodos en que la alimentación de gas es recibida por el sistema de compresión de múltiples etapas con un flujo en un intervalo que va de menos de la capacidad máxima total de dicho primer número (n) de compresores centrífugos a la capacidad de reducción total de dicho primer número (n) de compresores centrífugos, hacer funcionar dicho primer número (n) de compresores centrífugos a una carga mínima para comprimir la alimentación de gas, siendo dicha carga mínima determinada en base al flujo de la alimentación de gas;
- 10 (c) durante los períodos en que la alimentación de gas es recibida por el sistema de compresión de múltiples etapas con un flujo en un intervalo que va de menos de la capacidad de reducción total del primer número (n) de compresores centrífugos a más de la capacidad máxima total para un segundo número (n-1) de compresores centrífugos que producen gas comprimido neto, reciclar el gas comprimido utilizando el sistema de reciclaje principal según sea necesario para mantener la carga de dicho primer número (n) de compresores centrífugos por encima del punto donde se activan los controles antibombeo; y
- 15 (d) durante los períodos en que la alimentación de gas es recibida por el sistema de compresión de múltiples etapas con un flujo igual a la capacidad máxima total para dicho segundo número (n-1) de compresores centrífugos, descargar un compresor centrífugo para poner dicho compresor en un modo de baja potencia o modo de apagado en donde dicho compresor no produce gas comprimido neto, mientras que simultáneamente carga los compresores centrífugos restantes a su capacidad máxima,
- 20 en donde el proceso es reversible en cualquier punto, y en donde n es un número entero igual o inferior a N.
- 25 En el siguiente análisis de realizaciones de la presente invención, las presiones dadas son presiones absolutas a menos que se indique lo contrario.
- 30 La invención tiene una aplicación particular a procesos donde el flujo de gas variable que se alimenta al sistema de compresión de múltiples etapas es el resultado del gas que se produce utilizando electricidad generada al menos en parte a partir de al menos una fuente de energía renovable. Preferiblemente, tal gas puede ser gas hidrógeno producido por la electrólisis del agua.
- 35 Un inconveniente del uso de energía renovable para producir gas para compresión en los compresores centrífugos es la variación inherente en la disponibilidad de la fuente de energía, que puede abarcar desde plena potencia hasta ninguna potencia en el transcurso de un solo día. Aunque se pueden utilizar otras fuentes de energía (por ejemplo, energía de batería o fuentes de energía no renovables) para complementar la energía cuando la disponibilidad es baja, es probable que todavía no haya suficiente para producir el flujo máximo de gas para compresión requerida para hacer funcionar por completo el o cada compresor centrífugo.
- 40 El flujo de gas para compresión puede variar ampliamente desde el flujo máximo hasta un flujo muy bajo, o ninguno en absoluto, a lo largo de un solo día, por ejemplo. El(los) compresor(es) centrífugo(s) pueden tolerar alguna variación en el flujo de gas para compresión, pero no hasta el punto que requeriría apagarlos periódicamente.
- 45 Los compresores centrífugos suelen estar equipados con un sistema de reciclaje local que tiene controles antibombeo (por ejemplo, una válvula antibombeo controlada por un sistema de control). Este sistema de reciclaje local protege el compresor centrífugo del riesgo de daños operativos causados por el bombeo del compresor. El bombeo ocurre cuando el flujo de la alimentación de gas se reduce más allá de un punto en donde el compresor puede mantener la operación a una velocidad estable del impulsor. El bombeo puede provocar un flujo inverso de gas caliente a través del compresor y/o fuertes pulsaciones de presión en toda la máquina, lo que posiblemente provoque graves vibraciones y daños mecánicos. Por lo general, los controles antibombeo están diseñados para activarse justo antes de que el compresor alcance el punto de bombeo. Cuando se activan, estos controles reciclan rápidamente el gas a través del compresor centrífugo, por ejemplo, abriendo la válvula de reciclaje local, para aumentar la carga del compresor y evitar el bombeo. Sin embargo,
- 50 esto a menudo es a expensas de la estabilidad y la controlabilidad del proceso y/o la planta en general.
- 55 Los controles antibombeo del sistema de reciclaje local pueden activarse con un flujo de aproximadamente 20 %, preferiblemente aproximadamente 10 % por encima del flujo al que bombeo el compresor centrífugo (a veces denominado "línea de bombeo" en la técnica). Cuando el flujo de la alimentación de gas al sistema de compresión cae por debajo de este punto de activación de control antibombeo, los controles antibombeo del compresor actúan para proteger el compresor. Esta acción protectora causa graves alteraciones del proceso en el equipo adyacente y, en los casos más extremos, puede provocar la desconexión general de la instalación.
- 60 Por otra parte, la activación de los controles antibombeo interrumpe el flujo de gas comprimido neto al introducir grandes cantidades de gas reciclado en el sistema en un corto espacio de tiempo. Esto no es deseable, ya que puede interrumpir el flujo estable de gas comprimido neto a la salida del sistema. La expresión "gas hidrógeno
- 65

comprimido neto" significa la cantidad total de gas comprimido que se produce menos la cantidad total de gas que se recicla.

5 Cuando un compresor centrífugo se apaga o se detiene, la velocidad del rotor o del impulsor se reduce hasta que las caras de sellado opuestas de los sellados de gas seco (*Dry Gas Seals*, DGS) ya no se separan y entran en contacto entre sí. Por tanto, apagar y encender el(los) compresor(es) centrífugo(s) con frecuencia acelerará el desgaste del DGS. Esto disminuye la vida útil del (de los) compresor(es) centrífugo(s), por lo que se requiere un reemplazo o una reparación con mayor frecuencia, lo que puede aumentar los costes. El desgaste del DGS también se produce al reiniciar o encender los compresores centrífugos. Un compresor centrífugo está expuesto al riesgo de daños cada vez que se pone en marcha o se apaga. De hecho, existe una mayor probabilidad de tener problemas con el compresor durante el arranque que durante el apagado. En este sentido, normalmente hay velocidades críticas que deben evitarse. De manera adicional, si los compresores se apagan durante un período de tiempo prolongado, pueden ser más susceptibles a la corrosión por picaduras y otros tipos de corrosión que pueden conducir al agrietamiento por corrosión bajo tensión y eventualmente al fallo de un compresor/impulsor.

20 Los problemas anteriores no se aplican a los compresores centrífugos que comprimen gas que tiene un caudal de gas que es sustancialmente constante e invariable y se garantiza que se mantendrá sustancialmente por encima de la capacidad de reducción máxima o el punto de control antibombeo de los compresores centrífugos. Por ejemplo, estos problemas no están asociados con el gas producido completamente utilizando energía de redes de energía eléctrica no renovables, ya que el flujo de la alimentación de gas está en un flujo constante sustancialmente máximo, por lo que los compresores rara vez se apagan.

25 Por lo tanto, los presentes inventores han identificado que existe un deseo en la técnica de proporcionar una forma mejorada de hacer funcionar el(los) compresor(es) centrífugo(s) que sean capaces de comprimir una alimentación de gas con un caudal variable en un amplio intervalo, tal como el gas producido utilizando electricidad generada al menos en parte por fuentes de energía renovables.

30 Los presentes inventores han ideado un proceso como se describe en esta invención para hacer funcionar un sistema de compresión de múltiples etapas que reduce el número de paradas del (de los) compresor(es) centrífugo(s) y, por tanto, aumenta la vida útil del (de los) sellado(s) de gas seco y la fiabilidad del (de los) compresor(es) centrífugo(s). De manera alternativa o adicional, los inventores han ideado un proceso mediante el cual se puede ahorrar electricidad, por ejemplo, para que pueda utilizarse en otras partes del proceso, como para producir gas de alimentación y/o como parte de un proceso aguas abajo para consumir gas comprimido. De manera alternativa o adicional, la presente invención puede permitir la compresión de una alimentación de gas con un caudal variable en un amplio intervalo, sin requerir paradas innecesarias de los compresores y/o el reciclaje excesivo de gas comprimido y/o el uso de cantidades excesivas de electricidad y/o una perturbación en el flujo de gas comprimido neto como resultado de la activación del control antibombeo.

40 El sistema de compresión de múltiples etapas está destinado a comprimir una alimentación de gas que tiene un caudal variable, preferiblemente como preparación para su consumo en al menos un proceso aguas abajo.

45 El gas para compresión se produce típicamente utilizando electricidad generada al menos en parte por al menos una fuente de energía renovable, y puede ser cualquier gas adecuado. Sin embargo, el proceso tiene una aplicación particular cuando el gas para compresión es gas hidrógeno, por ejemplo, gas hidrógeno producido por la electrólisis del agua. Esto puede llevarse a cabo mediante una pluralidad de electrolizadores.

50 En algunas realizaciones, el proceso comprende producir gas hidrógeno mediante electrólisis del agua. De manera adicional o alternativa, el proceso puede comprender alimentar gas hidrógeno comprimido a al menos un proceso aguas abajo para el consumo en dicho(s) proceso(s) aguas abajo.

Por tanto, en algunas realizaciones preferidas de la invención, el proceso comprende:

55 producir gas hidrógeno por electrólisis del agua;
comprimir dicho gas hidrógeno en el sistema de compresión de múltiples etapas que funciona según la presente invención para producir gas hidrógeno comprimido; y

60 alimentar dicho gas hidrógeno comprimido a al menos un proceso aguas abajo para su consumo en dicho(s) proceso(s) aguas abajo.

En algunas realizaciones, al menos parte del gas hidrógeno comprimido se utiliza para producir amoníaco y/o metanol en el(los) proceso(s) aguas abajo, preferiblemente para producir amoníaco.

65 La compresión centrífuga es particularmente adecuada para comprimir grandes volúmenes de gas hidrógeno a un coste menor y, por tanto, la compresión de gas hidrógeno es particularmente preferida y ventajosa para el proceso de la invención. Por otra parte, el gas hidrógeno producido por electrólisis es aún más adecuado

para la compresión centrífuga debido a que está "húmedo" y tiene una densidad más alta, lo que hace que la compresión centrífuga de dicho gas sea más eficiente que la compresión de gas hidrógeno que no se ha producido por electrólisis.

5 Funcionamiento de compresores centrífugos en un sistema de compresión de múltiples etapas

La presente invención se refiere a un sistema de compresión de múltiples etapas comprendiendo un extremo de alimentación, una pluralidad (N) de compresores centrífugos en paralelo, un extremo de producto y un sistema de reciclaje principal para reciclar gas a través de la pluralidad (N) de compresores centrífugos (o a través del número de compresores centrífugos que producen gas comprimido neto si uno o más de la pluralidad (N) de compresores centrífugos está en un modo de baja potencia o modo de apagado).

El sistema de reciclaje principal está destinado a reciclar gas a través de la pluralidad de (N) compresores centrífugos. Por lo tanto, el sistema de reciclaje principal recicla el gas para todos los compresores centrífugos simultáneamente, en lugar de individualmente. Por lo tanto, el sistema de reciclaje principal puede recibir el gas descargado de los extremos de producto de los compresores centrífugos y, después de una disminución de presión adecuada, alimentar este gas a presión reducida a los extremos de alimentación de los compresores centrífugos. El sistema de reciclaje principal puede recibir gas comprimido de cada uno de los compresores centrífugos antes o después de que se mezcle en una sola línea de cabezal. Después de una disminución de presión adecuada, el gas a presión reducida puede separarse de un cabezal y alimentarse a cada uno de los compresores centrífugos. Esto permite que todos los N compresores funcionen con la misma curva de rendimiento, lo que simplifica en gran medida el reparto de la carga entre las máquinas. El sistema de reciclaje principal normalmente funciona junto con el control de velocidad de los compresores para modular y mantener una presión de succión constante.

El uso de un sistema de reciclaje principal en el contexto de la compresión de gas hidrógeno húmedo producido por electrólisis es particularmente ventajoso. El gas hidrógeno producido por electrólisis del agua típicamente se satura con agua y, durante la compresión, el contenido de agua del gas hidrógeno puede cambiar, por ejemplo, debido a las etapas de enfriamiento en el proceso. A medida que cambia el contenido de agua, también lo hace el peso molecular aparente del gas hidrógeno, esto, a su vez, puede cambiar la relación de presión de descarga en el extremo del producto de un compresor individual. Por lo tanto, el uso de un sistema de reciclaje principal permite adicionalmente que el peso molecular aparente del gas de hidrógeno húmedo en toda la pluralidad de (N) compresores se mantenga sustancialmente constante.

N es un número entero que indica el número total de compresores centrífugos dispuestos en paralelo en el sistema de compresión de múltiples etapas con el que se va a llevar a cabo el proceso de la invención, y este número puede depender de los requisitos del proceso (por ejemplo, la escala del proceso y el(los) proceso(s) aguas abajo).

Cada compresor centrífugo comprende una entrada, una salida y un sistema de reciclaje local con control antibombeo. El sistema de reciclaje local está destinado a reciclar gas de la salida a la entrada del (de los) compresor(es) centrífugo(s) con el(los) que está asociado. Los sistemas de reciclaje locales ya son conocidos en la técnica y se utilizan principalmente para evitar el bombeo del compresor o durante la descarga de los compresores. Cuando está en uso, el sistema de reciclaje local recibe gas de la salida del compresor centrífugo y, después de una disminución de presión adecuada, alimenta gas a presión reducida a la entrada del compresor centrífugo. En algunas realizaciones de esta invención, el sistema de reciclaje puede estar asociado con más de un compresor centrífugo, tal como más de un compresor centrífugo dispuesto en serie, tal como a través de múltiples etapas de compresión.

