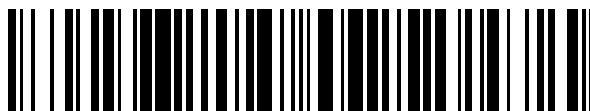


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 688 804**

51 Int. Cl.:

C01B 32/50	(2007.01) F17C 9/04	(2006.01)
B01D 53/62	(2006.01)	
C01B 32/60	(2007.01)	
F01K 13/00	(2006.01)	
F01K 25/10	(2006.01)	
F02C 1/08	(2006.01)	
F02C 3/34	(2006.01)	
F02C 7/143	(2006.01)	
F23J 15/02	(2006.01)	
F23L 7/00	(2006.01)	

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **03.09.2015 PCT/US2015/048340**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **17.03.2016 WO16040108**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.09.2015 E 15774742 (9)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.08.2018 EP 3204331**

54 Título: **Producción de dióxido de carbono líquido de baja presión procedente de un sistema de producción de energía y método**

30 Prioridad:

09.09.2014 US 201462047744 P

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

07.11.2018

73 Titular/es:

**8 RIVERS CAPITAL, LLC (100.0%)
406 Blackwell Street, 4th Floor
Durham, North Carolina 27701, US**

72 Inventor/es:

**ALLAM, RODNEY JOHN;
FORREST, BROCK ALAN y
FETVEDT, JEREMY ERON**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 688 804 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

Producción de dióxido de carbono líquido de baja presión procedente de un sistema de producción de energía y método

Campo de la descripción

- 5 El tema actualmente descrito se refiere a sistemas y métodos para la producción de dióxido de carbono líquido. Particularmente, el dióxido de carbono líquido puede ser una corriente de baja presión de dióxido de carbono formado a partir de dióxido de carbono producido en un sistema y método de producción de energía, específicamente en un sistema y método que usa dióxido de carbono como un fluido de trabajo.

Antecedentes

- 10 La captura y el secuestro del carbono (CCS, por sus siglas en inglés) es una consideración clave de cualquier sistema o método que produzca dióxido de carbono (CO₂). Esto es particularmente relevante para la producción de energía mediante la combustión de un combustible fósil u otro material que contenga hidrocarburos. Se han sugerido varios métodos de producción de energía donde se puede lograr CCS (por sus siglas en inglés). Una publicación en el campo de la generación de energía de alta eficiencia con CCS (por sus siglas en inglés), el Documento de Patente de los EE.UU. de Número 8.596.075 de Allam et al., prevé eficiencias deseables en los sistemas de combustión de oxí-combustible de ciclo cerrado que usan una corriente de CO₂ de recicló. En tal sistema, se captura el CO₂ como una corriente relativamente pura a alta presión.

- 20 Las propuestas actuales para la eliminación del CO₂ a menudo requieren el transporte en tuberías de alta presión como un fluido supercrítico de alta densidad a presiones de 10 MPa (100 bar) a 25 MPa (250 bar). Dichas tuberías requieren de altos desembolsos de capital. El CO₂ en tuberías se secuestra en una formación geológica subterránea, tal como un acuífero salino profundo, o se puede usar para obtener una ventaja económica, como tal como para la recuperación mejorada de petróleo (EOR, por sus siglas en inglés).

- 25 El uso de CO₂ para la EOR (por sus siglas en inglés) requiere de su disponibilidad en un área amplia de una región rica en petróleo. Esto requeriría el uso extensivo de una red de tuberías que se extendiera por la región. Esto se vuelve prohibitivamente costoso en muchos usos, particularmente en los campos petrolíferos de mar adentro. Por lo tanto, sería útil proporcionar cantidades masivas de CO₂ (tales como las producidas a partir de un sistema y método de producción de energía) en forma líquida que serían más fáciles de enviar a las plataformas de producción de petróleo de mar adentro. Se pueden prever otros usos beneficiosos del CO₂ recogido de instalaciones de producción de energía, si se pudiera proporcionar el CO₂ en una forma licuada.

Resumen de la descripción

- 30 La presente descripción proporciona sistemas y métodos útiles en la producción de CO₂ líquido. Los sistemas y métodos descritos pueden hacer uso de CO₂ procedente de cualquier fuente. Los sistemas y métodos, sin embargo, pueden ser particularmente beneficiosos en relación con un sistema y método que produce una corriente de CO₂ de alta presión, particularmente una corriente de CO₂ de alta presión a temperatura próxima a la ambiente. Los presentes sistemas y métodos son aún más beneficiosos en que se puede producir CO₂ líquido con una pureza sustancialmente alta, en particular con bajos niveles de oxígeno, nitrógeno, y gases nobles (por ejemplo, Argón).

- 35 En ciertas realizaciones, una fuente de CO₂ que se puede usar para la producción de CO₂ líquido puede ser un sistema de producción de energía, en particular sistemas y métodos de combustión oxí-combustible, y más en particular métodos de combustión que usan un fluido de trabajo de CO₂. Sistemas y métodos para la producción de energía en donde se puede obtener una corriente de CO₂ se describen en el Documento de Patente de los Estados Unidos de Número 8.596.075, el Documento de Patente de los EE.UU. de Número 8.776.532, el Documento de Patente de los EE.UU. de Número 8.959.887, el Documento de Patente de los EE.UU. de Número 8.986.002, el Documento de Patente de los EE.UU. de Número 9.068.743, la Publicación de los EE.UU. de Número 2010/0300063, la Publicación de los EE.UU. de Número 2012/0067054, la Publicación de los EE.UU. de Número 2012/0237881, y la Publicación de los EE. UU. de Número 2013/0213049.

- 40 En algunas realizaciones, la presente descripción se refiere a los métodos para la producción de una corriente de dióxido de carbono (CO₂) líquido de baja presión. Tales métodos pueden comprender proporcionar una corriente de CO₂ de alta presión a una presión de aproximadamente 6 MPa (60 bar) o mayor, de aproximadamente 10 MPa (100 bar) o mayor, o en un intervalo de presión como se describe de otro modo en la presente invención. Los métodos pueden comprender además la división de una porción de la corriente de CO₂ de alta presión y la expansión de la porción para formar una corriente de enfriamiento que puede ser útil como un refrigerante. Por ejemplo, la corriente de enfriamiento puede estar a una temperatura de aproximadamente -20°C o menos o en un intervalo de temperatura como se describe de otro modo en la presente invención. Los métodos pueden comprender además enfriar la corriente de CO₂ de alta presión a una temperatura de aproximadamente 5°C o menos (preferiblemente aproximadamente a -10°C o menos) haciendo pasar la corriente de CO₂ de alta presión a través de un intercambiador de calor en una relación de intercambio de calor con la corriente de enfriamiento. Los métodos pueden comprender además expandir la corriente de CO₂ de alta presión a fin de formar una corriente de CO₂ de baja presión a una presión de hasta aproximadamente 0,6 MPa (6 bar). Los métodos pueden comprender además hacer pasar la corriente de CO₂ de baja

presión a través de un separador eficaz para separar una corriente de vapor de la misma y proporcionar la corriente de CO₂ líquido de baja presión.

En realizaciones adicionales, la presente descripción se refiere a sistemas útiles en la producción de una corriente de dióxido de carbono (CO₂) líquido de baja presión. En algunas realizaciones, tales sistemas pueden comprender uno o más componentes adaptados para proporcionar una corriente de CO₂ de alta presión, uno o más intercambiadores de calor, uno o más expansores (por ejemplo, válvulas), uno o más separadores, y uno o más destiladores. En un ejemplo no limitativo, un sistema según la presente descripción puede comprender: tubería adaptada para el paso de una corriente de CO₂ de alta presión; un divisor adaptado para dividir la corriente de CO₂ de alta presión en una fracción de enfriamiento y en una corriente principal; un expansor adaptado para expandir y enfriar la fracción de enfriamiento de la corriente de CO₂ de alta presión; un intercambiador de calor adaptado para enfriar la corriente de CO₂ de alta presión principal contra la fracción de enfriamiento enfriada y expandida de la corriente de CO₂ de alta presión; un expansor adaptado para expandir y enfriar de la corriente de CO₂ de alta presión principal para formar una corriente de CO₂ de baja presión de dos fases; un separador adaptado para eliminar una fracción de vapor de la corriente de CO₂ de baja presión de dos fases; y un destilador adaptado para eliminar al menos una porción de componentes que no son CO₂ y proporcionar una corriente de CO₂ líquido de baja presión.

