

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 794 776**

51 Int. Cl.:

F02C 1/06	(2006.01)
F02C 1/08	(2006.01)
F02C 6/18	(2006.01)
F25J 3/04	(2006.01)
F01K 23/10	(2006.01)
F01K 25/10	(2006.01)
F02C 3/34	(2006.01)
F02C 1/00	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **31.08.2016 PCT/US2016/049667**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **09.03.2017 WO17040635**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.08.2016 E 16764027 (5)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.05.2020 EP 3344856**

54 Título: **Sistemas y métodos para la producción de energía que utilizan ciclos de CO₂ anidados**

30 Prioridad:

01.09.2015 US 201562212749 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
19.11.2020

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 y
FORREST, BROCK ALAN**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 794 776 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

Sistemas y métodos para la producción de energía que utilizan ciclos de CO₂ anidados

Campo de la invención

5 La presente descripción proporciona sistemas y métodos de producción de energía en los que un ciclo de producción de energía que utiliza un fluido circulante de CO₂ puede ser mejorado en su eficiencia. En particular, una corriente de CO₂ comprimido del ciclo de producción de energía puede calentarse con una fuente de calor independiente y expandirse para producir energía adicional y proporcionar calentamiento adicional para el ciclo de producción de energía.

Antecedentes

10 La solicitud de patente internacional WO 2012/128928 A1 describe un sistema de generación de energía que comprende un primer compresor configurado para recibir y comprimir uno o más oxidantes para generar un oxidante comprimido, una primera cámara de combustión configurada para recibir y quemar una primera porción del oxidante comprimido, al menos un primer combustible y un primer diluyente para generar una primera corriente de escape, un primer expansor configurado para recibir la primera corriente de escape de la primera cámara de combustión y generar una primera corriente de escape gaseosa, un segundo compresor configurado para recibir y comprimir una corriente de reciclado enfriada para generar una corriente de reciclado comprimida, una segunda cámara de combustión configurada para recibir y quemar una segunda porción del oxidante comprimido, al menos un segundo combustible y un segundo diluyente para generar una segunda corriente de escape, un segundo expansor configurado para recibir la segunda corriente de escape de la segunda cámara de combustión y generar una segunda corriente de escape gaseosa, un generador de vapor de recuperación de calor configurado para recibir y enfriar la primera y segunda corrientes de escape gaseosas para generar una corriente de escape combinada y vapor, una unidad de enfriamiento configurada para recibir y enfriar la corriente de escape combinada y generar la corriente de reciclado enfriada, y un separador configurado para recibir y separar una porción de la corriente de reciclado comprimida en una corriente efluente del separador y una corriente de producto del separador.

25 El ciclo de energía más común empleado actualmente que utiliza combustible de gas natural es la turbina de gas (GT) en combinación con un generador de vapor de recuperación de calor (HRSG). Dicho sistema puede denominarse ciclo combinado de gas natural (NGCC), en el que un sistema avanzado de generación de energía del ciclo Rankine de vapor (HRSG más turbinas de vapor) utiliza el calor de escape de la turbina caliente para formar vapor para una mayor generación de energía. Una unidad NGCC se entiende típicamente como un método eficiente de generación de energía que utiliza principalmente combustible de gas natural. En uso de una unidad NGCC, todos los CO₂, el vapor de agua y los óxidos de nitrógeno (NO_x) derivados de la combustión se ventilan a la atmósfera.

35 Se ha demostrado que la utilización de CO₂ (particularmente en forma supercrítica) como fluido de trabajo en la producción de energía es un método altamente eficiente para la producción de energía. Véase, por ejemplo, la patente de EE.UU. N° 8.596.075, de Allam et al., incorporándose la descripción en la presente memoria por referencia, que describe el uso de un fluido de trabajo de CO₂ calentado directamente en un sistema de generación de energía de ciclo Brayton de combustible oxigenado recuperado con prácticamente cero emisiones de cualquier corriente a la atmósfera. Se ha propuesto previamente que el CO₂ puede utilizarse como fluido de trabajo en un ciclo cerrado en el que el CO₂ se comprime y expande repetidamente para la producción de energía con calentamiento intermedio utilizando una fuente de calentamiento indirecto y uno o más intercambiadores de calor. Véase, por ejemplo, la patente de EE.UU. N° 8.783.034, de Held.