La presión del gas que se recicla puede reducirse en una medida adecuada utilizando un medio de disminución de presión tal como una válvula. En este sentido, una medida apropiada sería la presión de entrada del compresor al que se alimenta el gas.

En algunas realizaciones de esta invención, el sistema de compresión de múltiples etapas comprende compresores centrífugos dispuestos en serie como parte de múltiples etapas de compresión, y un sistema de reciclaje local recicla el gas de la salida de una etapa intermedia o final a la entrada de la etapa inicial. Es decir, cuando está en uso, el sistema de reciclaje local recibió gas de la salida de una etapa de compresión aguas abajo y, después de una disminución de presión adecuada, alimenta gas a presión reducida a la entrada de una etapa de compresión aguas arriba.

Esto permite reducir el número de sistemas de reciclaje locales y las válvulas asociadas, simplificando así el diseño y el funcionamiento del sistema de compresión y reduciendo los costes. Sin embargo, en tales realizaciones, se apreciará que no se puede alimentar gas desde un sistema de almacenamiento de gas a un punto entre la etapa aguas abajo y aguas arriba.

Como se explicó anteriormente, el sistema de reciclaje local se activa rápidamente cuando el flujo al compresor alcanza un punto de control antibombeo, por ejemplo, un flujo de aproximadamente el 10 % por encima de la línea de bombeo.

5 En el proceso de la presente invención, el sistema de compresión de múltiples etapas funciona de manera que responda a los cambios en el flujo de la alimentación de gas en la entrada al sistema de compresión de múltiples etapas. El flujo de esta alimentación de gas es variable y ciertos modos de funcionamiento de los compresores centrífugos como se describe en esta invención se activarán en respuesta a ciertos cambios en este flujo de alimentación de gas. Se producen cambios operativos dentro del sistema para adaptarse al cambio en el flujo
10 de la alimentación de gas.

La presente invención en general se basa en una serie de acciones que se llevan a cabo en respuesta a dichos cambios en el flujo de la alimentación de gas, siendo dichas acciones completamente reversibles en cualquier punto del proceso dependiendo de los cambios en el flujo de la alimentación de gas, tal como cuando se invierte
15 el cambio en el flujo de la alimentación de gas.

Durante los períodos especificados en (a) - flujo máximo

20 Durante los períodos donde la alimentación de gas es recibida por el sistema de compresión de múltiples etapas con un flujo igual a la capacidad máxima total de un primer número (n) de compresores centrífugos que producen gas comprimido neto, el proceso comprende hacer funcionar dicho primer número (n) de compresores centrífugos a plena carga para comprimir la alimentación de gas.

25 El primer número (n) es el número de compresores centrífugos en el sistema de compresión de múltiples etapas que están funcionando para producir gas comprimido neto, es decir, no apagados, desconectados o en modo de baja potencia. Por tanto, en el contexto de la presente invención, (n) es un número entero (1, 2, 3,... etc.) igual o inferior a (N), el número total de compresores centrífugos para llevar a cabo el proceso. En el contexto de la invención, el primer número (n) no puede ser igual a cero, pero aún se puede desear, en algunos casos, apagar todos los compresores centrífugos o ponerlos en modo de inactividad (véase a continuación).
30

En otras palabras, cuando el flujo de la alimentación de gas coincide con la capacidad máxima total del primer número (n) de compresores centrífugos, estos compresores funcionan a la capacidad máxima para producir la mayor cantidad posible de gas comprimido neto.

35 El término "total" se usa en esta invención en el sentido de la suma de las capacidades máximas de dichos (n) compresores centrífugos. La expresión "capacidad máxima" se refiere al 100 % de la capacidad de un compresor, es decir, hay una cantidad máxima del flujo de alimentación de gas que está siendo comprimido por el compresor al 100 % de su potencia máxima y velocidad del rotor (es decir, a plena carga). La "carga" de un compresor centrífugo se refiere al flujo total de gas comprimido que se produce (incluido cualquier flujo de
40 gas que esté siendo reciclado por el sistema de reciclaje principal). La carga de un compresor centrífugo puede controlarse cambiando la velocidad del rotor utilizando VFD adecuados o ajustando los álabes de guía de entrada, por ejemplo.

45 Durante los períodos especificados en (b) - flujo reducido (reducción)

Durante los períodos donde la alimentación de gas es recibida por el sistema de compresión de múltiples etapas con un flujo en un intervalo de menos de la capacidad máxima total de dicho primer número (n) de compresores centrífugos a la capacidad de reducción total de dicho primer número (n) de compresores centrífugos, el proceso comprende hacer funcionar dicho primer número (n) de compresores centrífugos a una carga mínima para comprimir la alimentación de gas, siendo dicha carga mínima determinada en base al flujo de la
50 alimentación de gas.

Además de hacer funcionar los compresores centrífugos a su capacidad máxima, el flujo de gas que pasa a través de los compresores centrífugos puede variar de varias maneras. Esto se puede hacer mediante un
55 cambio en la potencia y la velocidad del rotor de los impulsores o ajustando los álabes de guía de entrada, por ejemplo. Sin embargo, el flujo a través de un compresor centrífugo sólo puede reducirse hasta cierto punto antes de que se activen los controles antibombeo. Este proceso se conoce en la técnica como "reducción" del compresor. La capacidad (o flujo) a la que se reduce un compresor centrífugo en la medida de lo posible, es decir, comprimir un flujo mínimo de gas sin activar ningún control antibombeo, se conoce como su capacidad de reducción (o reducción máxima). Este punto normalmente está sustancialmente en o justo por encima del
60 punto de control antibombeo.

Por tanto, la capacidad de reducción de cada compresor centrífugo se define en esta invención como el flujo mínimo de gas que puede ser comprimido por el compresor centrífugo sin la activación de su control
65 antibombeo.

En la reducción, la potencia del compresor es inferior al 100 % pero al mismo tiempo de aproximadamente el 60 % o más, preferiblemente de aproximadamente el 70 % o más, por ejemplo, del 70 % al 80 %, en relación con la potencia máxima (100 %). Esta disminución en la potencia del compresor conduce a una disminución en la velocidad del rotor y, por tanto, hay un flujo reducido asociado de gas comprimido neto en el extremo de producto del compresor. Para una disminución en el flujo de gas (con una presión de descarga constante) en el sistema de compresión de múltiples etapas, esto normalmente requerirá una disminución proporcional en la potencia del compresor.

La expresión "capacidad de reducción total" se utiliza en esta invención para hacer referencia a la suma de las capacidades de reducción del primer número (n) de compresores centrífugos, es decir, la capacidad para comprimir un flujo de gas en el estado donde todos los compresores centrífugos se reducen en la medida de lo posible (en la reducción máxima).

La carga mínima se basa en el flujo de la alimentación de gas, por lo que la carga mínima se refiere a la potencia mínima y/o la velocidad del rotor del (de los) compresor(es) que es adecuada para comprimir todo el flujo de la alimentación de gas para producir la presión de descarga requerida. Por ejemplo, si el flujo de la alimentación de gas está al 85 % del flujo total, la carga mínima total a través de los compresores centrífugos será del 85 % del flujo total durante estos períodos.

Preferiblemente, durante estos períodos, el primer número (n) de compresores centrífugos comparte la carga sustancialmente por igual, de modo que la carga en todos los compresores es la misma, es decir, la carga se equilibra en todos los compresores centrífugos, de modo que la distancia desde la línea de bombeo es sustancialmente igual para todos los compresores. En la práctica, puede haber pequeñas fluctuaciones inherentes en la carga entre los compresores, pero en este contexto, la carga a través de todos los compresores operativos será lo más igual posible según lo permita el aparato.

Durante los períodos especificados en (c) - flujo más reducido (reciclaje)

Durante los períodos donde la alimentación de gas es recibida por el sistema de compresión de múltiples etapas con un flujo en un intervalo de menos de la capacidad de reducción total del primer número (n) de compresores centrífugos a más de la capacidad máxima total para un segundo número (n-1) de compresores centrífugos que producen gas comprimido neto, el proceso comprende reciclar gas comprimido utilizando el sistema de reciclaje principal según sea necesario para mantener la carga de dicho primer número (n) de compresores centrífugos por encima del punto donde se activan los controles antibombeo. Por tanto, en otras palabras, el sistema de reciclaje principal recicla gas a través del sistema a medida que el caudal de la alimentación de gas disminuye aún más (en comparación con los períodos especificados en (b)) por debajo del punto donde los controles antibombeo dentro de los compresores centrífugos se activarían de otro modo. Esto tiene el efecto de mantener la carga del primer número (n) por encima del punto de control antibombeo de los compresores centrífugos a pesar de que el flujo de la alimentación de gas disminuye aún más. Por lo general, los (n) compresores centrífugos siempre funcionan en la reducción máxima antes de que se utilice cualquier reciclaje para ahorrar la mayor cantidad de electricidad posible, en la medida en que lo permitan las preocupaciones de seguridad.

Esto permite que el sistema de compresión de múltiples etapas funcione de una manera en la que no se activan los controles antibombeo del compresor. Como se mencionó anteriormente, la activación de los controles antibombeo interrumpe el flujo de gas comprimido neto a la salida del sistema de compresión, lo que, a su vez, puede ser perjudicial para otros procesos (por ejemplo, un proceso aguas abajo que recibe gas comprimido para consumo). Por lo tanto, la presente invención permite un flujo de salida más estable de gas comprimido y/o un funcionamiento más fiable del compresor al evitar daños en los compresores.

El funcionamiento del primer número de (n) compresores centrífugos como se describió anteriormente sólo se lleva a cabo hasta que el flujo de la alimentación de gas al sistema de compresión de múltiples etapas alcanza un punto donde el caudal coincide con la capacidad máxima para (n-1) compresores centrífugos (es decir, un compresor menos que los que están en funcionamiento actualmente produciendo gas comprimido neto).

Durante los períodos especificados en (d) - optimización para (n-1) compresores

A medida que la alimentación de gas disminuye aún más, aumenta la cantidad de reciclaje requerida por el sistema de reciclaje principal (para mantener la carga del primer número (n) de compresores centrífugos por encima del punto donde se activan los controles antibombeo).

La compresión del gas reciclado desperdicia electricidad y, por lo tanto, en general es deseable minimizar la cantidad de gas que es reciclado por el sistema de reciclaje principal tanto como sea posible. De este modo, se prefiere que durante los períodos especificados en (c), la cantidad de reciclaje de gas comprimido se mantenga en una cantidad mínima para ahorrar electricidad. En la práctica, las preocupaciones de seguridad y el riesgo operativo pueden requerir que se utilice un poco más de reciclaje cuando sea necesario, por encima

de la cantidad mínima posible.

5 Por tanto, los presentes inventores se han dado cuenta de que, en un sistema de compresión de múltiples etapas comprendiendo una pluralidad de compresores centrífugos, es posible optimizar las cargas de los compresores centrífugos y minimizar la cantidad de reciclaje. Esto se puede hacer apagando los compresores dinámica y/o secuencialmente o poniéndolos en un modo de baja potencia (a veces denominado en esta invención como "inactivo") mientras se utilizan simultáneamente los compresores restantes con una carga más alta con menos (o sin) reciclaje del sistema de reciclaje principal. Durante los períodos donde la alimentación de gas es recibida por el sistema de compresión de múltiples etapas con un flujo igual a la capacidad máxima total para dicho segundo número (n-1) de compresores centrífugos, el proceso comprende descargar un compresor centrífugo para poner dicho compresor en un modo de baja potencia o modo de parada en donde dicho compresor no produce gas comprimido neto, mientras que simultáneamente carga los compresores centrífugos restantes a su capacidad máxima.

15 Por lo tanto, esto permite que la alimentación de gas se comprima utilizando menos compresores centrífugos con un reciclaje de gas escaso o nulo por parte del sistema de reciclaje principal, ahorrando así electricidad y haciendo funcionar el sistema de una manera más eficiente.

20 Aunque en teoría sería posible reducir inmediatamente el reciclaje por el sistema de reciclaje principal a cero con los compresores restantes, en la práctica el cambio sería idealmente más gradual. Por ejemplo, a medida que el compresor centrífugo se descarga y la carga de los compresores restantes se eleva a la capacidad máxima, el sistema de reciclaje principal puede disminuir gradualmente el flujo de gas reciclado a través del sistema para garantizar una transición más suave durante el reequilibrio de las cargas entre los compresores centrífugos. Esto también ayudaría a mantener una salida estable de gas comprimido neto del sistema y evitaría de manera más segura la activación inadvertida de cualquier control antibombeo.

25 Por lo tanto, esta invención puede permitir el uso más eficiente de la electricidad disponible, ya que poner algunos compresores centrífugos en modo de baja potencia o apagarlos "libera" la electricidad disponible que a continuación se puede suministrar a otras partes del proceso, tales como la producción de gas (por ejemplo, electrolizadores para producir gas hidrógeno), comprimir gas (por ejemplo, suministro de electricidad para hacer funcionar compresores centrífugos) o energía para procesos aguas abajo), por ejemplo. Por lo tanto, esta invención es particularmente útil en el contexto de las fuentes de energía renovables, donde es importante ahorrar la energía disponible.