En aún otras realizaciones, la presente descripción se refiere a los métodos para la producción de una corriente de dióxido de carbono (CO₂) líquido de baja presión a partir de una corriente de CO₂ de alta presión procedente de un proceso de producción de energía. En algunas realizaciones, tal método puede comprender la combustión de un combustible carbonoso o un combustible a base de hidrocarburos en una cámara de combustión en presencia de oxígeno y una corriente de CO₂ de reciclado a una presión de aproximadamente 10 MPa (100 bar) o mayor y a una temperatura de aproximadamente 400°C o mayor para formar una corriente de salida de la cámara de combustión que comprende CO₂. La corriente de salida de la cámara de combustión en particular puede estar a una presión de aproximadamente 20 MPa (200 bar) a aproximadamente 40 MPa (400 bar). La corriente de salida de la cámara de combustión en particular puede estar a una temperatura de aproximadamente 800°C a aproximadamente 1.600°C. El método además puede comprender expandir la corriente de salida de la cámara de combustión en una turbina para generar energía y formar una corriente de salida de la turbina que comprende CO₂ a una presión de aproximadamente 5 MPa (50 bar) o menos. La corriente de salida de la turbina en particular puede estar a una presión de aproximadamente 2 MPa (20 bar) a aproximadamente 4 MPa (40 bar). El método además puede comprender enfriar la corriente de salida de la turbina en un intercambiador de calor con el calor transferido a la corriente de CO₂ de reciclado de calentamiento. El enfriamiento puede ser a una temperatura de aproximadamente 80°C o menos, tal como a temperatura próxima a la ambiente. El método también puede comprender enfriar adicionalmente la corriente de salida de la turbina contra los medios de enfriamiento ambiental y separar el agua condensada en un separador. El método además puede comprender bombear el CO₂ desde la presión a la salida de la turbina a una presión de aproximadamente 10 MPa (100 bar) o mayor para formar una corriente de CO₂ de alta presión. En particular, la corriente de CO₂ de alta presión puede estar a una presión de aproximadamente 10 MPa (100 bar) a aproximadamente 50 MPa (500 bar) o de aproximadamente 20 MPa (200 bar) a aproximadamente 40 MPa (400 bar). El CO₂ procedente de la corriente de salida de la turbina enfriada se puede comprimir a una primera presión, enfriarlo para aumentar su densidad, y luego bombearlo a la segunda presión mayor en el intervalo indicado anteriormente. Una porción de la corriente de CO₂ de alta presión se puede hacer pasar de nuevo a través del intercambiador de calor para ser calentada contra la corriente de salida de la turbina de enfriamiento antes de pasar de nuevo a la cámara de combustión. También se puede aplicar un calentamiento adicional a la corriente después de la compresión y antes del paso a la cámara de combustión, dicho calentamiento adicional proviene de una fuente distinta de la corriente de salida de la turbina. Una porción de la corriente de CO₂ a alta presión (cuya porción puede comprender cualquier CO₂ neto producido en una combustión) se puede enfriar a una temperatura de aproximadamente 5°C o menos, tal como, por ejemplo, en un intercambiador de calor que usa un refrigerante. El refrigerante puede comprender una porción de la corriente de CO₂ de alta presión que se puede usar como una fracción de enfriamiento mediante la expansión de la porción a una presión que es de aproximadamente 3 MPa (30 bar) o menos, pero está por encima de la presión del punto triple del CO₂. La fracción de enfriamiento puede estar a una temperatura de aproximadamente 0°C o menos o aproximadamente a -20°C o menos. En realizaciones particulares, la fracción de enfriamiento de la corriente de CO₂ de alta presión se puede enfriar a una temperatura de aproximadamente -55°C a aproximadamente 0°C. La porción de la corriente de CO₂ de alta presión que se enfría en el intercambiador de calor contra la fracción de enfriamiento de CO₂ se puede expandir a una presión de hasta aproximadamente 0,6 MPa (6 bar) (preferiblemente siempre manteniendo una presión superior a la presión del punto triple del CO₂) a fin de formar una corriente de CO₂ líquido de baja presión. En particular, la porción enfriada de la corriente de CO₂ de alta presión se puede expandir a una presión que es de aproximadamente 3 MPa (30 bar) o menos, pero está por encima de la presión del punto triple del CO₂.

Los métodos como se describen anteriormente pueden comprender elementos adicionales. Por ejemplo, el enfriamiento de la corriente de salida de la turbina puede estar particularmente a una temperatura de aproximadamente 70°C o menos o de aproximadamente 60°C o menos. Se puede usar un intercambiador de calor o una pluralidad de intercambiadores de calor. Por ejemplo, se puede usar un intercambiador de calor economizador seguido de un intercambiador de calor de agua fría. Después del enfriamiento, los métodos también pueden comprender hacer pasar la corriente de salida de la turbina que comprende CO₂ a través de uno o más separadores para eliminar al menos el agua de la misma. Además, antes de dicha etapa de bombeo, los métodos pueden comprender comprimir la corriente de salida de la turbina que comprende CO₂ a una presión de hasta aproximadamente 8 MPa (80 bar) (por ejemplo, de una presión de aproximadamente 6 MPa (60 bar) a aproximadamente 8 MPa (80 bar)). Aún más, los métodos pueden

comprender el aumento de la densidad de la corriente de salida de la turbina que comprende CO₂, tal como mediante enfriamiento de la corriente en un intercambiador de calor de agua fría. La densidad, por ejemplo, se puede aumentar a aproximadamente 600 kg/m³ o más, aproximadamente 700 kg/m³ o más, o aproximadamente 800 kg/m³ o más. La corriente de salida de la turbina se puede comprimir antes de aumentar la densidad de la corriente.

- 5 Los métodos pueden comprender, además, después de dicho enfriamiento de la corriente principal de CO₂ de alta presión, en un intercambiador de calor y antes de dicha expansión, hacer pasar la corriente principal de CO₂ de alta presión a través de un evaporador. El evaporador se puede combinar particularmente con un destilador (por ejemplo, una columna de extracción). Como tal, el evaporador puede proporcionar calefacción al destilador.

- 10 Los métodos pueden comprender además el procesamiento de la corriente principal de CO₂ líquido de baja presión. Por ejemplo, la corriente de CO₂ líquido de baja presión puede ser un material de dos fases que incluye la fase líquida y una fase vapor. Por lo tanto, los métodos pueden comprender hacer pasar la corriente de CO₂ líquido de baja presión a través de un separador eficaz para separar una corriente de vapor de la misma. En algunas realizaciones, la corriente de vapor puede comprender hasta aproximadamente el 8 % (particularmente hasta aproximadamente el 4 %, o hasta aproximadamente el 6 %) en masa de la corriente de CO₂ líquido de baja presión que se hace pasar a través del
 15 separador. En algunas realizaciones, la corriente de vapor puede comprender de aproximadamente el 1 % a aproximadamente el 75 % en masa de CO₂. En algunas realizaciones, la corriente de vapor puede comprender de aproximadamente el 25 % a aproximadamente el 99 % en masa de una combinación de N₂, O₂, y argón (o gases inertes adicionales). Los métodos también pueden comprender hacer pasar la corriente restante de CO₂ líquido de baja presión (por ejemplo, después de extraer la fase de vapor de la misma) a través de un destilador, tal como una
 20 columna de extracción (que puede incluir el evaporador, como se discutió anteriormente).

- Después de la etapa de destilación, el CO₂ líquido se puede proporcionar a una bomba para aumentar su presión a un valor deseado. La corriente fría de descarga procedente de la bomba se puede suministrar a un intercambiador de calor aguas arriba del evaporador para complementar la capacidad de enfriamiento del CO₂ de alta presión que se expande para crear un refrigerante. El CO₂ refrigerante calentado y/o la corriente de cabeza procedente de una
 25 columna de destilación de extracción se pueden proporcionar a un compresor que descarga el flujo a una presión compatible con el sistema donde se originó la corriente de CO₂ de alta presión. La corriente de fase de vapor procedente del separador también se puede proporcionar a un sistema para realizar procesos de separación adicionales. Alternativamente, se puede ventear la corriente de fase de vapor.

- 30 La corriente de CO₂ líquido de baja presión proporcionada según la presente descripción, en particular, puede tener sólo una muy baja concentración de oxígeno. En algunas realizaciones, la corriente de CO₂ líquido de baja presión puede tener un contenido de oxígeno de no más de aproximadamente 25 ppm, en particular no más de aproximadamente 10 ppm. La corriente de CO₂ líquido de baja presión también puede tener una concentración baja similar de gases inertes, tales como nitrógeno y argón.

- 35 Como ejemplos no limitativos, la presente descripción se puede relacionar con las siguientes realizaciones. Dichas realizaciones pretenden ser ilustrativas de la naturaleza más amplia de la divulgación como un todo.

- En algunas realizaciones, la presente descripción puede proporcionar métodos para la producción de una corriente de CO₂ líquido de baja presión. Por ejemplo, tal método puede comprender: realizar la combustión de un combustible carbonoso o de un combustible de hidrocarburos con oxígeno en una cámara de combustión en presencia de una corriente de CO₂ de reciclaje a una presión de aproximadamente 100 MPa (100 bar) o mayor y a una temperatura de
 40 aproximadamente 400°C o mayor para formar una corriente de salida de la cámara de combustión que comprende CO₂; expandir la corriente de salida de la cámara de combustión en una turbina para generar energía y formar una corriente de salida de la turbina que comprende CO₂ a una presión de aproximadamente 5 MPa (50 bar) o menos; enfriar la corriente de salida de la turbina en un primer intercambiador de calor para formar una corriente de salida de la turbina enfriada; bombear el CO₂ procedente de la corriente de salida de la turbina enfriada a una presión de
 45 aproximadamente 10 MPa (100 bar) o mayor para formar una corriente de CO₂ de alta presión; dividir la corriente de CO₂ de alta presión en una porción principal y una porción de enfriamiento; expandir la porción de enfriamiento de la corriente de CO₂ de alta presión para reducir la temperatura de la misma a aproximadamente -20°C o menos; enfriar la porción principal de la corriente de CO₂ de alta presión a una temperatura de aproximadamente 5°C o menos haciendo pasar la porción principal de la corriente de CO₂ de alta presión a través de un segundo intercambiador
 50 de calor contra la porción de enfriamiento expandida de la corriente de CO₂ de alta presión; y expandir la porción principal enfriada de la corriente de CO₂ de alta presión a una presión que es de aproximadamente 3 MPa (30 bar) o menos, pero que es mayor que la presión del punto triple del CO₂ a fin de formar la corriente de CO₂ líquido de baja presión. En realizaciones adicionales, dicho método puede incluir una o más de las siguientes declaraciones, que se pueden combinar en cualquier número y en cualquier combinación. Además, dicho método puede incluir cualesquiera
 55 elementos adicionales como se describe de otro modo en la presente invención.

La corriente de salida de la cámara de combustión puede estar a una presión de aproximadamente 20 MPa (200 bar) a aproximadamente 40 MPa (400 bar).

La corriente de salida de la cámara de combustión puede estar a una temperatura de aproximadamente 800°C a aproximadamente 1.600°C.

La corriente de salida de la turbina que comprende CO₂ puede estar a una presión de aproximadamente 2 MPa (20 bar) a aproximadamente 4 MPa (40 bar).

La corriente de salida de la turbina se puede enfriar en el intercambiador de calor a una temperatura de aproximadamente 80°C o menos.

- 5 El método además puede comprender hacer pasar la corriente de salida de la turbina enfriada que comprende CO₂ a través de uno o más separadores para eliminar al menos el agua de la misma.

El método además puede comprender el calentamiento de uno o de ambos de oxígeno y de la corriente de CO₂ de reciclo en el intercambiador de calor a contracorriente de la corriente de salida de la turbina.