45 Se han buscado diversos medios para aumentar la eficiencia en tales métodos de producción de energía. Por ejemplo, se ha buscado la optimización del intercambiador de calor recuperativo, tal como a través de la compresión de gas caliente o mediante fuentes de calor externas. La optimización de los ciclos de CO₂ se ha centrado a menudo en maximizar la potencia de salida de la turbina. A pesar de tales esfuerzos, sigue existiendo una necesidad en el campo de sistemas y métodos de producción de energía con mayor eficiencia y potencia de salida, a la vez de limitar o evitar sustancialmente la emisión de cualquier corriente (p.ej., CO₂, NO_x y otros productos relacionados con la combustión) a la atmósfera.

Compendio de la invención

50 La presente descripción se refiere a sistemas y métodos para la producción de energía en los que la eficiencia de un ciclo de producción de energía que utiliza CO₂ como corriente de trabajo puede maximizarse, a la vez de aumentar simultáneamente la capacidad de producción de energía sin necesidad de cambios significativos en el equipo utilizado en el ciclo de producción de energía. Pueden lograrse mejoras en la eficiencia suministrando calor adicional a la corriente del fluido de trabajo más allá del calentamiento que puede recuperarse mediante el intercambio de calor interno, siendo suministrado el calor adicional por una fuente de calor externa que es independiente del ciclo de producción de energía. En particular, puede utilizarse una fuente de calor independiente para calentar al menos una parte de una corriente de CO₂ de reciclado a alta presión desde el ciclo de producción de energía, y la corriente así calentada puede volver a unirse al ciclo de producción de energía de varias maneras para lograr el calentamiento adicional de la corriente de trabajo de CO₂ de reciclado. Ventajosamente, la corriente de CO₂ de reciclado así calentada

puede expandirse para producir energía adicional y para acondicionar la corriente de CO₂ de reciclado así calentada para volver a unirse al ciclo de producción de energía primario a una presión que evita la necesidad de equipos adicionales.

5 En algunas realizaciones, la presente descripción proporciona así un método de producción de energía que comprende: un primer ciclo de producción de energía en el que una corriente de CO₂ de reciclado se somete a compresión repetida, calentamiento, combustión, expansión para producción de energía y enfriamiento; y un segundo ciclo de producción de energía en el que el CO₂ comprimido del primer ciclo de producción de energía se calienta con una fuente de calor que es independiente del primer ciclo de producción de energía, se expande para la producción de energía y se recombina con la corriente de CO₂ reciclada en el primer ciclo de producción de energía. En particular, 10 el calentamiento llevado a cabo en el primer ciclo de producción de energía corriente arriba de la combustión puede incluir recibir el calor que se proporciona al CO₂ reciclado comprimido en el segundo ciclo de producción de energía. Por ejemplo, el calentamiento en el primer ciclo de producción de energía puede comprender hacer pasar la corriente de CO₂ reciclado a través de un intercambiador de calor recuperativo contra una corriente de descarga de la turbina de enfriamiento, y la corriente de CO₂ comprimido calentada en el segundo ciclo de producción de energía puede 15 hacerse pasar a través del intercambiador de calor recuperativo (o un segmento específico o unidad del mismo) para comunicar un calentamiento adicional a la corriente de CO₂ reciclado en el primer ciclo de producción de energía. Como otro ejemplo no limitante, el primer ciclo de producción de energía puede incluir un intercambiador de calor secundario, y la corriente de CO₂ comprimido calentada en el segundo ciclo de producción de energía puede hacerse pasar a través del intercambiador de calor secundario contra una porción de la corriente de CO₂ reciclado en el primer ciclo de producción de energía, porción que puede recombinarse luego con la corriente de CO₂ reciclado restante 20 antes, durante o después del paso a través del intercambiador de calor recuperativo.

La fuente de calor en el segundo ciclo de producción de energía puede comprender cualquier dispositivo o combinación de dispositivos configurados para comunicar calentamiento a una corriente que sea suficiente para calentar una corriente de CO₂ comprimido como se describe en la presente memoria para que la corriente de CO₂ comprimido logre 25 la calidad y cantidad de calor deseadas. Como ejemplos no limitantes, la fuente de calor en el segundo ciclo de producción de energía puede ser una o más de una fuente de calor de combustión, una fuente de calor solar, una fuente de calor nuclear, una fuente de calor geotérmica y una fuente de calor residual industrial. La fuente de calor puede incluir un intercambiador de calor, una bomba de calor, un dispositivo de producción de energía y cualquier combinación adicional de elementos (p.ej., tuberías y similares) adecuados para formar, proporcionar o suministrar el calor necesario. 30