30 El término "descarga" cuando se utiliza en el contexto de la presente invención comprende preferiblemente primero disminuir el flujo de gas comprimido neto a través de dicho compresor centrífugo a cero utilizando el sistema de reciclaje local y segundo disminuir la carga de dicho compresor centrífugo. Es decir, el flujo de gas comprimido neto puede disminuirse aumentando la cantidad de gas que se recicla a través de dicho compresor centrífugo por el sistema de reciclaje local hasta que todo el gas fresco que entra en la entrada se reemplace con gas reciclado. Esto permite ventajosamente que el flujo de gas comprimido neto a través del sistema no se vea afectado sustancialmente por el proceso de disminución de la carga del compresor centrífugo para ponerlo en modo de baja potencia (inactivación) o modo de apagado y, por tanto, contribuye al funcionamiento estable del gas comprimido neto a través del sistema.

45 El compresor centrífugo se puede descargar en un estado de apagado, apagándolo o, alternativamente, poniéndolo en un modo de baja potencia (véase más adelante).

50 Se prefiere poner los compresores en modo de baja potencia en lugar de apagarlos por completo, ya que esto reduce el número de paradas y/o reinicios y evita así el desgaste excesivo de los sellados de gas seco (DGS) incorporados dentro de los compresores centrífugos. De manera alternativa o adicional, esto también permite que el proceso reaccione más rápidamente a una inversión en el flujo de la alimentación de gas, ya que el tiempo que lleva sacar un compresor del modo de baja potencia es menor de lo que sería encenderlo después de un apagado completo.

55 También se apreciará que el proceso también se puede llevar a cabo repetidamente en un bucle. Es decir, después de los períodos especificados en (d), una vez que se haya apagado un compresor, el primer número (n) de compresores que producen gas comprimido neto se reducirá en 1. De esta manera, las condiciones para los períodos especificados en (d) cambiarán con las especificadas en (a) y, a continuación, el proceso puede repetirse, por ejemplo, si el flujo de la alimentación de gas disminuye aún más, entonces los períodos especificados en (b) y a continuación en (c) y a continuación en (d) nuevamente pueden aplicarse para el nuevo valor del primer número (n). Es decir, debido al cambio en el primer número (n) de compresores centrífugos, la capacidad máxima total, la capacidad de reducción total y la suma total del flujo donde se activan los puntos de control antibombeo cambiarán.

65

El proceso de la presente invención también es reversible en cualquier punto. Si se invierte el proceso, la lógica de las etapas simplemente se invertirá también. Por ejemplo, cuando el proceso se lleva a cabo a la inversa, el proceso comprende (d), durante los períodos donde la alimentación de gas es recibida por el sistema de compresión de múltiples etapas con un flujo mayor que la capacidad máxima total para dicho segundo número (n) de compresores centrífugos, cargar un compresor centrífugo para sacar dicho compresor de un modo de baja potencia o modo de apagado, mientras que simultáneamente se disminuye la carga de los compresores centrífugos restantes a la capacidad de reducción total (cuando se desplaza de los períodos especificados en (d) a los de (c)). La Figura 4 es un ejemplo ilustrativo que muestra los umbrales y las condiciones donde se pueden llevar a cabo ciertas acciones en el proceso y la carga resultante y el flujo de reciclaje.

Por tanto, de manera adicional, el proceso puede comprender, (e) durante los períodos donde la alimentación de gas es recibida por el sistema de compresión de múltiples etapas con un flujo mayor que la capacidad máxima total para dicho primer número (n) de compresores centrífugos, recargar un compresor centrífugo adicional, si está disponible, para sacar dicho compresor adicional de un modo de baja potencia o modo de parada hasta que comience a producir gas comprimido neto.

Esto permite que el proceso responda dinámicamente a los cambios en el flujo de gas en la alimentación de gas al sistema de compresión de múltiples etapas, por ejemplo, como resultado de los cambios en la cantidad de gas producido por un proceso alimentado por una fuente de energía renovable. De esta manera, el proceso de la presente invención proporciona un procedimiento de funcionamiento de una compresión de múltiples etapas para comprimir gas con un caudal variable que, entre otras cosas, minimiza el consumo de electricidad, proporciona una salida estable de gas comprimido neto del sistema y/o mejora la fiabilidad del compresor.

Cuando el primer número (n) es igual a uno, es decir, sólo hay un compresor centrífugo funcionando para producir gas comprimido neto, el proceso puede comprender adicionalmente, ya sea utilizar el sistema de reciclaje principal para continuar funcionando el compresor centrífugo final con una carga por encima de su punto de control antibombeo o, alternativamente, apagar o poner el compresor en modo de baja potencia. Si el compresor centrífugo final continúa funcionando puede depender de si hay suficiente electricidad disponible para hacerlo funcionar, por ejemplo. En algunos casos, puede ser deseable mantener al menos un compresor centrífugo en funcionamiento (n igual a 1) para comprimir al menos algo de gas. Se apreciará que cuando el primer número (n) es igual a 1, los períodos especificados en (c) pueden aplicarse hasta que el flujo de la alimentación de gas aumente para alcanzar las condiciones para los períodos especificados en (b).

Por tanto, el proceso puede comprender, donde el primer número (n) es igual a uno, durante los períodos donde la alimentación de gas es recibida por el sistema de compresión de múltiples etapas con un flujo en un intervalo de 0 % de flujo a la capacidad máxima del compresor centrífugo que produce gas comprimido neto, reciclar el gas comprimido utilizando el sistema de reciclaje principal según sea necesario para mantener la carga de dicho compresor centrífugo por encima del punto donde se activan los controles antibombeo.

En algunos casos, todos los compresores centrífugos se pueden apagar o poner en modo de baja potencia, por ejemplo, debido a un flujo muy bajo en la alimentación de gas. En estos casos, se apreciará que los períodos especificados en (a) a (d) ya no se aplicarán hasta el momento en que un compresor centrífugo se encienda o salga del modo de baja potencia y produzca gas comprimido neto nuevamente.

Si todos los compresores centrífugos están apagados, el usuario (o controlador) del sistema puede determinar en qué punto el flujo de la alimentación de gas es suficiente para justificar volver a encender un compresor centrífugo o sacarlo del modo de baja potencia. Esto puede depender de la electricidad disponible para la compresión, por ejemplo, y sólo se puede considerar eficiente desde el punto de vista energético si el flujo de la alimentación de gas permite que un compresor centrífugo funcione en la reducción máxima sin mucho reciclaje.

Por tanto, en algunas realizaciones, el proceso comprende, donde todos los compresores centrífugos no producen gas comprimido neto, durante períodos donde el flujo de la alimentación de gas es igual o mayor que la capacidad de reducción total de al menos un compresor centrífugo, recargar un compresor centrífugo para sacar dicho compresor adicional de un modo de baja potencia o modo de apagado hasta que comience a producir gas comprimido neto.

Modo de baja potencia/inactivación

Basándose en el estado actual de la técnica, el(los) compresor(es) centrífugo(s) típicamente se desconectaría(n) o apagaría(n) en respuesta a una disminución significativa en el flujo de gas en el sistema de compresión, con miras a reiniciarse una vez que el flujo de gas aumente lo suficiente. Sin embargo, en el contexto de la presente invención, los compresores centrífugos pueden funcionar en un modo de "baja potencia" (modo LP).

5 Cada compresor centrífugo típicamente tiene incorporado dentro de él al menos un sellado de gas seco con caras de sellado opuestas. Se puede utilizar cualquier sellado de gas seco adecuado para compresores centrífugos y estos son conocidos en la técnica, incluyendo sellados simples, sellados en tándem y sellados opuestos dobles. Para comprimir adecuadamente los gases de proceso en un compresor centrífugo, se puede utilizar un DGS para minimizar cualquier fuga de gas. Estos sellados de gas seco contienen dos caras o anillos de sellado opuestos, uno es típicamente una superficie giratoria (a veces llamada "rotor") y el otro es una superficie estacionaria (a veces llamada "estator"). La superficie giratoria tiene una geometría de elevación diseñada de tal manera que cuando alcanza una cierta velocidad se levanta de la superficie estacionaria creando un espacio diminuto por el cual las superficies no están en contacto, lo que sirve para minimizar la fuga de gas.

15 Los compresores centrífugos alimentados por una red de energía eléctrica no renovable estándar funcionarán a una velocidad fija (típicamente velocidad máxima para proporcionar la cantidad máxima de gas de producto). En estos casos, las caras de sellado opuestas de los sellados de gas seco se separan rápidamente y se mantienen a medida que la velocidad del motor del compresor se mantiene durante la compresión del gas. Los compresores centrífugos rara vez se desconectan, apagan o reinician debido a una disponibilidad constante de electricidad de la red de energía eléctrica.

20 Cuando se apaga un compresor centrífugo con un sellado de gas seco, la velocidad del motor se reduce a cero y las caras del sellado opuestas entran en contacto. Cuanto más a menudo sucede esto, más se desgastan las caras de sellado opuestas de los sellados de gas seco con el tiempo. Esto disminuye la vida útil de los sellados de gas seco, lo que significa que los compresores deben repararse con más frecuencia, lo que aumenta los costes generales. Un mayor número de reparaciones de los compresores en el sistema también da lugar a interrupciones del proceso general para llevar a cabo dichas reparaciones, lo que complica aún más el funcionamiento del proceso y aumenta los costes.

25 Los DGS se utilizan a menudo cuando se comprimen gases de alta presión, bajo peso molecular, inflamables, tóxicos y/o caros. A medida que el DGS envejece, en general hay más fugas a través del sellado, lo que conlleva a más pérdidas que también tendrán un impacto económico.

30 En dicho modo de baja potencia, el o al menos un compresor centrífugo está funcionando con una baja cantidad de potencia que es suficiente para evitar el contacto de dichas caras de sellado opuestas de dicho sellado de gas seco en dicho(s) compresor(es) centrífugo(s) y preferiblemente no produce gas comprimido neto. Por tanto, la velocidad del rotor del compresor centrífugo disminuye pero no es completamente nula (es decir, el compresor no se apaga o desconecta).

35 Las caras de sellado opuestas (a veces llamadas "anillos" en la técnica) están separadas y no están en contacto durante dicho modo de baja potencia. Es decir, la velocidad del motor del o al menos un compresor centrífugo disminuye en comparación con el modo de potencia normal, pero es lo suficientemente alta como para exceder la llamada velocidad de "elevación" del DGS para que estas caras de sellado opuestas se mantengan separadas entre sí.

40 Las caras de sellado opuestas típicamente tienen una superficie giratoria y una superficie estacionaria. La superficie giratoria tiene una geometría de elevación diseñada de tal manera que cuando alcanza una cierta velocidad se levanta de una superficie estacionaria. Esto crea un espacio diminuto con superficies sin contacto que da como resultado una fuga mínima de gas. Por tanto, en el contexto de la presente invención, "evitar el contacto" pretende significar que dicho espacio diminuto con superficies sin contacto está presente.

45 Se apreciará que, dado que hay una velocidad del rotor que no es nula durante dicho modo de baja potencia, el(los) compresores centrífugos funcionarán de tal manera que todavía se esté produciendo gas comprimido. Sin embargo, este gas se reciclará desde el extremo de producto hasta el extremo de alimentación del compresor. En otras palabras, durante dicho modo de baja potencia, no se produce gas comprimido neto ya que sólo se comprime gas reciclado.

50 La cantidad de potencia al compresor requerida para evitar el contacto entre dichas caras de sellado opuestas depende del diseño no sólo del (de los) compresor(es) centrífugo(s) sino también de los sellados de gas seco. Por lo general, sin embargo, un compresor centrífugo en modo de baja potencia funcionará por encima de este umbral de potencia mínimo para garantizar que se evite el contacto. En el modo de baja potencia, la potencia en el compresor centrífugo es típicamente de aproximadamente 5 % a aproximadamente 20 %, por ejemplo, de aproximadamente 8 % a aproximadamente 15 %, por ejemplo, aproximadamente 10 %, de la potencia máxima para el compresor. La velocidad de "elevación" es la velocidad del rotor (en rpm) requerida antes de que las caras de sellado de un DGS se separen y dependerá, al menos en parte, del diseño del DGS y del fabricante. En este sentido, el fabricante de un DGS determinado indicará la velocidad de elevación del DGS. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la velocidad de elevación de un DGS de un fabricante puede ser diferente a la de otro fabricante, incluso para un DGS de diseño similar. De manera adicional, la velocidad de elevación también puede cambiar con el tiempo a medida que el DGS envejece y/o se contamina. Con esto en

mente, la velocidad del rotor durante el modo de baja potencia suele ser mayor que, por ejemplo, al menos el doble o incluso tres veces, la velocidad de elevación indicada por el fabricante para garantizar que no haya contacto de las superficies de sellado en el DGS. Por ejemplo, si la velocidad de elevación para un DGS dado es de 300 rpm, entonces la velocidad del rotor durante el modo de baja potencia de un compresor que utiliza ese DGS puede ser de aproximadamente 600 rpm o incluso 900 rpm.