- 10 La corriente de CO₂ de alta presión puede estar a una presión de aproximadamente 20 MPa (200 bar) a aproximadamente 40 MPa (400 bar).

La porción principal de la corriente de CO₂ de alta presión se puede enfriar a una temperatura de aproximadamente -55°C a aproximadamente 0°C.

- 15 El método además puede comprender, después de enfriar la porción principal de la corriente de CO₂ de alta presión y antes de expandir la porción principal de la corriente de CO₂ de alta presión, hacer pasar la porción principal de la corriente de CO₂ de alta presión a través de un evaporador.

El evaporador puede estar en una columna de extracción.

El método además puede comprender hacer pasar la corriente de CO₂ líquido de baja presión a través de un separador eficaz para separar una corriente de vapor de la misma.

- 20 La corriente de vapor puede comprender hasta aproximadamente el 8 % en masa de la corriente de CO₂ líquido de baja presión que se hace pasar a través del separador.

La corriente de vapor puede comprender de aproximadamente el 1 % a aproximadamente el 75 % en masa de CO₂ y de aproximadamente el 25 % a aproximadamente el 99 % en masa de uno o más de N₂, O₂, y Argón.

El método además puede comprender hacer pasar la corriente de CO₂ líquido de baja presión restante a una columna de extracción.

- 25 La corriente de CO₂ de baja presión que sale la columna de extracción puede tener un contenido de oxígeno de no más de aproximadamente 25 ppm.

El método puede comprender bombear la corriente de CO₂ líquido de baja presión a una presión de al menos aproximadamente 10 MPa (100 bar).

El método puede comprender enviar la corriente de CO₂ líquido bombeada a una tubería de CO₂.

- 30 El método además puede comprender mezclar un vapor de cabeza procedente de la columna de extracción con la porción de enfriamiento de la corriente de CO₂ de alta presión que sale del segundo intercambiador de calor.

El método además puede comprender añadir la mezcla del vapor de cabeza procedente de la columna de extracción y la porción de enfriamiento de la corriente de CO₂ de alta presión que sale del segundo intercambiador de calor a la corriente de salida de la turbina enfriada.

- 35 En realizaciones ejemplares adicionales, la presente descripción puede proporcionar sistemas configurados para la producción de una corriente de CO₂ líquido de baja presión. Por ejemplo, un sistema puede comprender: un divisor configurado para dividir una corriente de CO₂ de alta presión en una primera porción y en una segunda porción; un primer expansor configurado para expandir y enfriar la primera porción de la corriente de CO₂ de alta presión; un intercambiador de calor para enfriar la segunda porción de la corriente de CO₂ de alta presión a contracorriente con la primera porción de la corriente de CO₂ de alta presión enfriada que sale del expansor; y un segundo expansor configurado para expandir la segunda porción enfriada de la corriente de CO₂ de alta presión a fin de formar la corriente de CO₂ líquido de baja presión. En realizaciones adicionales, dicho sistema puede incluir una o más de las siguientes declaraciones, que se pueden combinar en cualquier número y en cualquier combinación. Además, dicho sistema puede incluir cualesquiera elementos adicionales como se describe en la presente invención de otro modo en la presente invención.
- 40
- 45

El primer expansor se puede configurar para enfriar la primera porción de la corriente de CO₂ de alta presión a una temperatura de aproximadamente -20°C o menos.

El intercambiador de calor se puede configurar para enfriar la segunda porción de la corriente de CO₂ de alta presión a una temperatura de aproximadamente 5°C o menos.

El segundo expansor se puede configurar para expandir la segunda porción enfriada de la corriente de CO₂ de alta presión a una presión que es de aproximadamente 3 MPa (30 bar) o menos, pero es mayor que la presión del punto triple del CO₂.

El sistema además puede comprender una columna de extracción combinada y un evaporador.

- 5 La columna de extracción puede estar en línea aguas abajo del segundo expansor, y el evaporador puede estar en línea aguas abajo del intercambiador de calor y aguas arriba del segundo expansor.

El sistema además puede comprender un separador de líquido/vapor posicionado aguas abajo del segundo expansor y aguas arriba de la columna de extracción.

- 10 El sistema además puede comprender un compresor configurado para recibir la primera porción de la corriente de CO₂ de alta presión procedente del intercambiador de calor.

- 15 El sistema además puede comprender: una cámara de combustión configurada para la combustión de un combustible carbonoso o de un combustible de hidrocarburos con oxígeno en una cámara de combustión en presencia de una corriente de CO₂ de reciclo a una presión de aproximadamente 10 MPa (100 bar) o mayor y a una temperatura de aproximadamente 400°C o mayor para formar una corriente de salida de la cámara de combustión que comprende CO₂; una turbina configurada para expandir la corriente de salida de la cámara de combustión para generar energía y formar una corriente de salida de la turbina que comprende CO₂; un intercambiador de calor adicional configurado para enfriar la corriente de salida de la turbina; y una bomba configurada para bombear el CO₂ procedente de la corriente de salida de la turbina enfriada para formar la corriente de CO₂ de alta presión.

La presente descripción incluye, sin limitación, las siguientes realizaciones.

- 20 Realización 1: Un método para la producción de una corriente de dióxido de carbono (CO₂) líquido de baja presión, comprendiendo el método: realizar la combustión de un combustible carbonoso o de un combustible de hidrocarburos con oxígeno en una cámara de combustión en presencia de una corriente de CO₂ de reciclo a una presión de aproximadamente 10 MPa (100 bar) o mayor y a una temperatura de aproximadamente 400°C o mayor para formar una corriente de salida de la cámara de combustión que comprende CO₂; expandir la corriente de salida de la cámara de combustión en una turbina para generar energía y formar una corriente de salida de la turbina que comprende CO₂ a una presión de aproximadamente 5 MPa (50 bar) o menos; enfriar la corriente de salida de la turbina en un primer intercambiador de calor para formar una corriente de salida de la turbina enfriada; bombear el CO₂ procedente de la corriente de salida de la turbina enfriada a una presión de aproximadamente 10 MPa (100 bar) o mayor para formar una corriente de CO₂ de alta presión; dividir la corriente de CO₂ de alta presión en una porción principal y en una porción de enfriamiento; expandir la porción de enfriamiento de la corriente de CO₂ de alta presión para reducir la temperatura de la misma a aproximadamente -20°C o menos; enfriar la porción principal de la corriente de CO₂ de alta presión a una temperatura de aproximadamente 5°C o menos haciendo pasar la porción principal de la corriente de CO₂ de alta presión a través de un segundo intercambiador de calor a contracorriente con la porción de enfriamiento expandida de la corriente de CO₂ de alta presión; y expandir la porción principal, enfriada, de la corriente de CO₂ de alta presión a una presión que es de aproximadamente 3 MPa (30 bar) o menos, pero que es mayor que la presión del punto triple del CO₂ a fin de formar la corriente de CO₂ líquido de baja presión.
- 25
- 30
- 35

Realización 2: El método de cualquier realización anterior, en donde la corriente de salida de la cámara de combustión está a una presión de aproximadamente 20 MPa (200 bar) a aproximadamente 40 MPa (400 bar).

- 40 Realización 3: El método de cualquier realización anterior, en donde la corriente de salida de la cámara de combustión está a una temperatura de aproximadamente 800°C a aproximadamente 1.600°C.

Realización 4: El método de cualquier realización anterior, en donde la corriente de salida de la turbina que comprende CO₂ está a una presión de aproximadamente 2 MPa (20 bar) a aproximadamente 4 MPa (40 bar).

Realización 5: El método de cualquier realización anterior, en donde la corriente de salida de la turbina se enfría en el intercambiador de calor a una temperatura de aproximadamente 80°C o menos.

- 45 Realización 6: El método de cualquier realización anterior, que comprende además hacer pasar la corriente de salida de la turbina enfriada que comprende CO₂ a través de uno o más separadores para eliminar al menos el agua de la misma.

- 50 Realización 7: El método de cualquier realización anterior, que comprende además el calentamiento de uno o de ambos de oxígeno y de la corriente de CO₂ de reciclo en el intercambiador de calor a contracorriente con la corriente de salida de la turbina.

Realización 8: El método de cualquier realización anterior, en donde la corriente de CO₂ de alta presión está a una presión de aproximadamente 20 MPa (200 bar) a aproximadamente 40 MPa (400 bar).

Realización 9: El método de cualquier realización anterior, en donde la porción principal de la corriente de CO₂ de alta presión se enfría a una temperatura de aproximadamente -55°C a aproximadamente 0°C.

ES 2 688 804 T3

Realización 10: El método de cualquier realización anterior, que comprende, además, después de dicho enfriamiento de la porción principal de la corriente de CO₂ de alta presión y antes de dicha expansión de la porción principal de la corriente de CO₂ de alta presión, hacer pasar la porción principal de la corriente de CO₂ de alta presión a través de un evaporador.

- 5 Realización 11: El método de cualquier realización anterior, en donde el evaporador está en una columna de extracción.

Realización 12: El método de cualquier realización anterior, que comprende además hacer pasar la corriente de CO₂ líquido de baja presión a través de un separador eficaz para separar una corriente de vapor de la misma.

- 10 Realización 13: El método de cualquier realización anterior, en donde la corriente de vapor comprende hasta aproximadamente el 8 % en masa de la corriente de CO₂ líquido de baja presión que se hace pasar a través del separador.

Realización 14: El método de cualquier realización anterior, en donde la corriente de vapor comprende de aproximadamente el 1 % a aproximadamente el 75 % en masa de CO₂, y de aproximadamente el 25 % a aproximadamente el 99 % en masa de uno o más de N₂, O₂, y Argón.

- 15 Realización 15: El método de cualquier realización anterior, que comprende además hacer pasar la corriente de CO₂ líquido de baja presión restante a una columna de extracción.

Realización 16: El método de cualquier realización anterior, en donde la corriente de CO₂ líquido de baja presión que sale la columna de extracción tiene un contenido de oxígeno de no más de aproximadamente 25 ppm.

- 20 Realización 17: El método de cualquier realización anterior, que comprende bombear la corriente de CO₂ líquido de baja presión a una presión de al menos aproximadamente 10 MPa (100 bar).