Está dentro de la capacidad del experto en la técnica determinar mediante un ensayo una velocidad de rotor adecuada para el DGS en un compresor centrífugo que funciona en modo de baja potencia. Con fines ilustrativos, sin embargo, la velocidad del rotor durante el modo de baja potencia será menor que durante el modo de potencia normal (por ejemplo, de aproximadamente 3000 rpm a aproximadamente 3500 rpm) y puede estar en el intervalo de aproximadamente 100 rpm a aproximadamente 1500 rpm, por ejemplo, de aproximadamente 200 rpm a aproximadamente 1000 rpm, o de aproximadamente 400 rpm a 900 rpm.

La velocidad del rotor de (o la potencia suministrada a) un compresor centrífugo, por ejemplo, para cambiar entre un modo de potencia normal y un modo de baja potencia, puede manipularse utilizando medios adecuados conocidos por los expertos en la técnica, incluyendo un variador de frecuencia variable (VFD, por sus siglas en inglés) y un accionamiento mecánico. Se pueden utilizar otros dispositivos mecánicos, como motores de dos velocidades.

Se apreciará que también se puede utilizar un sistema de control para supervisar y controlar la velocidad del rotor o la cantidad de potencia del (de los) compresor(es) centrífugo(s).

Fuentes de energía renovables

El proceso de la presente invención comprende comprimir una alimentación de gas que tiene un flujo variable, tal como el gas producido utilizando electricidad generada al menos en parte a partir de al menos una fuente de energía renovable.

El funcionamiento del sistema de compresión normalmente estará dictado por el gas producido utilizando electricidad de una fuente de energía renovable (por ejemplo, gas hidrógeno de los electrolizadores). Por lo general, la potencia necesaria para producir gas para compresión (por ejemplo, utilizando electrolizadores) es mucho mayor que la potencia necesaria para hacer funcionar los compresores. Cuando se suministra una cantidad escasa o nula de gas, en general se inyectará desde un sistema de almacenamiento de gas.

Se prefiere que, con el fin de reducir el impacto ambiental, el proceso sea autónomo en términos de generación de energía para producir gas y, opcionalmente, alimentar el(los) compresor(es) centrífugo(s). Por tanto, preferiblemente, toda la demanda de electricidad para producir el gas para compresión y opcionalmente para los compresores centrífugos, se satisface utilizando fuentes de energía renovables, sin complementar dichas fuentes utilizando energía no renovable.

Se apreciará que cuando la electricidad disponible generada a partir de la(s) fuente(s) de energía renovables no es suficiente para el funcionamiento normal del sistema de compresión de múltiples etapas, poner el o al menos un compresor centrífugo en modo de baja potencia pone la cantidad de gas comprimido neto que se produce por dicho sistema en riesgo de reducirse. En tales casos, se prefiere que la demanda de gas comprimido se satisfaga alimentando gas desde un sistema de almacenamiento de gas adecuado, antes de considerar el uso de cualquier fuente de energía no renovable para producir más gas (o para alimentar los compresores centrífugos).

No obstante, puede haber casos donde la demanda de gas comprimido no pueda satisfacerse ya sea por el gas que se alimenta para la compresión (por ejemplo, hidrógeno de electrolizadores) o por el sistema de almacenamiento de gas. Por tanto, se preverá que en algunas realizaciones la electricidad generada a partir de una o más fuentes de energía renovable pueda complementarse con otras fuentes ya sea durante períodos de demanda particularmente alta de, por ejemplo, producto(s) del(de los) proceso(s) aguas abajo y/o durante períodos donde la fuente de energía renovable sólo está disponible por debajo del umbral requerido para satisfacer dichas demandas del proceso, o no está disponible en absoluto, y el suministro de gas desde un sistema de almacenamiento de gas no es suficiente para satisfacer dichas demandas.

Por tanto, en algunas realizaciones, al menos parte de la electricidad adicional puede tomarse del almacenamiento de la batería in situ y/o generarse a partir de uno o más generadores de gasolina, diésel o hidrógeno in situ, incluyendo las células de combustible y/o tomarse de una red eléctrica local o nacional.

Sin embargo, puede haber casos donde la electricidad generada por la(s) fuente(s) de energía renovable(s) y dicha electricidad adicional aún no sea suficiente para el funcionamiento normal del sistema de compresión de múltiples etapas.

En estas realizaciones, el gas para compresión se produce utilizando, y compresor(es) centrífugo(s) opcionalmente alimentado (s) por

(i) electricidad generada al menos en parte a partir de al menos una fuente de energía renovable, y

(ii) electricidad del almacenamiento de baterías en el sitio y/o generada a partir de uno o más generadores de gasolina, diésel o hidrógeno en el sitio.

Gas para compresión

La alimentación de gas para compresión en el sistema de compresión de múltiples etapas puede contener cualquier gas adecuado para la compresión en compresores centrífugos que tenga un caudal variable. En el contexto de la presente invención, los compresores centrífugos típicamente comprimen el gas producido utilizando electricidad generada al menos en parte a partir de al menos una fuente de energía renovable.

Se prefiere que el gas para compresión sea gas hidrógeno, preferiblemente producido por electrólisis del agua. Se puede utilizar cualquier forma adecuada de electrólisis del agua, incluyendo la electrólisis del agua alcalina y la electrólisis del agua con membrana de electrolito polimérico (PEM, por sus siglas en inglés, *Polymer Electrolyte Membrane*).

El agua utilizada para la electrólisis suele ser agua de mar que ha sido desalinizada, posiblemente por ósmosis inversa y desmineralizada.

La electricidad requerida para la electrólisis puede generarse al menos en parte a partir de cualquier fuente de energía renovable adecuada. En algunas realizaciones preferidas de la invención, sin embargo, al menos parte de la electricidad requerida para la electrólisis se genera 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 puede utilizarse para proporcionar energía a los electrolizadores.

Preferiblemente, el proceso será autónomo en términos de generación de energía para la electrólisis. Por tanto, preferiblemente, toda la demanda de electricidad para la electrólisis se satisface utilizando fuentes de energía renovables.

Se prevé, sin embargo, que la electricidad generada a partir de una o más fuentes de energía renovables puede complementarse con otras fuentes durante períodos de demanda particularmente alta de producto(s) del (de los) proceso(s) aguas abajo y/o durante períodos donde la fuente de energía renovable sólo está disponible por debajo del umbral requerido para satisfacer la demanda, o no está disponible en absoluto. En estos casos, se puede tomar electricidad adicional del almacenamiento de la batería en el sitio y/o generarla a partir de uno o más generadores de gasolina, diésel o hidrógeno en el sitio, incluyendo las células de combustible y/o tomarla de una red eléctrica local o nacional.

La electrólisis se puede llevar a cabo a cualquier escala adecuada, en algunos casos con una capacidad total de menos de 1 GW. Sin embargo, en realizaciones preferidas de la invención, la electrólisis tiene una capacidad total de al menos 1 gigavatio (GW). La capacidad total máxima de la electrólisis está limitada sólo por consideraciones prácticas, por ejemplo, generar suficiente energía a partir de las 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, de aproximadamente 1,5 GW a aproximadamente 3 GW, por ejemplo.

El gas hidrógeno se genera típicamente por la electrólisis a una presión ligeramente superior a la presión atmosférica, por ejemplo, aproximadamente 0,13 MPa (1,3 bar). Sin embargo, en algunas realizaciones, la electrólisis produce hidrógeno a una presión algo más alta, por ejemplo, hasta aproximadamente 0,3 MPa (3 bar).

Por tanto, el gas hidrógeno se alimenta en general al sistema de compresión de múltiples etapas a una presión en el intervalo de presión atmosférica a aproximadamente 0,5 MPa (5 bar), por ejemplo, de una presión atmosférica a aproximadamente 0,3 MPa (3 bar), preferiblemente en el intervalo de presión atmosférica a aproximadamente 0,15 MPa (1,5 bar), por ejemplo, aproximadamente 0,11 MPa (1,1 bar).

En algunas realizaciones, la cantidad de gas hidrógeno producida por los electrolizadores es variable y, por lo tanto, durante los períodos donde no hay suficiente gas hidrógeno producido por electrólisis, por ejemplo, cuando hay un flujo de gas hidrógeno que es inferior a la capacidad de reducción máxima de un solo compresor centrífugo, entonces el gas puede alimentarse al sistema de compresión de múltiples etapas desde otra fuente, por ejemplo, un sistema de almacenamiento de hidrógeno.

Purificación

5 En realizaciones preferidas de la invención donde el gas para compresión es gas hidrógeno producido por electrólisis, se observará que el gas hidrógeno producido por electrólisis está típicamente saturado con agua a 40 °C. Por tanto, este gas hidrógeno en general contiene algo de gas de oxígeno residual, típicamente de aproximadamente 500 a aproximadamente 1000 ppm(v). Estas impurezas en general tendrán que eliminarse, dependiendo de las tolerancias de cualquier proceso aguas abajo.

10 En este sentido, el oxígeno es un veneno para los catalizadores convencionales utilizados en el proceso de Haber. Por tanto, en realizaciones donde el proceso aguas abajo es la síntesis de amoniaco, la alimentación al catalizador contendrá menos de aproximadamente 10 ppm, típicamente menos de aproximadamente 5 ppm, de oxígeno total, es decir, átomos de oxígeno de cualquier fuente de impurezas, como gas oxígeno (O₂), agua (H₂O), monóxido de carbono (CO) y/o dióxido de carbono (CO₂). Por consiguiente, la alimentación también estará seca, es decir, no más de 1 ppm de agua.

15 Los procesos aguas abajo que utilizan hidrógeno "gris" convencional (es decir, hidrógeno derivado de una corriente de alimentación de hidrocarburos o carbonosa sin captura de dióxido de carbono, por ejemplo, mediante la reforma del 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), como las refinerías, tienen tolerancias similares para el oxígeno y el agua. Sin embargo, la licuefacción de hidrógeno en general tiene una especificación más estricta y no requiere más de 10 ppb de agua y 1 ppm de oxígeno en la alimentación.

20 El gas hidrógeno comprimido producido por la electrólisis se purifica preferiblemente antes de alimentarse al proceso aguas abajo. En este sentido, el gas de oxígeno residual en el gas hidrógeno comprimido puede convertirse en agua por combustión catalítica de parte del hidrógeno para producir gas hidrógeno comprimido pobre en oxígeno (que contiene no más de 1 ppm de O₂) que a continuación puede secarse para producir gas hidrógeno comprimido seco (que contiene no más de 1 ppm de agua) para su uso en el(los) proceso(s) aguas abajo.

30 Sistema de compresión de múltiples etapas

35 El sistema de compresión de múltiples etapas es responsable de comprimir el gas desde la presión a la que se genera el gas hasta una presión elevada. Por ejemplo, cuando al menos parte del gas comprimido se alimenta a al menos un proceso aguas abajo, la presión elevada en general será una presión que es al menos un poco más alta que la presión de alimentación de dicho(s) proceso(s) aguas abajo.

40 Como se apreciará fácilmente, un sistema de compresión "de múltiples etapas" tiene una pluralidad de etapas de compresión que pueden dividirse entre compresores en paralelo y/o en serie. La relación de presión general en cada etapa está en general 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 la temperatura del gas comprimido.

45 Los enfriadores en general se requieren entre etapas adyacentes ("enfriadores intermedios") y en general se requieren después de una etapa final ("enfriadores posteriores") en sistemas de compresión de múltiples etapas para eliminar el calor de compresión del gas comprimido. Por tanto, en el contexto de la presente invención, una "etapa" de compresión se refiere a la parte del sistema de compresión entre enfriadores.

50 El gas hidrógeno comprimido producido por el sistema de compresión de múltiples etapas típicamente tiene una presión de aproximadamente 1 MPa (10 bar) a aproximadamente 5 MPa (50 bar). En algunas realizaciones, la presión del gas hidrógeno comprimido es de aproximadamente 2,5 MPa (25 bar) a aproximadamente 3,5 MPa (35 bar), preferiblemente aproximadamente 3 MPa (30 bar). En otras realizaciones, la presión del gas hidrógeno comprimido es de aproximadamente 1 MPa (10 bar) a aproximadamente 1,2 MPa (12 bar), preferiblemente de aproximadamente 1,1 MPa (11 bar).

55 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.

60 En realizaciones particulares, el sistema de compresión de múltiples etapas tiene dos secciones, una primera sección (baja presión o "LP", por sus siglas en inglés, *Low Pressure*) donde el gas hidrógeno se comprime desde la presión de alimentación al sistema de compresión de múltiples etapas hasta una primera presión elevada en el intervalo de aproximadamente 0,2 MPa (2 bar) a aproximadamente 0,6 MPa (6 bar), y una segunda sección (presión media o "MP", por sus siglas en inglés) donde el gas hidrógeno se comprime desde la primera presión elevada hasta la presión elevada final deseada para el(los) proceso(s) aguas abajo.

65

- En algunas realizaciones, la primera presión elevada del gas hidrógeno después de la compresión en la primera sección puede estar en el intervalo de aproximadamente 0,2 MPa (2 bar) a aproximadamente 0,3 MPa (3 bar), por ejemplo, 0,25 MPa (2,5 bar). En otras realizaciones, la primera presión elevada puede estar en el intervalo de aproximadamente 0,4 MPa (4 bar) a aproximadamente 0,6 MPa (6 bar), por ejemplo, 0,5 MPa (5 bar).
- 5 En realizaciones preferidas de la invención, el sistema de compresión de múltiples etapas comprenderá separadores de fases aguas arriba de cada etapa de compresión para eliminar el agua líquida. Para los compresores centrífugos de LP, el separador de fases en general se combinará en el enfriador intermedio como una sola unidad para permitir eventualmente los beneficios de capital y energía y simplificar el sistema.
- 10 **Proceso(s) aguas abajo**
- En algunas realizaciones, el gas comprimido puede consumirse en un proceso aguas abajo, o en más de un proceso aguas abajo dispuesto en paralelo.
- 15 En realizaciones preferidas de la invención donde el gas para compresión es gas hidrógeno, el(los) proceso(s) aguas abajo podría(n) incluir cualquier proceso que usaría actualmente hidrógeno "gris" o hidrógeno "azul". Dichos procesos incluyen el refinado de petróleo y la fabricación de acero.
- 20 En realizaciones aún preferidas, al menos parte, por ejemplo, todo el gas comprimido es gas hidrógeno utilizado para producir amoníaco a través del proceso de Haber (o Haber-Bosch). En este proceso, el amoníaco se produce haciendo reaccionar una mezcla de gases de hidrógeno y nitrógeno sobre un catalizador a 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 intervalo de aproximadamente 10 MPa (100 bar) a 20 MPa (200 bar).
- 25 En otras realizaciones preferidas, al menos parte, por ejemplo, todo el gas comprimido es gas hidrógeno utilizado para producir metanol, por ejemplo, a través de la hidrogenación de CO₂.
- 30 En algunas realizaciones, al menos parte, por ejemplo, todo el gas comprimido es gas hidrógeno utilizado para producir amoníaco y/o metanol.
- En otras realizaciones, al menos parte, por ejemplo, todo el gas hidrógeno comprimido se licua mediante enfriamiento criogénico.
- 35 En otras realizaciones más, una primera parte del gas hidrógeno comprimido se utiliza para producir amoníaco y una segunda parte del gas hidrógeno comprimido se licua.
- Devolución del gas almacenado**
- 40 Uno de los inconvenientes de utilizar la electricidad generada a partir de una fuente de energía renovable (por ejemplo, para producir gas) son las fluctuaciones inherentes en la disponibilidad de la fuente de energía, lo que a su vez conduce a fluctuaciones en el flujo de la alimentación de gas al sistema. En algunas realizaciones, este problema puede abordarse (aunque temporalmente) en la presente invención proporcionando un sistema para recoger y almacenar al menos parte, preferiblemente todo, del exceso de gas producido durante los
- 45 períodos donde la producción excede la demanda de un proceso(s) aguas abajo, y distribuir el gas almacenado a dicho(s) proceso(s) aguas abajo durante los períodos donde la demanda excede la producción.
- En el contexto de la presente invención, el uso de un sistema de almacenamiento puede ser particularmente útil cuando el primer número (n) de compresores que producen gas comprimido neto alcanza 1, es decir, sólo un compresor está funcionando y los compresores restantes están en un modo de baja potencia o apagados. En el contexto del proceso donde el gas se produce utilizando energía renovable y el sistema de compresión de múltiples etapas está alimentado por energía renovable, puede ser más eficiente desde el punto de vista energético desconectar el compresor centrífugo final o ponerlo en modo de baja potencia para evitar el reciclaje excesivo de gas y reducir el consumo de energía para ahorrar electricidad.
- 55 Por lo tanto, una vez que se descarga el último compresor centrífugo, todavía puede haber algún flujo de gas en la alimentación de gas al sistema de compresión de múltiples etapas y la presencia de un sistema de almacenamiento permite la recolección de este gas para que se comprima más tarde.
- 60 En algunas realizaciones, el gas comprimido se puede almacenar sin compresión adicional. En estas realizaciones, el gas se almacena a una presión de hasta una presión máxima de la presión a la que se comprime el gas en el sistema de compresión de múltiples etapas, por ejemplo, una presión de hasta un máximo de aproximadamente la presión de alimentación del proceso aguas abajo (donde sólo hay uno) o aproximadamente la alimentación de uno de los procesos aguas abajo (si hay más de uno). En tales realizaciones, el gas comprimido puede almacenarse quizás a una presión de hasta una presión máxima en la
- 65 región de aproximadamente 2,5 MPa (25 bar) a aproximadamente 3 MPa (30 bar).

5 Sin embargo, el gas comprimido puede comprimirse aún más antes del almacenamiento. En estas realizaciones, el gas comprimido puede almacenarse a una presión de hasta un máximo de aproximadamente 20 MPa (200 bar), o hasta un máximo de aproximadamente 15 MPa (150 bar), o hasta un máximo de aproximadamente 10 MPa (100 bar), o hasta un máximo de aproximadamente 9 MPa (90 bar), o hasta un máximo de aproximadamente 8 MPa (80 bar), o hasta un máximo de aproximadamente 7 MPa (70 bar), o hasta un máximo de aproximadamente 6 MPa (60 bar), o hasta un máximo de aproximadamente 5 MPa (50 bar).

10 Durante los períodos donde el nivel de demanda del gas excede el nivel de producción, el gas comprimido se retira del almacenamiento y se reduce la presión para producir gas a presión reducida. La presión se puede reducir de cualquier manera convencional, particularmente haciendo pasar el gas a través de una válvula.

La presión del gas a presión reducida dependerá de la presión en el punto del sistema de compresión de múltiples etapas al que se agregará el gas a presión reducida.

15 En algunas realizaciones, el gas a presión reducida puede alimentarse a una etapa final del sistema de compresión de múltiples etapas. En estas realizaciones, el gas a presión reducida estará a la presión de entrada de la alimentación a la etapa final.

20 En otras realizaciones, se puede alimentar gas a presión reducida a una etapa intermedia del sistema de compresión de múltiples etapas. En estas realizaciones, el gas a presión reducida estará a la presión de entrada de la alimentación a la etapa intermedia.

25 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 a presión reducida del almacenamiento estará a la presión de entrada de la alimentación a la sección de compresión adicional, es decir, la presión de "intersección".

30 En otras realizaciones adicionales, el gas a presión reducida 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 a presión reducida será la presión de alimentación al sistema de compresión de múltiples etapas, por ejemplo, aproximadamente 0,11 MPa (1,1 bar).

35 Durante los períodos donde la demanda exceda la producción, el proceso puede comprender:

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

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

En tales realizaciones, una vez que la presión del gas comprimido en almacenamiento cae a aproximadamente la presión de entrada de la primera etapa, el procedimiento puede comprender:

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

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

55 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, las expresiones pretenden simplemente reflejar el orden de las etapas a las que se alimenta el gas a presión reducida al sistema de compresión de múltiples etapas durante los períodos donde la demanda excede la producción. Las expresiones "primera presión intermedia" y "segunda presión intermedia" deben interpretarse por consiguiente, siendo la primera presión intermedia mayor que la segunda presión intermedia.

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

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

Se apreciará que, en realizaciones donde se alimenta gas a presión reducida a una segunda etapa después de la primera etapa, el flujo de gas en la primera etapa se detiene cuando comienza el flujo de gas en la segunda etapa. En términos generales, el flujo de gas a presión reducida en una etapa de compresión dada se detiene cuando comienza el flujo de gas a presión reducida en otra etapa de compresión.

5 En algunas realizaciones preferidas, en donde, durante la alimentación de dicho gas de presión reducida a una etapa, el compresor centrífugo o, si hay más de uno, al menos un compresor centrífugo aguas arriba de dicha etapa está funcionando en dicho modo de baja potencia.

10 Dado que el gas puede devolverse desde el almacenamiento a una etapa intermedia y/o la etapa inicial del sistema de compresión de múltiples etapas, el gas comprimido puede almacenarse a una presión por debajo de un mínimo de aproximadamente 0,5 MPa (5 bar), tal vez incluso por debajo de un mínimo de aproximadamente 0,13 MPa (1,3 bar).

15 En realizaciones donde el gas comprimido se comprime aún más antes de almacenarse, otra opción sería que el gas comprimido extraído del almacenamiento se alimente, después de la disminución de presión adecuada, directamente a uno o más procesos aguas abajo hasta que la presión de almacenamiento caiga a la presión de alimentación de dicho(s) proceso(s) aguas abajo. En ese punto, la presión del gas comprimido extraído del almacenamiento se reduciría aún más y el gas a presión reducida se alimentaría a una etapa del sistema de compresión de múltiples etapas según 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.

20 El término "adecuado" en el contexto de la disminución de la presión para el sistema de almacenamiento pretende significar que la presión del gas se reduce en una medida adecuada teniendo en cuenta la presión de entrada de la etapa del sistema de compresión de múltiples etapas a la que se alimenta el gas a presión reducida.

25 En comparación con un sistema de almacenamiento de alta presión con descarga sólo a la presión de alimentación de un proceso aguas abajo, estas realizaciones de la presente invención permiten reducir el volumen de almacenamiento de gas mediante el uso del sistema de compresión de múltiples etapas que ya está presente en el proceso para recomprimir el gas del almacenamiento cuando la presión de almacenamiento cae por debajo de esa presión de alimentación. De este modo, el gas 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.

30 Se requiere potencia de compresión adicional durante los períodos donde la producción de gas está limitada por la falta de potencia, por ejemplo, en los electrolizadores, pero la potencia de compresión adicional puede minimizarse suministrando gas 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 gas sea igual o inferior a la presión de alimentación de cualquier proceso aguas abajo para eliminar cualquier requisito de compresión adicional para el almacenamiento de gas.

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

40 Sin embargo, los inventores se han dado cuenta de que cuando se produce gas y a continuación se comprime en un sistema de compresión de múltiples etapas para su uso en al menos un proceso aguas abajo, el volumen liberable de gas almacenado puede aumentarse devolviendo el gas del almacenamiento a una etapa en el sistema de compresión de múltiples etapas en lugar de directamente al proceso aguas abajo, y que esta disposición disminuye el volumen total del recipiente de almacenamiento requerido por el proceso.

45 A modo de ejemplo, el almacenamiento desde una presión máxima de 20 MPa (200 bar) hasta una presión mínima de 0,15 MPa (1,5 bar) requiere un 15 % menos de volumen del recipiente de almacenamiento para una masa dada de gas liberable en comparación con el almacenamiento desde una presión máxima de 20 MPa (200 bar) hasta una presión mínima de 3 MPa (30 bar).

50 Del mismo modo, el almacenamiento desde una presión máxima de 10 MPa (100 bar) hasta una presión mínima de 0,15 MPa (1,5 bar) requiere un 30 % menos de volumen del recipiente de almacenamiento para una masa dada de gas liberable en comparación con el almacenamiento desde una presión máxima de 10 MPa (100 bar) hasta una presión mínima de 3 MPa (30 bar).

55 De manera adicional, el almacenamiento desde una presión máxima de 5 MPa (50 bar) hasta una presión mínima de 0,15 MPa (1,5 bar) requiere un 60 % menos de volumen del recipiente de almacenamiento para una masa dada de gas liberable en comparación con el almacenamiento desde una presión máxima de 5 MPa (50 bar) hasta una presión mínima de 3 MPa (30 bar).

Además, el almacenamiento desde una presión máxima de 3 MPa (30 bar) hasta una presión mínima de 0,15 MPa (1,5 bar) es factible en comparación con de 3 MPa (30 bar) a 3 MPa (30 bar), lo que no permitiría el almacenamiento.

5 Por otra parte, aunque el volumen total del recipiente de almacenamiento aumenta a medida que se reduce la presión máxima de almacenamiento, la menor presión de diseño hace que las paredes del recipiente sean más delgadas y puede reducir el coste de capital total del sistema de almacenamiento. El espesor del recipiente a menudo se limita a un valor máximo por consideraciones tales como la capacidad de fabricación y, en ese caso, la menor presión de diseño dará lugar a menos recipientes (aunque cada recipiente será mayor). Es más, la tensión permitida para el diseño de un recipiente se puede aumentar por debajo de un espesor de pared de recipiente particular, y si la presión de diseño más baja permite que el espesor esté por debajo de este umbral, se puede reducir la masa metálica total del recipiente (y, por lo tanto, el coste total).

10 En un segundo aspecto de la presente invención, se proporciona un aparato para comprimir una alimentación de gas que tiene un caudal variable, comprendiendo donde dicho aparato:

15 un sistema de compresión de múltiples etapas comprendiendo un extremo de alimentación, una pluralidad (N) de compresores centrífugos en paralelo, un extremo de producto y un sistema de reciclaje principal para reciclar gas a través de la pluralidad (N) de compresores centrífugos, en donde cada compresor centrífugo comprende una entrada, una salida y un sistema de reciclaje local con control antibombeo que recicla gas de la salida a la entrada;

caracterizado por que el aparato comprende:

20 un sistema de control para controlar la carga de cada compresor centrífugo y para controlar la cantidad de reciclaje por el sistema de reciclaje principal y el sistema de reciclaje local según el procedimiento del primer aspecto, en base al flujo del gas de alimentación.

Sistema de generación de electricidad

30 En algunas realizaciones preferidas, el aparato comprende un sistema de generación de electricidad para generar electricidad a partir de al menos una fuente de energía renovable, y en donde el gas para compresión se produce al menos en parte utilizando electricidad generada a partir de dicho sistema de generación de electricidad.

35 La electricidad para producir el gas para compresión (y posiblemente para alimentar el o cada compresor centrífugo del sistema de compresión de múltiples etapas) se genera a partir de al menos una fuente de energía renovable, por ejemplo, energía eólica y/o energía solar.