Realización 18: El método de cualquier realización anterior, que comprende suministrar la corriente de CO₂ líquido bombeada a una tubería de CO₂.

- 25 Realización 19: El método de cualquier realización anterior, que comprende además mezclar un vapor de cabeza procedente de la columna de extracción con la porción de enfriamiento de la corriente de CO₂ de alta presión que sale del segundo intercambiador de calor.

Realización 20: El método de cualquier realización anterior, que comprende además añadir la mezcla a la corriente de salida de la turbina enfriada.

- 30 Realización 21: Un sistema configurado para la producción de una corriente de dióxido de carbono (CO₂) líquido de baja presión, comprendiendo el sistema: un divisor configurado para dividir una corriente de CO₂ de alta presión en una primera porción y en una segunda porción; un primer expansor configurado para expandir y enfriar la primera porción de la corriente de CO₂ de alta presión; un intercambiador de calor para enfriar la segunda porción de la corriente de CO₂ de alta presión a contracorriente con la primera porción enfriada de la corriente de CO₂ de alta presión que sale del expansor; y un segundo expansor configurado para expandir de la segunda porción de la corriente de CO₂ de alta presión enfriada a fin de formar la corriente de CO₂ líquido de baja presión.

- 35 Realización 22: El sistema de cualquier realización anterior, en donde el primer expansor está configurado para enfriar la primera porción de la corriente de CO₂ de alta presión a una temperatura de aproximadamente -20°C o menos.

Realización 23: El sistema de cualquier realización anterior, en donde el intercambiador de calor está configurado para enfriar la segunda porción de la corriente de CO₂ de alta presión a una temperatura de aproximadamente 5°C o menos.

- 40 Realización 24: El sistema de cualquier realización anterior, en donde el segundo expansor está configurado para expandir la segunda porción enfriada de la corriente de CO₂ de alta presión a una presión que es de aproximadamente 3 MPa (30 bar) o menos, pero que es mayor que la presión del punto triple del CO₂.

Realización 25: El sistema de cualquier realización anterior, que comprende además una columna de extracción combinada y un evaporador.

- 45 Realización 26: El sistema de cualquier realización anterior, en donde la columna de extracción está en línea aguas abajo del segundo expansor y en donde el evaporador está en línea aguas abajo del intercambiador de calor y aguas arriba del segundo expansor.

Realización 27: El sistema de cualquier realización anterior, que comprende además un separador de líquido/vapor posicionado aguas abajo del segundo expansor y aguas arriba de la columna de extracción.

- 50 Realización 28: El sistema de cualquier realización anterior, que comprende además un compresor configurado para recibir la primera porción de la corriente de CO₂ de alta presión procedente del intercambiador de calor.

Realización 29: El sistema de cualquiera de realización anterior, que comprende además: una cámara de combustión configurada para la combustión de un combustible carbonoso o de un combustible de hidrocarburos con oxígeno en

una cámara de combustión en presencia de una corriente de CO₂ de reciclo a una presión de aproximadamente 10 MPa (100 bar) o mayor y a una temperatura de aproximadamente 400°C o mayor para formar una corriente de salida de la cámara de combustión que comprende CO₂; una turbina configurada para expandir la corriente de salida de la cámara de combustión para generar energía y formar una corriente de salida de la turbina que comprende CO₂; un intercambiador de calor adicional configurado para enfriar la corriente de salida de la turbina; y una bomba configurada para bombear el CO₂ procedente de la corriente de salida de la turbina enfriada para formar la corriente de CO₂ de alta presión.

Estas y otras características, aspectos, y ventajas de la descripción serán evidentes a partir de una lectura de la siguiente descripción detallada junto con los dibujos adjuntos, que se describen brevemente a continuación. La invención incluye cualquier combinación de dos, tres, cuatro o más de las realizaciones mencionadas anteriormente, así como las combinaciones de cualesquiera dos, tres, cuatro, o más características o elementos establecidos en esta descripción, independientemente de si tales características o elementos se combinan expresamente en una descripción de realización específica en la presente invención. Esta descripción está destinada a ser leída de manera holística, de tal modo que cualesquiera características o elementos separables de la invención descrita, en cualquiera de sus diversos aspectos y realizaciones, se debe considerar como intencional para ser combinable a menos que el contexto indique claramente lo contrario.

Breve descripción de las figuras

Ahora se hará referencia a los dibujos adjuntos, que no están necesariamente dibujados a escala, y en donde:

La Figura 1 muestra un diagrama de flujo de un sistema según las realizaciones de la presente descripción para la formación de una corriente de CO₂ líquido de baja presión; y

La Figura 2 muestra un diagrama de flujo de un sistema según las realizaciones de la presente descripción para la formación de una corriente de CO₂ líquido de baja presión usando una porción de una corriente de CO₂ de alta presión extraída de un proceso de producción de energía.

Descripción detallada

Ahora se describirá el tema actual de forma más completa de aquí en adelante con referencia a las realizaciones ejemplares de la misma. Estas realizaciones ejemplares se describen de manera que esta descripción será minuciosa y completa, y transmitirá completamente el alcance del tema a los expertos en la técnica.

Como se usa en la memoria descriptiva, y en las reivindicaciones adjuntas, las formas singulares "un", "una", "el", incluyen a las referencias plurales a menos que el contexto indique claramente lo contrario.

La presente descripción se refiere a sistemas y métodos adaptados para la producción de dióxido de carbono (CO₂) líquido de baja presión. Los sistemas y métodos particularmente se pueden adaptar a la entrada de una corriente que comprende CO₂ no líquido (por ejemplo, CO₂ gaseoso o CO₂ supercrítico) y convertir al menos una porción del CO₂ no líquido a CO₂ líquido. La corriente de entrada puede comprender una fracción de CO₂ líquido; sin embargo, la corriente de entrada comprende preferiblemente no más de aproximadamente el 25 %, no más de aproximadamente el 10 %, no más de aproximadamente el 5 %, o no más de aproximadamente el 2 % en peso de CO₂ líquido.

El CO₂ líquido producido según la presente descripción se puede producir a una presión baja en que la presión del CO₂ líquido producido es menor de 5 MPa (50 bar) pero mayor que la presión del punto triple del CO₂ a fin de evitar preferiblemente la formación sustancial de CO₂ sólido. En algunas realizaciones, el CO₂ líquido producido puede estar a una presión de hasta aproximadamente 0,6 MPa (6 bar), en particular de aproximadamente 3 MPa (30 bar) a aproximadamente 0,6 MPa (6 bar), de aproximadamente 2,5 MPa (25 bar) a aproximadamente 0,6 MPa (6 bar), o de aproximadamente 1,5 MPa (15 bar) a aproximadamente 0,6 MPa (6 bar). La temperatura del CO₂ líquido producido está preferiblemente en el intervalo de la temperatura de saturación a la presión dada. Por ejemplo, la temperatura puede estar en el intervalo de aproximadamente 5°C a aproximadamente -55°C, de aproximadamente -5°C a aproximadamente -55°C, o de aproximadamente -15°C a aproximadamente -55°C.

Los métodos para producir CO₂ líquido según las realizaciones de la presente descripción generalmente pueden comprender enfriar y expandir el CO₂ de la corriente de entrada. Dependiendo de la fuente de la corriente de entrada, los métodos pueden comprender una o más etapas de compresión. En realizaciones preferidas, el CO₂ de la entrada puede estar a una presión de aproximadamente 6 MPa (60 bar) o mayor, de aproximadamente 10 MPa (100 bar) o mayor, o de aproximadamente 20 MPa (200 bar) o mayor. En otras realizaciones, la presión del CO₂ de la entrada puede estar en el intervalo de aproximadamente 6 MPa (60 bar) a aproximadamente 40 MPa (400 bar). La temperatura del CO₂ de la entrada puede ser mayor de 10°C o puede estar en el intervalo de aproximadamente 10°C a aproximadamente 40°C, de aproximadamente 12°C a aproximadamente 35°C, o de aproximadamente 15°C a aproximadamente 30°C. En algunas realizaciones, el CO₂ de la entrada puede estar a aproximadamente la temperatura ambiente.

En la Figura 1 se muestra una realización de un sistema y método según la presente descripción útil en la producción de CO₂ líquido. Como se ve en la misma, una corriente de CO₂ de alta presión 24 se puede enfriar mediante su paso a través de un enfriador de agua 50 (que puede ser opcional, dependiendo de la temperatura real de la corriente de

CO₂ de alta presión). La corriente de CO₂ de alta presión 24 se divide entonces en una primera porción y en una segunda porción usando un divisor 68 (u otro elemento de sistema adecuado configurado para dividir una corriente) para proporcionar una corriente lateral de CO₂ de alta presión 57 que se puede expandir, tal como a través de una válvula 58 u otro dispositivo adecuado, para formar una corriente de CO₂ de refrigeración 56. La corriente de CO₂ de alta presión restante 62 se hace pasar a través de un intercambiador de calor 10 donde se enfría por la corriente de CO₂ de refrigeración 56, que sale como la corriente de CO₂ 33. La corriente de CO₂ de alta presión enfriada 51 que sale del extremo frío del intercambiador de calor 10 puede estar a una temperatura de aproximadamente 5°C o menos, de aproximadamente 0°C o menos, de aproximadamente -10°C o menos, o de aproximadamente -20°C o menos (por ejemplo, de aproximadamente 5°C a aproximadamente -40°C, o de aproximadamente 0°C a aproximadamente -35°C). La corriente de CO₂ de alta presión enfriada 51 se puede expandir para formar la corriente de CO₂ líquido. Como se ilustra en la Figura 1, la corriente de CO₂ de alta presión enfriada 51 se hace pasar primero a través de un evaporador 52, que es parte de una columna 53 de extracción en la Figura 1, y de este modo suministra la calefacción para la destilación en la misma, que se describe adicionalmente a continuación. Así, el paso a través del evaporador puede ser opcional. La corriente de CO₂ de alta presión 55 que abandona el evaporador 52 se expande para formar la corriente de CO₂ líquido de baja presión 35 a una temperatura y presión en los intervalos descritos anteriormente. En la Figura 1, la corriente 55 se expande a través de una válvula 48, pero se puede usar cualquier dispositivo útil para expandir una corriente de CO₂ comprimido. Por ejemplo, el dispositivo de expansión puede ser un sistema de producción de trabajo, tal como una turbina, que disminuye la entalpía del CO₂ entre la entrada y la salida, y reduce aún más la temperatura a la salida.