40 Se prefiere que, con el fin de reducir el impacto ambiental, el proceso será autónomo en términos de generación de energía para producir gas para compresión (y opcionalmente alimentar los compresores centrífugos)). Por tanto, preferiblemente, toda la demanda de electricidad se satisface utilizando fuentes de energía renovables, sin complementar dichas fuentes utilizando energía no renovable. En tales casos, se prefiere que la demanda de gas comprimido se satisfaga alimentando gas desde un sistema de almacenamiento adecuado, antes de considerar el uso de cualquier fuente de energía no renovable.

45 Sin embargo, puede no haber suficiente gas disponible para ser alimentado desde dicho sistema de almacenamiento, por ejemplo. Por tanto, en algunas realizaciones, el sistema de generación de electricidad comprende un almacenamiento de batería en el sitio y/o uno o más generadores que funcionan con gasolina, diésel o hidrógeno en el sitio). La electricidad de dicho almacenamiento de batería y/o uno o más generadores que funcionan con gasolina, diésel o hidrógeno pueden utilizarse para complementar la electricidad adicional durante períodos de demanda particularmente alta de, por ejemplo, producto(s) del (de los) proceso(s) aguas abajo y/o durante períodos donde la fuente de energía renovable sólo está disponible por debajo del umbral requerido para satisfacer dichas demandas del proceso, o no está disponible en absoluto.

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

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

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

65

En el contexto de la presente invención, el o cada compresor centrífugo también puede ser accionado por un variador de frecuencia variable dedicado, un accionamiento mecánico o un motor de dos velocidades. En algunas realizaciones preferidas, el sistema de generación de electricidad también genera electricidad para alimentar el(los) compresor(es) centrífugo(s) del sistema de compresión de múltiples etapas y/o cualquier proceso aguas abajo.

Sistema de compresión de múltiples etapas

El sistema de compresión de múltiples etapas comprende una pluralidad (N) de compresores centrífugos. Un primer número (n) de los compresores centrífugos están funcionando para producir gas comprimido neto, mientras que los compresores centrífugos restantes están en un modo de baja energía o desconectados. Como se mencionó anteriormente, el sistema de compresión de múltiples etapas comprende típicamente una pluralidad de etapas, teniendo cada etapa típicamente una relación de compresión en el intervalo de aproximadamente 2 a aproximadamente 2,5. Los enfriadores intermedios se proporcionan típicamente entre etapas adyacentes y se pueden requerir enfriadores posteriores después de una etapa final.

El sistema de compresión de múltiples etapas también comprende un sistema de reciclaje principal para reciclar gas a través de la pluralidad de (N) compresores centrífugos. Cada compresor centrífugo también tiene un sistema de reciclaje local para reciclar el gas de la salida a la entrada del compresor, teniendo el sistema de reciclaje local un control antibombeo.

Las etapas de un sistema de compresión de múltiples etapas pueden disponerse en al menos dos secciones de compresión, una primera y una sección adicional aguas abajo de dicha primera sección.

Cada sección puede comprender una o más etapas de compresión, junto con los enfriadores asociados. También se pueden incluir separadores de fases aguas arriba de cada etapa de compresión para eliminar los líquidos del gas hidrógeno que se va a comprimir.

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

Una sección de LP puede tener una o más, por ejemplo, dos, etapas de compresión y una sección de MP puede tener dos o más, por ejemplo, 3 o 4, etapas de compresión.

El número de compresores utilizados dependerá de la capacidad total del proceso. A modo de ejemplo, para un proceso que tiene una capacidad total de electrolizadores de 2,2 GW (para producir gas hidrógeno), el sistema de compresión de múltiples etapas puede tener de 8 a 10 compresores. El experto en la técnica apreciaría que un proceso que tiene una mayor capacidad total requeriría un mayor número de compresores.

Los compresores en una sección de LP pueden estar sobredimensionados según corresponda, por ejemplo, en un 10 %, para adaptarse a la pérdida de una máquina. Adicional o alternativamente, el sistema de compresión de múltiples etapas puede comprender un compresor de repuesto en la sección de LP o MP que sustituiría a otra máquina de la sección relevante que se hubiera averiado.

Sistema de control

El aparato comprende un sistema de control para controlar la carga de cada compresor centrífugo y para controlar la cantidad de reciclaje por el sistema de reciclaje principal y el sistema de reciclaje local, según sea necesario, en base al flujo del gas de alimentación.

En realizaciones donde hay un sistema de generación de electricidad que dicta el flujo de la alimentación de gas, el sistema de generación de electricidad genera electricidad a partir de al menos una fuente de energía renovable. Sin embargo, como se mencionó anteriormente en algunas realizaciones, el sistema de generación de electricidad comprende además almacenamiento de baterías en el sitio y/o genera electricidad a partir de uno o más generadores que funcionan con gasolina, diésel o hidrógeno. En tales realizaciones, el aparato comprende un sistema de control para cambiar el o cada compresor centrífugo entre un modo de potencia normal y un modo de baja potencia, según sea necesario, en base al nivel de electricidad generado por la al menos una fuente de energía renovable y el almacenamiento de batería in situ y/o uno o más generadores que funcionan con gasolina, diésel o hidrógeno de dicho sistema de generación de electricidad.

Se apreciará que el sistema de control está en comunicación eléctrica con el o cada compresor centrífugo en el sistema de compresión de múltiples etapas.

El sistema de control implementa el proceso de la invención.

Por tanto, el sistema de control está configurado para:

- 5 (a) durante los períodos donde la alimentación de gas es recibida por el sistema de compresión de múltiples etapas con un flujo igual a la capacidad máxima total de un primer número (n) de compresores centrífugos que producen gas comprimido neto, hacer funcionar dicho primer número (n) de compresores centrífugos a plena carga para comprimir la alimentación de gas;
- 10 (b) durante los períodos donde la alimentación de gas es recibida por el sistema de compresión de múltiples etapas con un flujo en un intervalo de menos de la capacidad máxima total de dicho primer número (n) de compresores centrífugos a la capacidad de reducción total de dicho primer número (n) de compresores centrífugos, hacer funcionar dicho primer número (n) de compresores centrífugos a una carga mínima para comprimir la alimentación de gas, siendo dicha carga mínima determinada en base al flujo de la alimentación de gas;
- 15 (c) durante los períodos donde la alimentación de gas es recibida por el sistema de compresión de múltiples etapas con un flujo en un intervalo de menos que la capacidad de reducción total del primer número (n) de compresores centrífugos hasta más que la capacidad máxima total para un segundo número (n-1) de compresores centrífugos que producen gas comprimido neto, reciclar el gas comprimido utilizando el sistema de reciclaje principal según sea necesario para mantener la carga de dicho primer número (n) de compresores centrífugos por encima del punto donde se activan los controles antibombeo; y
- 20 (d) durante los períodos donde la alimentación de gas es recibida por el sistema de compresión de múltiples etapas con un flujo igual a la capacidad máxima total para dicho segundo número (n-1) de compresores centrífugos, descargar un compresor centrífugo para poner dicho compresor en un modo de baja potencia o modo de desconexión donde dicho compresor no produce gas comprimido neto, mientras que simultáneamente carga los compresores centrífugos restantes a su capacidad máxima,
- 25 En otras palabras, el sistema de control simplemente supervisa el flujo de gas en la alimentación de gas al sistema de compresión de múltiples etapas y a continuación indica a cada compresor centrífugo que funcione según el proceso descrito en esta invención.
- 30

35 Por tanto, el sistema de control dicta la forma más eficiente de hacer funcionar el(los) compresor(es) centrífugo(s) del sistema de compresión de múltiples etapas, sin desconectar indebidamente los compresores centrífugos y/o preservar la electricidad, lo que permite que se "libere" más electricidad para otras partes del proceso, por ejemplo, la producción de gas o cualquier proceso aguas abajo, y/o permite una salida más estable de gas comprimido neto del sistema al evitar la activación de los controles antibombeo.

40 Electrolizadores

En algunas realizaciones preferidas, el gas para compresión es gas hidrógeno, preferiblemente producido por electrólisis del agua. Por tanto, en dichas realizaciones, el aparato comprende una pluralidad de electrolizadores para producir gas hidrógeno, en donde dicho extremo de alimentación de dicho sistema de compresión de múltiples etapas está en comunicación de flujo de fluido con dicha pluralidad de electrolizadores. Los electrolizadores se alimentan al menos en parte por electricidad generada a partir de dicho sistema de generación de electricidad.

45

50 La electrólisis del agua puede ser proporcionada por una pluralidad de unidades de electrólisis o "células". Cada unidad o célula puede denominarse como un "electrolizador".

La pluralidad de electrolizadores típicamente tiene una capacidad total de al menos 1 GW pero, en algunos casos, la capacidad puede ser inferior a 1 GW. La capacidad total máxima de los electrolizadores está limitada sólo por consideraciones prácticas, por ejemplo, generar suficiente energía a partir de la(s) fuente(s) de energía renovable(s) para alimentar la pluralidad de electrolizadores. Por tanto, los electrolizadores pueden 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, de aproximadamente 1,5 GW a aproximadamente 3 GW.

55

La pluralidad de electrolizadores en general consiste en un gran número, por ejemplo, cientos, de células individuales combinadas en "módulos" que también incluyen equipos de proceso, por ejemplo, bombas, enfriadores y/o separadores y los grupos de estos módulos se disponen típicamente en edificios separados.

60

Cada módulo típicamente tiene una capacidad máxima de al menos 10 MW, por ejemplo, 20 MW, y cada edificio típicamente tiene una capacidad total de al menos 100 MW, por ejemplo, 400 MW.

65

Se puede utilizar cualquier tipo adecuado de electrolizador con la presente invención. A este respecto, hay 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 uso con la presente invención.

5 Los electrolizadores alcalinos funcionan mediante el transporte de iones de hidróxido (OH^-) a través del electrolito desde el cátodo al ánodo, generándose hidrógeno en el lado del cátodo. Los electrolizadores que utilizan una solución alcalina líquida de hidróxido de sodio o hidróxido de potasio como electrolito están disponibles comercialmente. Los electrolizadores alcalinos comerciales funcionan típicamente a una temperatura en el intervalo de aproximadamente 100 °C a aproximadamente 150 °C.

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

20 Los electrolizadores de óxido sólido usan un material cerámico sólido como electrolito que 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 gas oxígeno y generar electrones para el circuito externo. Los electrolizadores de óxido sólido deben funcionar a temperaturas lo suficientemente altas como 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, típicamente se prefiere el uso de electrolizadores alcalinos y/o electrolizadores de PEM.

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

un primer cabezal para recoger gas hidrógeno de cada electrolizador en cada grupo; y

35 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;

40 En algunas realizaciones en donde el aparato comprende además un sistema de almacenamiento para almacenar gas hidrógeno comprimido, el aparato comprende además un conducto para alimentar gas hidrógeno comprimido desde un sistema de almacenamiento después de la disminución de presión adecuada al segundo cabezal.

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

Sistema de purificación

50 En algunas realizaciones donde hay uno o más 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 donde se purifica el gas hidrógeno comprimido.

55 El sistema de purificación comprenderá típicamente una unidad "DeOxo" donde el oxígeno se elimina mediante la combustión catalítica del hidrógeno para producir agua y gas hidrógeno comprimido pobre en oxígeno.

60 El gas pobre en oxígeno puede a continuación secarse en un secador, por ejemplo, una unidad de adsorción, tal como una unidad de adsorción por cambio de temperatura (TSA, por sus siglas), para producir gas hidrógeno comprimido seco para el(los) proceso(s) aguas abajo.

Unidad(es) de procesamiento aguas abajo

65 En algunas realizaciones, el aparato comprende al menos una unidad de procesamiento aguas abajo para consumir gas comprimido, estando dicha(s) unidad(es) de procesamiento aguas abajo en comunicación de flujo de fluido con dicho extremo de salida de dicho sistema de compresión de múltiples etapas.

Una unidad de procesamiento aguas abajo puede ser cualquier unidad que utilice gas (por ejemplo, gas hidrógeno) como materia prima de alimentación.

5 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 tanto una planta de síntesis de amoníaco como una planta de licuefacción de hidrógeno dispuestas en paralelo.

10 En realizaciones particularmente preferidas, la(s) unidad(es) de procesamiento aguas abajo incluyen una planta de síntesis de amoníaco, por ejemplo, utilizando el proceso de Haber (Haber-Bosch), y/o una planta de síntesis de metanol, por ejemplo, utilizando hidrogenación de CO₂.

Sistema de almacenamiento

15 En algunas realizaciones, el aparato comprende un sistema de almacenamiento para almacenar gas comprimido, estando dicho sistema de almacenamiento en comunicación de flujo de fluido con dicho extremo de salida de dicho sistema de compresión de múltiples etapas y al menos un compresor de dicho sistema de compresión de múltiples etapas.

20 El sistema de almacenamiento comprende típicamente una serie de recipientes a presión y/o segmentos de tubería conectados a un cabezal de entrada/salida común.

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

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

30 En algunas realizaciones, el aparato comprende un segundo sistema de control que controla no sólo la presión y el flujo de gas comprimido desde el sistema de compresión de múltiples etapas al sistema de almacenamiento, por ejemplo, durante los períodos donde la producción de gas excede la demanda, sino también la presión y el flujo de gas comprimido al sistema de almacenamiento de múltiples etapas, por ejemplo, durante los períodos donde la demanda de gas excede la producción.

35 Se apreciará que este segundo sistema de control podría ser integral con, o separado del sistema de control descrito anteriormente en relación con el(los) compresor(es) centrífugo(s).

40 En algunas realizaciones, el segundo sistema de control simplemente buscaría mantener la presión de gas en un cabezal aguas abajo a un proceso aguas abajo. Por tanto, con el fin de proporcionar continuamente una cantidad dada de gas al proceso aguas abajo, se mantendría un controlador de presión en un cabezal de descarga que alimenta el proceso aguas abajo.

45 Si la presión en el cabezal de descarga excediera la presión de alimentación requerida (por ejemplo, porque hay más gas disponible que el que consume el proceso aguas abajo), la presión se aliviaría abriendo una válvula en la línea de alimentación para el almacenamiento.

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

50 Si la presión en el cabezal de descarga cayera por debajo de la presión de alimentación requerida (por ejemplo, porque hay menos gas disponible que el que consume el proceso aguas abajo), la presión aumentaría al abrir una válvula en una primera línea de retorno desde el almacenamiento hasta una primera etapa en el sistema de compresión de múltiples etapas.

55 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 gas ha vuelto al nivel requerido, momento en el cual la válvula se cerraría, o hasta que la presión en el recipiente de almacenamiento caiga a aproximadamente la presión de entrada a la primera etapa del sistema de compresión de múltiples etapas que se alimenta por la primera línea de retorno.

60 En este último caso, no sólo 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 hasta una segunda etapa en el sistema de compresión de múltiples etapas (aguas arriba de la primera etapa) para continuar alimentando el gas desde el almacenamiento de vuelta al proceso aguas abajo.

65

Dicho sistema de control puede denominarse como un sistema de control de "intervalo dividido".

Ahora se describirá la invención a modo de ejemplo únicamente y con referencia a las figuras donde:

- 5 La FIG. 1 es un diagrama de flujo simplificado para una primera realización de la presente invención;
 La FIG. 2 es un diagrama de flujo simplificado para una segunda realización de la presente invención;
 10 La FIG. 3 es un diagrama de flujo simplificado para una tercera realización de la presente invención;
 La FIG. 4 es un gráfico lineal que proporciona un ejemplo simulado ilustrado del proceso de la presente invención en el contexto de tres compresores centrífugos dispuestos en paralelo.

15 Según la Fig. 1, el hidrógeno se produce a aproximadamente la presión atmosférica por electrólisis del agua en una pluralidad de unidades electrolizadoras indicadas en general por el número de referencia 2.

La electricidad requerida para alimentar los electrolizadores 2 se genera al menos en parte por fuentes de energía renovables (no se muestran) tales como el viento y/o el sol. Sin embargo, en algunas realizaciones, al menos parte de la electricidad adicional puede tomarse del almacenamiento de la batería en el sitio y/o generarse a partir de uno o más generadores que funcionan con gasolina, diésel o hidrógeno en el sitio, incluyendo las células de combustible y/o tomarse de una red eléctrica local o nacional (no mostrada).

20 Una corriente 4 de gas hidrógeno se retira de los electrolizadores 2 a una presión justo por encima de la presión atmosférica (por ejemplo, aproximadamente 0,11 MPa (1,1 bar)) y se alimenta a un sistema 100 de compresión de múltiples etapas para producir una corriente 36 de gas hidrógeno comprimido. En este ejemplo, el sistema 100 de compresión de múltiples etapas comprende tres compresores 10, 12 y 14 centrífugos, que están dispuestos en paralelo.

30 La corriente 4 tiene gas hidrógeno reciclado añadido, según sea necesario, para formar la corriente 6 combinada, que a continuación se alimenta al cabezal 8 antes de comprimirse en los compresores 10, 12 y 14 paralelos. El gas hidrógeno comprimido de cada uno de los compresores 10, 12 y 14 centrífugos se alimenta al cabezal 28 y forma la corriente 30 combinada de gas hidrógeno comprimido. La corriente 30 combinada puede tener opcionalmente gas extraído de ella para su reciclaje, antes de ser alimentada como corriente 36 a una etapa de compresión aguas abajo (no se muestra) o al menos un proceso aguas abajo (no se muestra).

35 El sistema 100 de compresión de múltiples etapas incluye un sistema 32 de reciclaje principal que elimina el gas de la corriente 30 combinada y, después de una disminución de presión adecuada en la válvula 34, lo alimenta a la entrada del sistema de compresión de múltiples etapas combinándolo con la corriente 4 para formar la corriente 6.

40 Cada compresor 10, 12 y 14 centrífugo también tiene un sistema 16, 18 y 20 de reciclaje local asociado con válvulas 22, 24 y 26 respectivamente, cada sistema de reciclaje local tiene control antibombeo. Cada sistema de reciclaje elimina el gas comprimido del extremo de producto y, después de una disminución de presión adecuada con una válvula (22, 24, 26), lo alimenta al extremo de alimentación del compresor centrífugo asociado.

45 Cada compresor 10, 12 y 14 centrífugo está conectado eléctricamente a un sistema de control, indicado por el número de referencia 40. El sistema 40 de control supervisa la cantidad de flujo de gas al sistema de compresión de múltiples etapas y, por consiguiente, controla la carga de los compresores 10, 12 y 14 centrífugos. La válvula del sistema (34) de reciclaje principal y las válvulas de los sistemas (22, 24 y 26) de reciclaje locales también están conectadas eléctricamente al sistema de control, de modo que la cantidad de reciclaje por parte de los sistemas de reciclaje, así como la cantidad de reciclaje por parte del sistema de reciclaje principal, se controla para implementar el proceso de la presente invención según sea necesario.

50 Aunque no se muestra en aras de la brevedad, el sistema 100 de compresión de múltiples etapas típicamente comprende enfriadores intermedios entre las etapas de compresión y los enfriadores posteriores después de una etapa final. También puede haber separadores de fases aguas arriba de cada etapa de compresión para eliminar el líquido de la corriente que entra en los compresores.

60 La Fig. 2 representa una segunda realización de la presente invención. Se han utilizado las mismas referencias numéricas para indicar las características del diagrama de flujo en la Fig. 2 que son comunes al diagrama de flujo de la Fig. 1. Lo siguiente es una descripción de las características que distinguen la primera realización de la Fig. 2 del proceso que se muestra en la Fig. 1.

65

Según la Fig. 2, el sistema de compresión de múltiples etapas tiene dos etapas de compresión representadas, una primera etapa 201 y una segunda etapa 202.

5 El gas comprimido del cabezal 28 forma una corriente 30 combinada que a continuación se alimenta al cabezal 48 de la segunda etapa 202. La segunda etapa comprende las mismas características que la primera etapa 201 de la Fig. 1, que incluyen tres compresores 50, 52 y 54 centrífugos con los sistemas y válvulas de reciclaje locales asociados.

10 En la Fig. 2, el sistema de reciclaje principal recicla el gas comprimido de la salida de la segunda etapa (corriente 70) y, después de una disminución de presión adecuada utilizando la válvula 34, lo alimenta a la entrada a la primera etapa como corriente 6. La corriente 76 contiene gas comprimido neto y se alimenta a una etapa de compresión aguas abajo (no se muestra) o al menos un proceso aguas abajo (no se muestra).

15 La corriente 80 muestra dónde se puede agregar el gas comprimido a una presión adecuada desde un sistema de almacenamiento adecuado, por ejemplo, cuando hay un flujo particularmente bajo de gas de los electrolizadores 2, y/o donde los electrolizadores 2 solos no pueden satisfacer la demanda del proceso aguas abajo (no mostrado). La corriente 80 puede añadir gas del almacenamiento alimentándolo a un punto entre etapas (corriente 30) entre las etapas 201 y 202.

20 La Fig. 3 representa una tercera realización de la presente invención. Se han utilizado las mismas referencias numéricas para indicar las características del diagrama de flujo en la Fig. 3 que son comunes al diagrama de flujo de la Fig. 2. Lo siguiente es una descripción de las características que distinguen la primera realización de la Fig. 3 del proceso que se muestra en la Fig. 2.

25 Con respecto a la Fig. 3, se muestra un diseño simplificado del sistema de compresión de múltiples etapas representado en la Fig. 2. En esta figura, el sistema 300 de compresión de múltiples etapas aún comprende dos etapas, 301 y 302. Sin embargo, los sistemas 16, 18 y 20 de reciclaje locales reciben gas de la salida de un compresor (50, 52 o 54) en la segunda etapa 302 y, después de la disminución de presión adecuada con las válvulas (22, 24 o 26), alimentan gas a presión reducida a la entrada de un compresor diferente, pero correspondiente en serie dentro de la primera etapa 301.

30 Por tanto, en comparación con la disposición de la Fig. 2, esta disposición tiene tres sistemas de reciclaje menos y se requieren tres válvulas menos. Por lo tanto, permite un diseño más simple y rentable del sistema de compresión de múltiples etapas que es más simple de funcionar. Sin embargo, tenga en cuenta que no se puede alimentar gas desde el almacenamiento hasta una etapa intermedia.

35 La Fig. 4 es un gráfico lineal que ilustra un ejemplo de cómo un sistema de compresión de múltiples etapas tal como el representado en la Fig. 1 puede funcionar según el proceso de la presente invención. Estos datos se han generado utilizando Microsoft Excel y pueden no reflejar con precisión lo observado en un ejemplo del mundo real.

40 En este ejemplo, hay tres (N) compresores centrífugos, cada uno con una capacidad de reducción del 80 %. Para simplificar, este ejemplo supone una disminución lineal en el flujo de la alimentación de gas a partir de un flujo del 100 % durante 100 horas a una velocidad del 1 % por hora. Este gráfico no muestra ningún flujo de gas de reciclaje local, o parte de la fase de descarga de los compresores centrífugos. En realidad, se esperaría que el flujo de la alimentación de gas fluctuara ampliamente durante este período de tiempo en lugar de disminuir constantemente. Sin embargo, el ejemplo pretende simplemente ilustrar el proceso.

45 En el número de referencia 400 (0 horas), el flujo de alimentación de gas es el 100 % de la capacidad de los tres (n) compresores centrífugos que producen gas comprimido neto (mostrado con la línea 410). Por lo tanto, el primer número (n) de compresores centrífugos es 3. El flujo de alimentación de gas es igual a la capacidad máxima total de los tres compresores centrífugos (100 %), por lo que los tres compresores están a plena carga (100 %) comprimiendo toda la alimentación de gas. Esto corresponde a los períodos especificados en (a) según la invención.

50 De 1 a 19 horas, a medida que el flujo de la alimentación de gas se reduce por debajo del 100 %, los tres (n) compresores centrífugos se apagan por consiguiente para que coincidan con el flujo de la alimentación de gas (de 1 a 20 horas). Esto corresponde a los períodos especificados en (b) según la invención.

55 De 1 a 19 horas, a medida que el flujo de la alimentación de gas se reduce por debajo del 100 %, los tres (n) compresores centrífugos se apagan por consiguiente para que coincidan con el flujo de la alimentación de gas (de 1 a 20 horas). Esto corresponde a los períodos especificados en (b) según la invención.

60 En el número de referencia 401 (20 horas), el flujo de la alimentación de gas alcanza la capacidad de reducción máxima total de los tres compresores (80 %, mostrado con la línea 440). Es decir, justo por encima del punto donde se activa el control antibombeo para los tres compresores centrífugos. Con el fin de evitar que se activen los controles antibombeo, el sistema de reciclaje principal comienza a introducir gas reciclado a través de los (n) compresores centrífugos para mantener la carga justo por encima del punto donde se activa el control antibombeo. De 20 a 33 horas, el flujo de la alimentación de gas cae aún más por debajo de este punto, por lo que el sistema de reciclaje principal introduce más flujo de gas reciclado para compensar. Esto corresponde a

los períodos especificados en (c) según la invención.

5 En el número de referencia 402 (33 horas), el flujo de la alimentación de gas es igual a la capacidad máxima total para 2 compresores centrífugos, es decir, el segundo número $(n-1)$ de los compresores centrífugos (66 %, mostrado con la línea 420). Por lo tanto, en este punto, un compresor centrífugo se descarga y se pone en modo de baja potencia o se desconecta, mientras que los dos compresores centrífugos restantes se cargan simultáneamente a su capacidad máxima (66 % del flujo total para dos compresores, mostrado con la línea 420). En este punto (con el número de referencia 403), dado que la carga para los dos compresores restantes está ahora por encima de los puntos de control antibombeo para ambos compresores (54 %) (mostrados como una línea con el número de referencia 450), ya no hay necesidad de reciclar gas utilizando el sistema de reciclaje principal.

15 En el número de referencia 403, la cantidad de gas reciclado cae a cero, lo que idealmente sería la forma más eficiente de hacer funcionar el sistema. Sin embargo, se apreciará que en la práctica el cambio puede ser más gradual para evitar choques en el flujo del sistema y para acomodar cambios más graduales en la carga para los compresores centrífugos.

20 El proceso se repite como anteriormente, pero para 2 compresores, ya que ahora solamente hay dos compresores en funcionamiento que producen gas comprimido neto (con el otro en baja potencia o desconectado).