La expansión de la corriente de CO₂ de alta presión (por ejemplo, del intervalo de aproximadamente 6 MPa (60 bar) a aproximadamente 40 MPa (400 bar)) para formar la corriente de CO₂ de baja presión (por ejemplo, a una presión de aproximadamente 3 MPa (30 bar) o menos, pero mayor que la presión del punto triple del CO₂) puede resultar en una corriente producto de dos fases formado por una mezcla de gas y líquido que tiene la misma entalpía total que la corriente de CO₂ que entra a la válvula (u otro dispositivo de expansión). La temperatura de la mezcla de dos fases que sale de la válvula (o una turbina según la realización alternativa ejemplar, indicada anteriormente) particularmente puede estar a la temperatura de saturación del líquido a la presión reducida. En la Figura 1, la corriente 56 que sale de la válvula 58 y la corriente 35 que sale de la válvula 48 pueden ser ambas corrientes de dos fases. La corriente de CO₂ de baja presión de dos fases 35 que sale de la válvula 48 se puede hacer pasar a través de un separador 9 para proporcionar la corriente de la fracción de vapor de CO₂ 49 y la corriente de la fracción líquida de CO₂ 36.

En realizaciones en donde la corriente de CO₂ de alta presión de la entrada procede de un sistema de producción de energía por oxi-combustión, la fracción de vapor que se puede separar de la corriente de CO₂ líquido de baja presión contendrá la mayor parte de los gases inertes (por ejemplo, nitrógeno, exceso de O₂, y gases nobles, tales como argón) que están presentes en la fuente de oxígeno y en la fuente de combustible (por ejemplo, gas natural). Como un ejemplo no limitante, se puede llevar a cabo un proceso de producción de energía por oxi-combustión con una corriente de oxígeno en un exceso del 1 % que fluye en una cámara de combustión, formándose la corriente de oxígeno de aproximadamente del 99,5 % de oxígeno y del 0,5 % de argón. El producto de CO₂ neto resultante puede incluir O₂ a una concentración del 2 % y argón a una concentración del 1 %.

Según la presente descripción, el enfriamiento de un producto de CO₂ procedente de un sistema de energía como se ejemplifica anteriormente mediante medios de enfriamiento indirectos a una temperatura que, en la expansión a través de una válvula a una presión de, por ejemplo, 1 MPa (10 bar), tiene como resultado una fracción de vapor de expansión súbita de aproximadamente el 4 %. En diversas realizaciones, la fracción de vapor puede ser de hasta aproximadamente el 6 %, de hasta aproximadamente el 5 %, o de hasta aproximadamente el 4 % en masa de la corriente de CO₂ líquido total (por ejemplo, corriente 35 en la Figura 1). La corriente de vapor (por ejemplo, corriente 49 en la Figura 1) puede comprender de aproximadamente el 1 % a aproximadamente el 75 % en masa de CO₂ y de aproximadamente el 25 % a aproximadamente el 99 % en masa de una combinación de N₂, O₂ y argón (u otros gases inertes). En realizaciones adicionales, la corriente de vapor puede comprender aproximadamente el 60 % o más, aproximadamente el 65 % o más, o aproximadamente el 70 % o más en masa de la combinación de N₂, O₂, y argón (u otros gases inertes). La fracción de vapor de expansión súbita (por ejemplo, la corriente 49 que sale del separador 9 en la Figura 1) se puede ventilar a la atmósfera o capturar. La producción de la corriente de vapor de expansión súbita es beneficiosa en realizaciones donde la corriente de CO₂ de entrada se deriva de un proceso de oxi-combustión ya que la eliminación de la fracción de vapor evitará la acumulación de argón inerte y/o nitrógeno (que pueden estar presentes en el gas natural y/o en el gas combustible derivado del carbón que se quema y que pueden estar presentes en una corriente de oxígeno derivada de una planta de separación criogénica de aire). Para formar la fracción de vapor de expansión súbita, que puede ser útil para enfriar la corriente de CO₂ de alta presión (por ejemplo, corriente 62 en la Figura 1) a una temperatura de aproximadamente -30°C o menos, o de aproximadamente -33°C o menos antes de la expansión. En realizaciones donde la corriente de CO₂ de alta presión de entrada proviene de una fuente que puede estar sustancial o completamente desprovista de gases inertes (y opcionalmente de oxígeno), puede no ser necesario formar la fracción de vapor de expansión súbita. En realizaciones que usan combustible de gas natural con una fracción significativa de N₂ en el proceso de producción de energía de oxi-combustible, puede ser útil para ajustar la temperatura a la que se enfría la corriente 51 con el fin de asegurar la eliminación de la mayor parte del N₂ con el O₂ y el argón en la corriente 49 junto con una pérdida mínima de CO₂ en la corriente 49.

Preferiblemente, la mayoría de la concentración del O₂ y del argón (y de otros gases inertes) de la corriente de CO₂ de entrada se elimina en la fracción de vapor de destilación súbita de tal manera que la corriente de la fracción líquida de CO₂ (por ejemplo, corriente 36 en la Figura 1) tiene solamente una concentración menor de N₂, O₂, y argón - por

ejemplo, aproximadamente el 1 % o menos, aproximadamente el 0,5 % o menos, o aproximadamente el 0,2 % en masa o menos. Esta concentración menor de N₂, O₂ y argón se puede extraer de la corriente de la fracción líquida de CO₂, tal como usando un aparato de destilación (por ejemplo, la columna de extracción 53 en la Figura 1). Alternativamente a la ilustración de la Figura 1, se puede instalar una sección de extracción en la parte inferior del separador de destilación súbita. En realizaciones que usan la columna de extracción, se puede incluir un evaporador (componente 52 en la Figura 1 como se trató anteriormente) para eliminar el calor restante disponible de una parte o de la totalidad de la corriente de CO₂ de alta presión (por ejemplo, corriente 51 en la Figura 1). Tal calentamiento se puede variar para proporcionar la relación de líquido a vapor necesaria para reducir la concentración de oxígeno en el producto de CO₂ líquido neto (corriente 54 en la Figura 1). La concentración de oxígeno en la corriente de CO₂ líquido neto puede ser no más de aproximadamente 25 ppm, no más de aproximadamente 20 ppm, o no más de aproximadamente 10 ppm.

En realizaciones adicionales, la corriente producto de CO₂ líquido 54 se puede bombear a una alta presión y calentar en el intercambiador de calor 10 (o en otro intercambiador de calor adicional o por otros medios) para enviarla a una tubería de CO₂. La corriente producto de CO₂ líquido particularmente se puede bombear a una presión de aproximadamente 10 MPa (100 bar) a aproximadamente 25 MPa (250 bar).

Volviendo a la Figura 1, el producto de cabeza 63 que sale de la columna de extracción 53 se puede reducir adicionalmente su presión, si se desea, tal como en la válvula 64 y luego combinar con la corriente de CO₂ 33. Las corrientes combinadas se pueden comprimir en el compresor 34 para proporcionar una corriente de CO₂ de alta presión de retorno 21, que se puede, por ejemplo, combinar con la corriente de CO₂ de alta presión de entrada 24 o añadir a una corriente que contiene CO₂ adicional (véase la Figura 2).

Las realizaciones anteriores para formar una corriente de CO₂ líquido de baja presión pueden ser económicamente deseables en que aproximadamente el 95 % o más, aproximadamente el 96 % o más, o aproximadamente el 97 % o más en masa del CO₂ en la corriente de CO₂ de baja presión neto (por ejemplo, corriente 35 en la Figura 1) se puede eliminar como la corriente de CO₂ líquido de baja presión. En las realizaciones descritas anteriormente, de aproximadamente el 1,5 % a aproximadamente el 2,5 % en masa del producto de CO₂ neto se puede ventilar a la atmósfera con la corriente combinada de N₂, O₂, y argón (por ejemplo, corriente 49 en la Figura 1), proporcionando así una eficiencia de la eliminación de CO₂ de aproximadamente el 97,5 % a aproximadamente el 98,5 %. En realizaciones en donde el método anteriormente descrito se lleva a cabo en conexión con un sistema de energía de ciclo cerrado que usa CO₂ como fluido de trabajo, la corriente 49 preferiblemente se ventea a la atmósfera debido a que la eliminación de los componentes inertes es deseable para mantener su presión parcial y concentración tan baja como sea posible. Opcionalmente, la corriente 59, después de la reducción de la presión en la válvula 60, se puede dirigir a través de un conjunto de pasos a través del intercambiador de calor 10 para proporcionar una refrigeración adicional para enfriar la corriente 62 antes de que se venté la corriente 59.

El uso de una corriente de CO₂ de alta presión de entrada 24 proporciona una capacidad única para proporcionar un enfriamiento indirecto a la corriente de CO₂ de alta presión. Como se ha descrito en relación con las realizaciones anteriores, el enfriamiento indirecto se puede proporcionar dividiendo una porción de la corriente de CO₂ de alta presión a temperatura próxima a la ambiente y luego expandir esta porción dividida de la corriente de CO₂ de alta presión a una temperatura de aproximadamente -20°C o menos, de aproximadamente -30°C o menos, o de aproximadamente -40°C o menos (por ejemplo, de aproximadamente -40°C a aproximadamente -55°C). Esto se puede lograr reduciendo la presión de la corriente de CO₂ de alta presión 24 a menos de aproximadamente 2 MPa (20 bar), a menos de aproximadamente 1 MPa (10 bar), o a menos de aproximadamente 0,8 MPa (8 bar) (por ejemplo, de aproximadamente 2 MPa (20 bar) a aproximadamente 0,5 MPa (5 bar), o de aproximadamente 1,2 MPa (12 bar) a aproximadamente 0,5 MPa (5 bar), particularmente a aproximadamente 0,555 MPa (5,55 bar)). La corriente de vapor más líquido resultante (por ejemplo, corriente 56 en la Figura 1) luego se usa para enfriar indirectamente la corriente de CO₂ de alta presión principal en un intercambiador de calor.