25 Entre los números de referencia 403 y 404, el flujo de alimentación de gas permite apagar los dos compresores sin reciclar. En 404, se requiere el reciclaje para mantener la carga de dos (n) compresores por encima de sus puntos de control antibombeo (mostrados con la línea 450). En el número de referencia 405, el flujo de alimentación de gas alcanza la capacidad máxima total para un compresor, ya que $(n-1) = (2-1) = 1$. En este punto, uno de los dos compresores se descarga y se desconecta o se pone en modo de baja potencia, y el último compresor restante funciona a carga máxima para un compresor (33 %, mostrado con la línea 430) para comprimir el flujo de la alimentación de gas (33 %). Desde el número de referencia 406 al 407, el compresor final puede ajustarse en base al flujo de la alimentación de gas. Sin embargo, en 407, el flujo de la alimentación de gas alcanza justo por encima del punto de control antibombeo (27 %, mostrado con la línea 460) para el (n) compresor final y el sistema de reciclaje principal requiere el reciclaje para garantizar que la carga del (n) compresor final se mantenga por encima de su punto de control antibombeo (27 %), agregándose más gas reciclado cuanto menor sea la caída del flujo de alimentación de gas.

35 La Fig. 4 demuestra cómo el sistema de compresión de múltiples etapas de la Fig. 1 puede funcionar de manera que responda dinámicamente a los cambios en el flujo de alimentación de gas, incluido el apagado secuencial de los compresores o su puesta en un modo de baja potencia mientras se equilibra simultáneamente la carga de los compresores restantes con menos (o ningún) reciclaje del sistema de reciclaje principal.

40 Se puede observar en la Fig. 4 que la línea para la cantidad de flujo de gas comprimido neto sigue el flujo de la alimentación de gas desde los electrolizadores, sin requerir un reciclaje innecesario, desconexión de todos los compresores o desperdicio de electricidad innecesario. Esto demuestra cómo el procedimiento de la invención es capaz de hacer funcionar los compresores centrífugos de forma segura al mantener su carga justo por encima de las líneas de control antibombeo mientras se comprime de manera eficiente una alimentación de gas que tiene un flujo variable que varía desde un flujo del 100 % hasta un flujo del 0 %.

50 La descripción anterior se ha presentado para ilustrar y describir ejemplos de los principios descritos. Esta descripción no pretende ser exhaustiva o limitar estos principios a cualquier forma precisa descrita. Son posibles muchas modificaciones y variaciones a la luz de la enseñanza anterior. El alcance de la invención se define mediante las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un proceso de funcionamiento de un sistema de compresión de múltiples etapas que comprime una alimentación de gas que tiene un caudal variable,

5

comprendiendo dicho sistema (100, 200, 300) de compresión de múltiples etapas un extremo de alimentación, una pluralidad (N) de compresores (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugos en paralelo, un extremo de producto y un sistema (32, 34) de reciclaje principal para reciclar gas a través de la pluralidad (N) de compresores (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugos, en donde cada compresor (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugo comprende una entrada, una salida y un sistema (16, 18, 20, 22, 24, 26) de reciclaje local con control antibombeo para reciclar gas de la salida a la entrada, comprendiendo dicho proceso:

10

(a) durante los períodos en que la alimentación de gas es recibida por el sistema (100, 200, 300) de compresión de múltiples etapas con un flujo igual a la capacidad máxima total de un primer número (n) de compresores centrífugos que producen gas comprimido neto, hacer funcionar dicho primer número (n) de compresores (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugos a plena carga para comprimir la alimentación de gas;

15

(b) durante los períodos en que la alimentación de gas es recibida por el sistema (100, 200, 300) de compresión múltiples etapas con un flujo en un intervalo que va de menos de la capacidad máxima total de dicho primer número (n) de compresores (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugos(a la capacidad de reducción total de dicho primer número (n) de compresores (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugos, hacer funcionar dicho primer número (n) de compresores (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugos a una carga mínima para comprimir la alimentación de gas, siendo dicha carga mínima determinada en base al flujo de la alimentación de gas;

20

25

(c) durante los períodos en que la alimentación de gas es recibida por el sistema (100, 200, 300) de compresión de múltiples etapas con un flujo en un intervalo que va de menos de la capacidad de reducción total del primer número (n) de compresores (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugos a más de la capacidad máxima total para un segundo número (n-1) de compresores (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugos que producen gas comprimido neto, reciclar el gas comprimido utilizando el sistema (32, 34) de reciclaje principal según sea necesario para mantener la carga de dicho primer número (n) de compresores (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugos por encima del punto donde se activan los controles antibombeo; y

30

35

(d) durante los períodos en que la alimentación de gas es recibida por el sistema (100, 200, 300) de compresión de múltiples etapas con un flujo igual a la capacidad máxima total para dicho segundo número (n-1) de compresores (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugos, descargar un compresor (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugo para poner dicho compresor en un modo de baja potencia o modo de apagado donde dicho compresor no produce gas comprimido neto, mientras se cargan simultáneamente los compresores (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugos restantes a la capacidad máxima,

40

en donde el proceso es reversible en cualquier punto, y en donde n es un número entero igual o inferior a N.

45

2. El proceso según la reivindicación 1, en donde el gas para compresión es un gas hidrógeno producido por electrólisis de agua, en donde el gas hidrógeno se produce al menos en parte utilizando electricidad generada a partir de al menos una fuente de energía renovable.

50

3. Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde, durante los períodos especificados en (b), la capacidad de reducción de cada compresor (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugo se define como el flujo mínimo de gas que puede ser comprimido por el compresor (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugo sin activación de su control antibombeo.

55

4. Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde, durante los períodos especificados en (b), la capacidad de reducción de cada compresor (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugo es del 60 % o más del flujo de gas máximo a través del compresor (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugo.

60

5. Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde, durante los períodos especificados en (b), el flujo de la alimentación de gas se distribuye uniformemente a través de todos los (n) compresores (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugos a una carga mínima.

65

6. Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde, durante los períodos especificados en (c), la cantidad de reciclaje de gas comprimido se mantiene en una cantidad mínima para ahorrar electricidad.

7. Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde, durante los períodos especificados en (d), la descarga del compresor (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugo comprende primero reducir el flujo de gas comprimido neto a través de dicho compresor (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugo a cero utilizando el sistema (16, 18, 20, 22, 24, 26) de reciclaje local, y en segundo lugar reduciendo la carga de dicho compresor (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugo.
8. Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde poner un compresor (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugo en modo de baja potencia comprende reducir la velocidad del rotor del compresor (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugo a una velocidad que aún es suficiente para evitar el contacto de las caras de sellado opuestas de un sellado de gas seco dentro del compresor (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugo.
9. Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la descarga para poner un compresor (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugo en dicho modo de baja potencia comprende reducir su velocidad de rotor dentro de un intervalo de aproximadamente 100 rpm a aproximadamente 1500 rpm y hacer funcionar de manera que no produzca gas comprimido neto.
10. Un proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde, durante el funcionamiento en dicho modo de baja potencia, el compresor (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugo está funcionando con una potencia de aproximadamente el 20 % o menos con respecto a la potencia máxima y no produce gas comprimido neto.
11. Un proceso de suministro de gas hidrógeno comprimido para consumo en al menos un proceso aguas abajo, comprendiendo:
- producir dicho gas hidrógeno a partir de electrólisis de agua,
- comprimir dicho gas hidrógeno en un sistema de compresión de múltiples etapas que funciona según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, y
- alimentar dicho gas hidrógeno comprimido a al menos un proceso aguas abajo para su consumo en dicho(s) proceso(s) aguas abajo.
12. Un aparato para comprimir una alimentación de gas que tiene un caudal variable, comprendiendo dicho aparato:
- un sistema de compresión de múltiples etapas comprendiendo un extremo de alimentación, una pluralidad (N) de compresores (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugos en paralelo, un extremo de producto, y un sistema (32, 34) de reciclaje principal para reciclar gas a través de la pluralidad (N) de compresores (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugos, en donde cada compresor (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugo comprende una entrada, una salida y un sistema (16, 18, 20, 22, 24, 26) de reciclaje local con control antibombeo que recicla el gas de la salida a la entrada; caracterizado por que el aparato comprende:
- un sistema (40) de control para controlar la carga de cada compresor (10, 12, 14, 50, 52, 54) centrífugo y para controlar la cantidad de reciclaje por el sistema (32, 34) de reciclaje principal y el sistema (16, 18, 20, 22, 24, 26) de reciclaje local según el procedimiento de la reivindicación 1, en base al flujo del gas de alimentación.
13. Un aparato según la reivindicación 12, comprendiendo: un sistema de generación de electricidad para generar electricidad a partir de al menos una fuente de energía renovable, y en donde el gas para compresión se produce al menos en parte utilizando electricidad generada a partir de dicho sistema de generación de electricidad.
14. Un aparato según la reivindicación 13, en donde el gas para compresión es gas hidrógeno, comprendiendo el aparato:
- una pluralidad de electrolizadores (2) para producir dicho gas hidrógeno,
- en donde los electrolizadores (2) funcionan al menos en parte con electricidad generada a partir de dicho sistema de generación de electricidad, y en donde dicho extremo de alimentación de dicho sistema (100, 200, 300) de compresión de múltiples etapas está en comunicación de flujo de fluido con dicha pluralidad de electrolizadores (2).
15. Un aparato según cualquiera de las reivindicaciones 12 a 14, comprendiendo al menos una unidad de procesamiento aguas abajo para consumir gas comprimido, estando dicha(s) unidad(es) de procesamiento aguas abajo en comunicación de flujo de fluido con dicho extremo de salida de dicho sistema (100, 200, 300) de compresión de múltiples etapas.

DIBUJOS

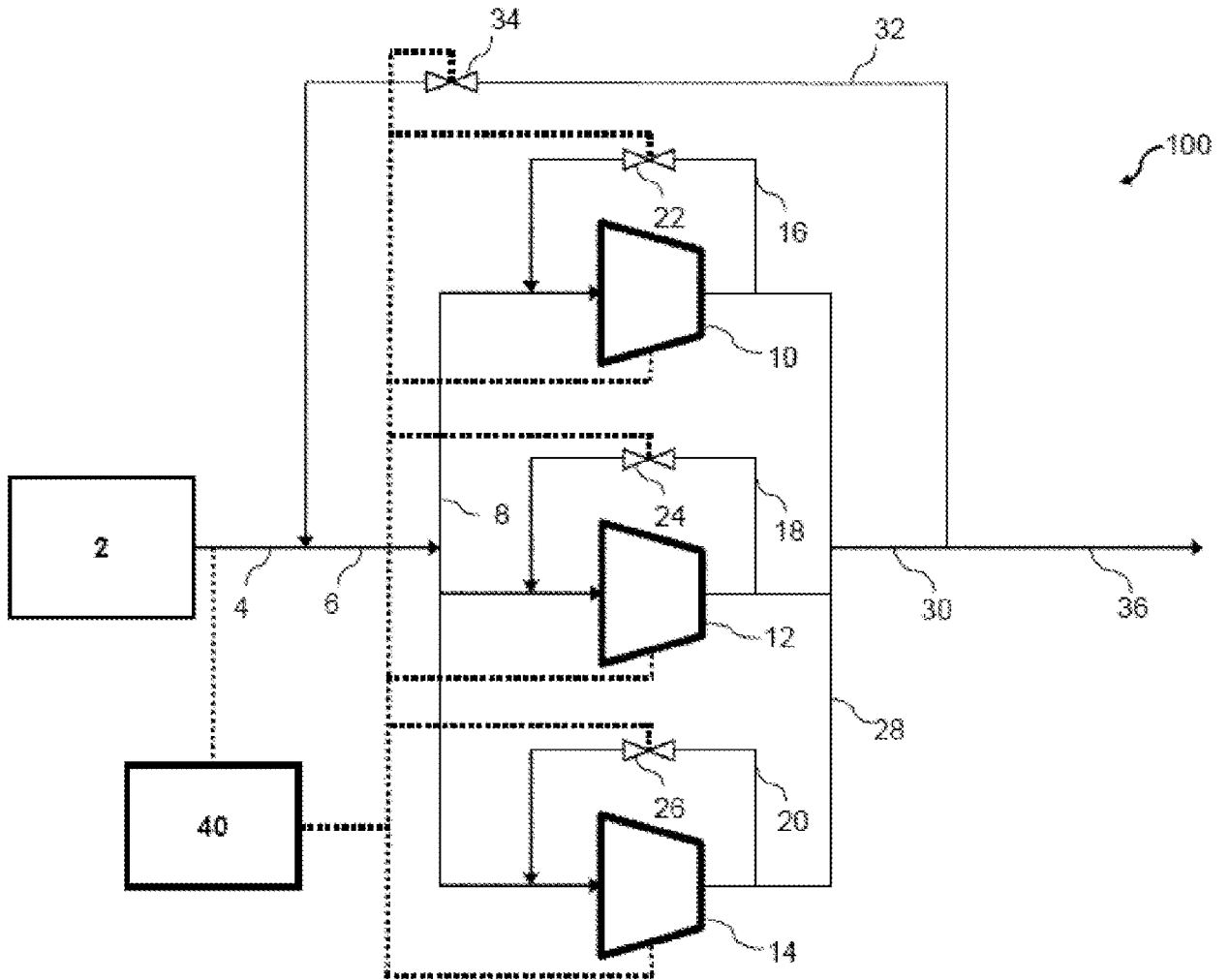


FIG. 1