Los sistemas y métodos de la presente descripción son particularmente beneficiosos cuando se usan en combinación con un método de producción de energía que usa un fluido de trabajo de CO₂, tales como los sistemas descritos en el Documento de Patente de los Estados Unidos de Número 8.596.075. En particular, tal proceso puede usar una turbina de relación de alta presión/baja presión que expande una mezcla de la corriente de CO₂ de alta presión de reciclaje y de los productos de combustión resultantes de la combustión del combustible. Se puede usar cualquier combustible fósil, particularmente combustibles carbonosos. Preferiblemente, el combustible es un combustible gaseoso; sin embargo, los combustibles no gaseosos no están necesariamente excluidos. Ejemplos no limitativos incluyen gas natural, gases comprimidos, gases combustibles (por ejemplo, uno que comprende o uno de H₂, CO, CH₄, H₂S y NH₃) y gases combustibles similares. También se pueden usar combustibles sólidos, por ejemplo, carbón, lignito, coque de petróleo, bitumen, y similares, con la incorporación de los elementos necesarios del sistema (tal como con el uso de una cámara de combustión de oxidación parcial o de un gasificador para convertir los combustibles sólidos o líquidos pesados a una forma gaseosa). También se pueden usar combustibles de hidrocarburos líquidos. Se puede usar oxígeno puro como oxidante en el proceso de combustión. El humo de escape caliente de la turbina se usa para precalentar parcialmente la corriente de CO₂ de alta presión de reciclo. La corriente de CO₂ de reciclo también se calienta usando el calor derivado de la energía de compresión de un compresor de CO₂, como se discute adicionalmente en la presente invención. Todas las impurezas derivadas del combustible y de la combustión tales como compuestos de azufre, NO, NO₂, CO₂, H₂O, Hg y similares se pueden separar para su eliminación sin emisiones a la atmósfera. Se incluye un tren de compresión de CO₂ y que comprende unidades de alta eficiencia que aseguran

un mínimo consumo de potencia incremental. El tren de compresión de CO₂ puede proporcionar particularmente un flujo al compresor de combustible y CO₂ de reciclaje que se puede reciclar, en parte, a la cámara de combustión y dirigirse en parte a los componentes de producción de CO₂ líquido como la corriente de CO₂ de alta presión de entrada.

5 La Figura 2, por ejemplo, ilustra un sistema de producción de energía combinado con elementos como se describen en la presente invención para producir el producto de CO₂ neto derivado del carbono en el combustible primario en la forma de un líquido de baja presión con un contenido de oxígeno en un intervalo mínimo como se describe en la presente invención. Una realización de dicho sistema se describe en el siguiente Ejemplo en conexión con la Figura 2.

10 La magnitud del flujo total de producto de CO₂ neto puede variar dependiendo de la naturaleza del combustible usado. En realizaciones que usan un combustible de gas natural, el flujo total de producto de CO₂ neto puede ser de aproximadamente el 2,5 % a aproximadamente el 4,5 % (por ejemplo, aproximadamente el 3,5 %) del total del flujo del compresor de combustible y CO₂ de reciclo. En realizaciones que usan un carbón bituminoso típico (por ejemplo, Illinois No. 6), el flujo total de producto de CO₂ neto puede ser de aproximadamente el 5 % a aproximadamente el 7 % (por ejemplo, aproximadamente el 6 %) del flujo total del compresor de combustible y CO₂ de reciclo. La cantidad de CO₂ reciclada usado para la refrigeración puede estar en el intervalo de aproximadamente el 15 % a aproximadamente el 35 %, o de aproximadamente el 20 % a aproximadamente el 30 % (por ejemplo, aproximadamente el 25 %) en masa del flujo de producto de CO₂ neto.

20 En algunas realizaciones, se puede usar gas natural licuado (LNG, por sus siglas en inglés) como una fuente de refrigeración en una manera tal como se describe en el Documento de Patente de los EE.UU. de Número de Publicación 2013/0104525. En realizaciones particulares, el LNG (por sus siglas en inglés) se puede calentar a una temperatura que se acerca a la temperatura de condensación de los gases de salida de la turbina de CO₂ (por ejemplo, a una presión de aproximadamente 2 MPa (20 bar) a aproximadamente 4 MPa (40 bar)). El flujo de los gases de salida de la turbina que abandonan el separador de agua se puede secar en un secador desecante a un punto de rocío por debajo de aproximadamente -50°C antes de ser licuado usando la refrigeración derivada del LNG (por sus siglas en inglés) de alta presión, que a su vez se calienta. El CO₂ líquido ahora se puede bombear a una presión de aproximadamente 20 MPa (200 bar) a aproximadamente 40 MPa (400 bar) usando una bomba centrífuga de múltiples etapas. El gas natural de alta presión estará a una temperatura típicamente en el intervalo de aproximadamente -23°C (para los gases de salida de la turbina que abandonan el intercambiador de calor del economizador a aproximadamente 2 MPa (20 bar)) a aproximadamente 0°C (para los gases de salida de la turbina que abandonan el intercambiador de calor del economizador a aproximadamente 4 MPa (40 bar)) usando una aproximación de 5°C a la temperatura de saturación del CO₂ a estas presiones. Este gas natural de alta presión frío se puede usar para preenfriar el CO₂ de alta presión a aproximadamente 6 MPa (60 bar) a aproximadamente 40 MPa (400 bar) antes de la expansión para producir CO₂ líquido en el intervalo de presión de aproximadamente 0,6 MPa (6 bar) a aproximadamente 3 MPa (30 bar). Esta refrigeración se puede complementar mediante refrigeración adicional derivada de la expansión del CO₂ de alta presión como se describió anteriormente para dar una temperatura del producto de CO₂ neto enfriado que en la expansión a la presión requerida del producto de CO₂ líquido resulta una fracción de gas que contiene de aproximadamente el 50 % a aproximadamente el 80 % en masa de (O₂ + N₂ + Ar). El efecto es reducir significativamente la cantidad de CO₂ adicional que se debe reciclar para la refrigeración.

Ejemplo

40 Las realizaciones de la presente descripción se ilustran adicionalmente mediante el siguiente ejemplo, que se expone para ilustrar el tema descrito actualmente y no se debe interpretar como limitativo. A continuación, se describe una realización de un sistema y método de producción de energía combinado, y el sistema y método para la producción de CO₂ líquido de baja presión, como se ilustra en la Figura 2.

45 Como se ve en la Figura 2, una corriente de combustible de gas natural 42 (que en este Ejemplo es metano puro) a aproximadamente 4 MPa (40 bar) se comprime a aproximadamente 32 MPa (320 bar) en un compresor 44 para proporcionar una corriente de combustible de gas natural comprimido 43, que a su vez, entra en una cámara de combustión 1 donde se quema en una corriente de oxidante precalentado 38, que comprende aproximadamente el 23 % en masa de oxígeno mezclado con aproximadamente el 77 % en masa de CO₂ diluyente. En la realización ilustrada, la cantidad total de oxígeno contiene aproximadamente el 1 % en masa de más oxígeno que la requerida para la combustión estequiométrica. Los productos de la combustión se diluyen en la cámara de combustión 1 mediante una corriente de CO₂ de reciclo caliente 37 a aproximadamente 30,4 MPa (304 bar) y a aproximadamente 707°C. Una corriente de salida de la cámara de combustión 39 a una temperatura de aproximadamente 1.153°C se pasa a una entrada de la turbina 2, la turbina está acoplada a un generador eléctrico 3 y a un compresor principal de reciclo de CO₂ 4.

55 La corriente de salida de la cámara de combustión 39 se expande en la turbina 2 para proporcionar una corriente de salida de la turbina 45 a aproximadamente 3 MPa (30 bar) y a aproximadamente 747°C, que a su vez se hace pasar a través de un intercambiador de calor economizador 15 y se enfría a aproximadamente 56°C saliendo como la corriente de salida de la turbina enfriada 16. La corriente de salida de la turbina enfriada 16 se enfría adicionalmente a contracorriente con el agua de enfriamiento en un enfriador de agua 7 hasta una temperatura próxima a la ambiente (corriente 17 en la Figura 2). La corriente de salida de la turbina enfriada 17 se hace pasar a través de un separador

ES 2 688 804 T3

6, donde se separa una corriente de agua líquida 18 de una corriente de cabeza de CO₂ gaseosa 19, que a su vez se divide en flujos separados (corrientes 22 y 20 en la Figura 2).

La corriente principal de cabeza de CO₂ gaseoso 22 entra en el compresor de recirculación de CO₂ 4, que opera con un enfriador intermedio 5 y comprime corriente principal de cabeza de CO₂ gaseoso a temperatura ambiente 22 (derivada de la corriente de salida de la turbina 45) a partir de una presión de aproximadamente 2,82 MPa (282 bar) a aproximadamente 6,35 MPa (635 bar) - es decir, la corriente de CO₂ comprimido 23.

La corriente de la fracción de cabeza de CO₂ gaseoso 20 se usa para diluir la corriente de O₂ del 99,5 % 28 (que está a una presión de aproximadamente 2,8 MPa (28 bar)) que se produce por la planta de separación criogénica de aire 14. Las corrientes combinadas 20 y 28 forman la corriente de oxidante de baja presión 26, que se comprime a aproximadamente 32 MPa (320 bar) (corriente 27) en un compresor 11 con enfriadores intermedios 12. La corriente de oxidante de alta presión 27 se calienta en el intercambiador de calor del economizador, saliendo como la corriente de oxidante precalentada 38 a aproximadamente 30,4 MPa (304 bar) y a aproximadamente 707°C.

Se toma una primera corriente lateral 32 a aproximadamente 110°C del flujo de CO₂ de reciclo de alta presión de calefacción y se calienta a aproximadamente 154°C (corriente 31 en la Figura 2) en el intercambiador de calor lateral 13 a contracorriente con un fluido de transferencia de calor (que entra al intercambiador de calor lateral como corriente 30 y que sale como corriente 29) que elimina el calor de compresión de los compresores de aire en la planta de separación criogénica de aire 14. La ASU (por sus siglas en inglés) tiene una alimentación de aire atmosférico 40 y una corriente de salida de nitrógeno residual 41 que se ventila a la atmósfera.

Se toma una segunda corriente lateral 61 a una temperatura de aproximadamente 400°C de la corriente de CO₂ de reciclo de alta presión de calefacción y se usa en la turbina 2 para enfriamiento interno.

La corriente de CO₂ comprimido 23 a aproximadamente 6,35 MPa (635 bar) y a aproximadamente 51°C se enfría en un intercambiador de calor 46 a contracorriente con el agua de enfriamiento para proporcionar la corriente 47 a aproximadamente 17,5°C con una densidad de aproximadamente 820 kg/m³, que se bombea en una bomba centrífuga de múltiples etapas 8 a una presión de aproximadamente 30,5 MPa (305 bar). El flujo de descarga de la bomba se divide en dos partes.

La corriente de CO₂ de reciclo de alta presión 25 procedente del flujo de descarga de la bomba se hace pasar a través del intercambiador de calor del economizador 15 y funciona como el flujo del que se toman la primera corriente lateral y la segunda corriente lateral (como se discutió anteriormente).

La corriente 24 procedente del flujo de descarga de la bomba comprende la corriente producto de CO₂ neto derivada del carbono en el gas natural. La corriente 24 preferiblemente puede incluir un contenido adicional de CO₂ para su uso en la refrigeración. El contenido adicional de CO₂ contenido puede ser de hasta aproximadamente el 50 % en masa, de hasta aproximadamente el 40 % en masa, o de hasta aproximadamente el 30 % en masa del CO₂ de reciclo. En algunas realizaciones, el contenido de CO₂ adicional puede ser de aproximadamente el 5 % a aproximadamente el 45 % en masa, de aproximadamente el 10 % a aproximadamente el 40 % en masa, o de aproximadamente el 15 % a aproximadamente el 35 % en masa del CO₂ de reciclo.

La corriente de CO₂ de alta presión 24 se enfría a temperatura próxima a la ambiente en un enfriador de agua 50 y se divide en dos partes. La corriente de la fracción de CO₂ de alta presión 57 se reduce su presión a aproximadamente 0,82 MPa (8,2 bar) en la válvula 58 para formar una corriente de CO₂ de enfriamiento 56, que es una mezcla de dos fases a una temperatura de aproximadamente -45°C. La corriente de CO₂ de refrigeración 56 se hace pasar a través del intercambiador de calor 10 donde se evapora y se calienta a temperatura próxima a la ambiente saliendo como la corriente de CO₂ 33.

La corriente producto de CO₂ neto de alta presión 62 se hace pasar directamente al intercambiador de calor 10 donde se enfría a contracorriente con la corriente de CO₂ de enfriamiento 56 a una temperatura de aproximadamente -38°C saliendo como la corriente producto de CO₂ neto de alta presión enfriada 51. Esta corriente luego se hace pasar a través de un pequeño evaporador 52 en la base de una columna de extracción 53 saliendo como la corriente 55. Se reduce la presión de esta corriente hasta aproximadamente 1 MPa (10 bar) en la válvula 48 para formar una corriente producto de CO₂ neto de dos fases 35, que luego se hace pasar a través de un separador 9.

La corriente de vapor de cabeza 49 que sale de la parte superior del separador 9 abarca aproximadamente el 4 % en masa del flujo de la corriente producto de CO₂ neto de dos fases 35 y está formada de aproximadamente el 30 % en masa de CO₂ y aproximadamente el 70 % en masa de una combinación de O₂ y argón. Se reduce la presión de la corriente de vapor de cabeza 49 en la válvula 60 y luego se ventea a la atmósfera (corriente 59 en la Figura 2). Opcionalmente, la corriente 59 se puede calentar en el intercambiador de calor 10 a una temperatura próxima a la ambiente, proporcionando una refrigeración adicional y luego calentarla adicionalmente por encima de la temperatura ambiente para hacer sostenida la corriente de venteo.

La corriente de CO₂ líquido 36 que sale del separador 9 a una presión de aproximadamente 1 MPa (10 bar) comprende aproximadamente el 96 % en masa del flujo de la corriente producto de CO₂ neto de dos fases 35. La corriente 36 se alimenta a la parte superior de la columna de extracción 53.

ES 2 688 804 T3

Lo que sale de la parte inferior de la columna de extracción 53 es la corriente producto de CO₂ líquido de baja presión 54, que comprende el CO₂ neto producido a partir del carbono en la alimentación de combustible primario para el sistema de energía. En la realización ilustrada, la corriente 54 tiene un contenido de oxígeno por debajo de 10 ppm.

5 Se reduce la presión de la corriente producto de cabeza 63 que sale de la columna de extracción 53 a aproximadamente 0,8 MPa (8 bar) en la válvula 64, y se añade a la corriente de CO₂ 33. Las corrientes combinadas 33 y 63 se comprimen en el compresor 34 a aproximadamente 2,85 MPa (28,5 bar). La corriente de descarga 21 comprimida en el compresor de CO₂ 34 se mezcla con la corriente principal de cabeza de CO₂ gaseoso 22 y se comprime de nuevo hasta aproximadamente 30,5 MPa (305 bar) en el compresor de CO₂ 4 y en la bomba 8.

10 En el ejemplo anterior, se proporcionan valores específicos (por ejemplo, temperatura, presión y relaciones relativas) para ilustrar las condiciones de trabajo de una realización ejemplar de la presente descripción. Dichos valores no pretenden ser limitantes de la descripción, y se entiende que tales valores se pueden variar dentro de los intervalos que se describen en el presente documento para llegar a realizaciones de trabajo adicionales a la luz de la descripción global proporcionada en la presente invención.

REIVINDICACIONES

1. Un método para la producción de una corriente de dióxido de carbono líquido (CO₂) de baja presión, comprendiendo el método:
 - 5 realizar la combustión de un combustible carbonoso o de un combustible de hidrocarburos con oxígeno en una cámara de combustión en presencia de una corriente de CO₂ de reciclado a una presión de 10 MPa (100 bar) o mayor y a una temperatura de aproximadamente 400°C o mayor para formar una corriente de salida de la cámara de combustión que comprende CO₂;
 - expandir la corriente de salida de la cámara de combustión en una turbina para generar energía y formar una corriente de salida de la turbina que comprende CO₂ a una presión de 5 MPa (50 bar) o menos;
 - 10 enfriar la corriente de salida de la turbina en un primer intercambiador de calor para formar una corriente de salida de la turbina enfriada;
 - bompear el CO₂ de la corriente de salida de la turbina enfriada a una presión de 10 MPa (100 bar) o mayor para formar una corriente de CO₂ de alta presión;
 - dividir la corriente de CO₂ de alta presión en una porción principal y en una porción de enfriamiento;
 - 15 expandir la porción de enfriamiento de la corriente de CO₂ de alta presión para reducir la temperatura de la misma a aproximadamente -20°C o menos;
 - enfriar la porción principal de la corriente de CO₂ de alta presión a una temperatura de 5°C o menos haciendo pasar la porción principal de la corriente de CO₂ de alta presión a través de un segundo intercambiador de calor a contracorriente con la porción de enfriamiento expandida de la corriente de CO₂ de alta presión; y
 - 20 expandir la porción principal enfriada de la corriente de CO₂ de alta presión a una presión que es de 3 MPa (30 bar) o menos, pero que es mayor que la presión del punto triple del CO₂ a fin de formar la corriente de CO₂ líquido de baja presión.
 2. El método según la reivindicación 1, en donde la corriente de salida de la cámara de combustión está a una presión de 20 MPa (200 bar) a aproximadamente 40 MPa (400 bar); preferiblemente en donde la corriente de salida de la cámara de combustión está a una temperatura de 800°C a 1.600°C.
 3. El método según la reivindicación 1 o 2, en donde la corriente de salida de la turbina que comprende CO₂ está a una presión de aproximadamente 2 MPa (20 bar) a 4 MPa (40 bar).
 4. El método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en donde la corriente de salida de la turbina se enfría en el intercambiador de calor a una temperatura de 80°C o menos; preferiblemente en donde el método comprende además hacer pasar la corriente de salida de la turbina enfriada que comprende CO₂ a través de uno o más separadores para eliminar al menos el agua de la misma.
 5. El método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en donde se cumple una o más de las siguientes condiciones:
 - 35 el método comprende además el calentamiento de uno o de ambos de oxígeno y de la corriente de CO₂ de reciclado en el intercambiador de calor a contracorriente con la corriente de salida de la turbina;
 - la corriente de CO₂ de alta presión está a una presión de 20 MPa (200 bar) a 40 MPa (400 bar);
 - la porción principal de la corriente de CO₂ de alta presión se enfría a una temperatura de -55°C a 0°C.
 6. El método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, que comprende, además, después de dicho enfriamiento de la porción principal de la corriente de CO₂ de alta presión y antes de dicha expansión de la porción principal de la corriente de CO₂ de alta presión, hacer pasar la porción principal de la corriente de CO₂ de alta presión a través de un evaporador; preferiblemente en donde el evaporador está en una columna de extracción.
 7. El método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, que comprende además hacer pasar la corriente de CO₂ líquido de baja presión a través de un separador eficaz para separar una corriente de vapor de la misma.
 8. El método según la reivindicación 7, en donde se cumple una o ambas de las siguientes condiciones:
 - 45 la corriente de vapor comprende hasta el 8 % en masa de la corriente de CO₂ líquido de baja presión que se hace pasar a través del separador;
 - la corriente de vapor comprende del 1 % al 75 % en masa de CO₂ y del 25 % al 99 % en masa de uno o más de N₂, O₂, y Argón.

9. El método según la reivindicación 7 u 8, que comprende además hacer pasar la corriente de CO₂ líquido de baja presión restante a una columna de extracción.
10. El método según la reivindicación 9, en donde se cumple una o más de las siguientes condiciones:
- 5 la corriente de CO₂ líquido de baja presión que sale la columna de extracción tiene un contenido de oxígeno de no más de 25 ppm;
- el método comprende además bombear la corriente de CO₂ líquido de baja presión a una presión de al menos 10 MPa (100 bar), preferiblemente comprende además enviar la corriente de CO₂ líquido bombeada a una tubería de CO₂.
11. El método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, que comprende además mezclar un vapor de cabeza procedente de la columna de extracción con la porción de enfriamiento de la corriente de CO₂ de alta presión que sale del segundo intercambiador de calor; preferiblemente comprende además añadir la mezcla a la corriente de salida de la turbina enfriada.
- 10 12. Un sistema configurado para la producción de una corriente de dióxido de carbono (CO₂) líquido de baja presión, que comprende:
- 15 un divisor configurado para dividir una corriente de CO₂ de alta presión en una primera porción y en una segunda porción;
- un primer expansor configurado para expandir y enfriar la primera porción de la corriente de CO₂ de alta presión;
- un intercambiador de calor para enfriar la segunda porción de la corriente de CO₂ de alta presión a contracorriente con la primera porción enfriada de la corriente de CO₂ de alta presión que sale del expansor; y
- 20 un segundo expansor configurado para expandir la segunda porción enfriada de la corriente de CO₂ de alta presión a fin de formar la corriente de CO₂ líquido de baja presión.
13. El sistema según la reivindicación 12, en donde se cumple una o más de las siguientes condiciones:
- el primer expansor se configura para enfriar la primera porción de la corriente de CO₂ de alta presión a una temperatura de -20°C o menos.
- 25 el intercambiador de calor se configura para enfriar la segunda porción de la corriente de CO₂ de alta presión a una temperatura de 5°C o menos.
- el segundo expansor se configura para expandir la segunda porción enfriada de la corriente de CO₂ de alta presión a una presión que es 3 MPa (30 bar) o menos, pero que es mayor que la presión del punto triple del CO₂.
- el sistema que comprende además un compresor configurado para recibir la primera porción de la corriente de CO₂ de alta presión procedente del intercambiador de calor.
- 30 14. El sistema según la reivindicación 12 o 13, que comprende además una columna de extracción combinada y un evaporador; preferiblemente en donde la columna de extracción está en línea aguas abajo del segundo expansor y en donde el evaporador está en línea aguas abajo del intercambiador de calor y aguas arriba del segundo expansor; y preferiblemente comprende además un separador de líquido/vapor posicionado aguas abajo del segundo expansor y aguas arriba de la columna de extracción.
- 35 15. El sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 12 a 14, que comprende, además:
- una cámara de combustión configurada para la combustión de un combustible carbonoso o de un combustible de hidrocarburos con oxígeno en una cámara de combustión en presencia de una corriente de CO₂ de reciclo a una presión de 10 MPa (100 bar) o mayor y a una temperatura de 400°C o mayor para formar una corriente de salida de la cámara de combustión que comprende CO₂;
- 40 una turbina configurada para expandir la corriente de salida de la cámara de combustión para generar energía y formar una corriente de salida de la turbina que comprende CO₂;
- un intercambiador de calor adicional configurado para enfriar la corriente de salida de la turbina; y
- una bomba configurada para bombear el CO₂ de la corriente de salida de la turbina enfriada para formar la corriente de CO₂ de alta presión.

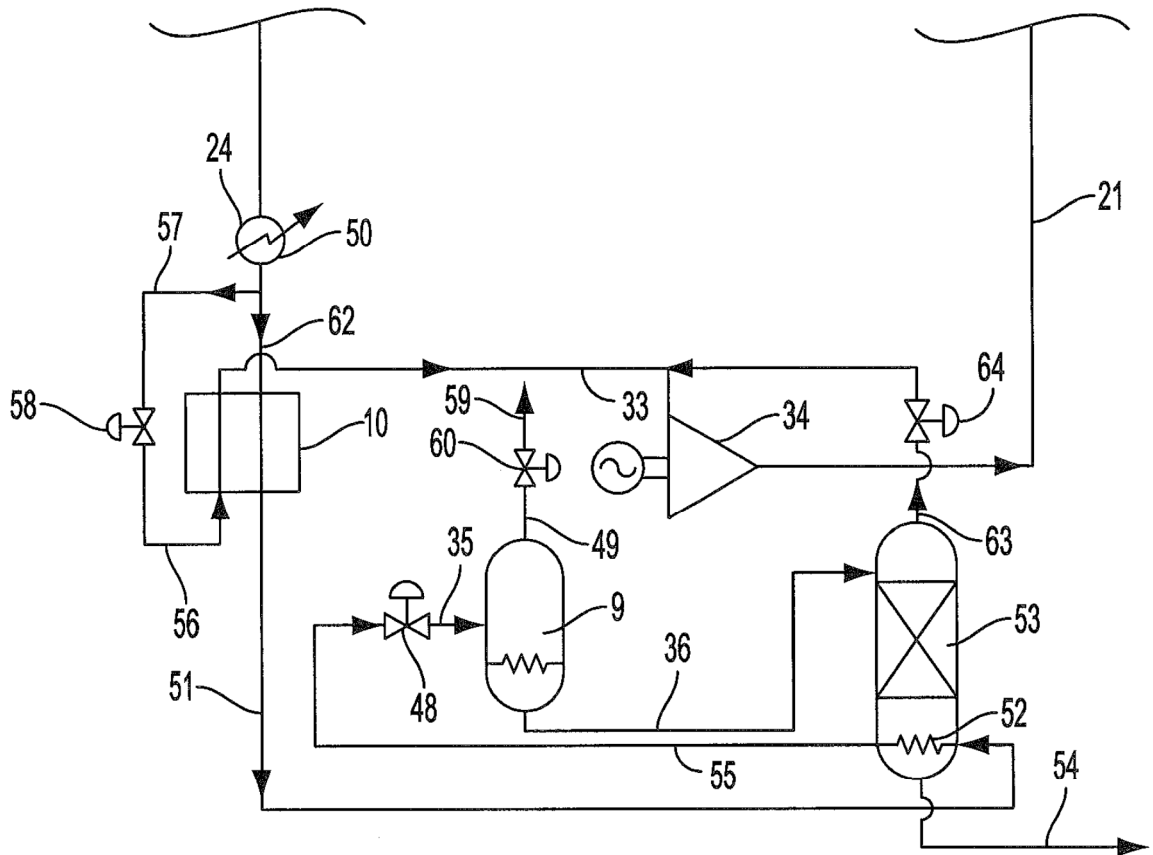


FIG. 1

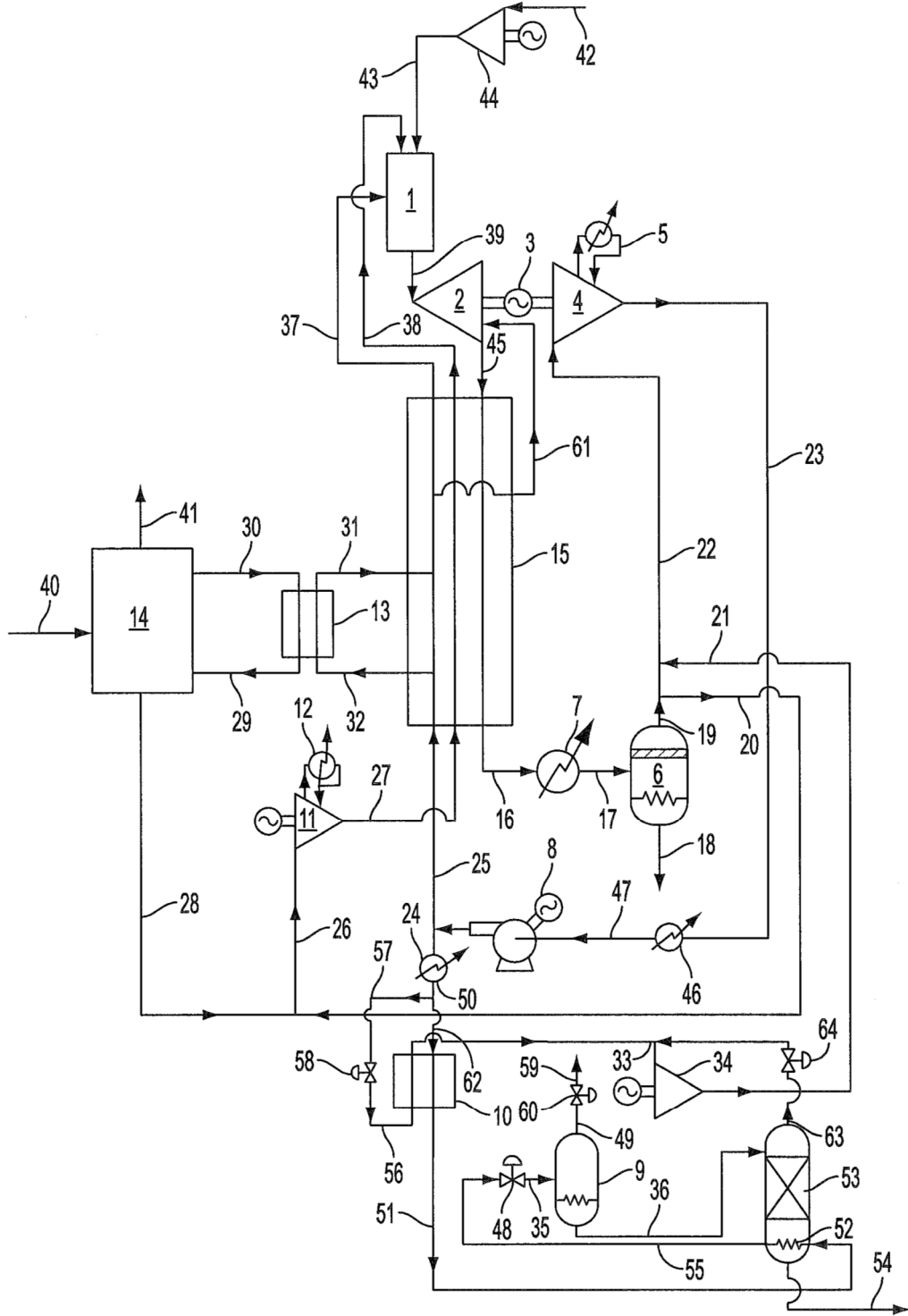


FIG. 2