En otra realización ilustrativa, un método de producción de energía según la presente descripción puede comprender llevar a cabo un primer ciclo que incluye: expandir una corriente de trabajo que comprende CO₂ reciclado a través de una primera turbina para producir una primera cantidad de energía; retirar calor de la corriente de trabajo en un intercambiador de calor recuperativo; comprimir la corriente de trabajo; recalentar la corriente de trabajo utilizando el calor retirado en el intercambiador de calor recuperativo; y sobrecalentar la corriente de trabajo comprimida en una 35 cámara de combustión. El método también puede comprender llevar a cabo un ciclo anidado en el que la corriente de trabajo comprimida del primer ciclo se calienta con una fuente de calor que es independiente de la cámara de combustión y el intercambiador de calor recuperativo y se expande a través de una segunda turbina para producir una segunda cantidad de energía. En particular, la corriente de trabajo expandida del ciclo anidado puede utilizarse para agregar calor a la corriente de trabajo en el primer ciclo después de la compresión y antes del sobrecalentamiento. 40

En otras realizaciones, la presente descripción puede proporcionar métodos para mejorar la eficiencia de un ciclo de producción de energía. Como ejemplo no limitante, tal método puede comprender operar el ciclo de producción de energía para que el CO₂ comprimido y reciclado se haga pasar a través de una cámara de combustión en la que un combustible carbonoso se quema con un oxidante para producir una corriente de escape que comprende CO₂ 45 reciclado; la corriente de escape se expande a través de una turbina para producir energía y formar una corriente de escape de turbina que comprende CO₂ reciclado; la corriente de escape de la turbina se enfría en un intercambiador de calor recuperativo; la corriente de escape de la turbina enfriada se hace pasar a través de un separador para separar el CO₂ reciclado; el CO₂ reciclado se comprime; y el CO₂ reciclado comprimido se calienta al pasar a través del intercambiador de calor recuperativo contra la corriente de escape de la turbina. Tal método puede comprender además agregar más calentamiento al CO₂ reciclado comprimido por encima del nivel de calentamiento que está disponible de la corriente de escape de la turbina, siendo proporcionado el calentamiento adicional extrayendo una 50 porción del CO₂ reciclado comprimido, calentando la porción extraída de CO₂ reciclado comprimido con una fuente de calor que es independiente del ciclo de producción de energía, y transfiriendo calor del CO₂ reciclado comprimido extraído y calentado a la porción restante del CO₂ comprimido reciclado en el ciclo de producción de energía. Más particularmente, tal método puede comprender hacer pasar el CO₂ reciclado comprimido extraído y calentado a través del intercambiador de calor recuperativo para transferir calor al CO₂ reciclado comprimido en el mismo. Alternativamente, o además, tal método puede comprender hacer pasar el CO₂ reciclado comprimido extraído y calentado a través de un intercambiador de calor secundario para calentar una corriente lateral de CO₂ reciclado que luego se combina con la porción restante del CO₂ reciclado comprimido en el intercambiador de calor recuperativo. En algunas realizaciones, tal método puede comprender expandir el CO₂ reciclado comprimido extraído y calentado a 60 través de una segunda turbina para producir energía.

En una o más realizaciones, un método de producción de energía puede comprender: operar un primer ciclo de producción de energía en el que una corriente de trabajo de CO₂ se somete a una expansión repetida para la producción de energía, enfriamiento, compresión, calentamiento y combustión; y operar un segundo ciclo de producción de energía en el que al menos una porción de la corriente de trabajo de CO₂ comprimido del primer ciclo de producción de energía se calienta con una fuente de calor que es independiente del primer ciclo de producción de energía, se expande para la producción de energía y se recombina con la corriente de trabajo de CO₂ en el primer ciclo de producción de energía. En particular, tal método de producción de energía puede caracterizarse porque puede aplicarse uno cualquiera o más de los siguientes: dicha expansión para la producción de energía comprende expandir la corriente de trabajo de CO₂ a través de una primera turbina para producir una primera cantidad de energía; dicho enfriamiento comprende extraer calor de la corriente de trabajo de CO₂ en un intercambiador de calor recuperativo; dicha compresión comprende comprimir la corriente de trabajo de CO₂ con al menos un compresor; dicho calentamiento comprende calentar la corriente de trabajo de CO₂ utilizando calor extraído en el intercambiador de calor recuperativo; dicha combustión comprende sobrecalentar la corriente de trabajo de CO₂ comprimido en una cámara de combustión.

Además de lo anterior, el método de producción de energía puede definirse en que puede aplicarse uno cualquiera o más de los siguientes: dicho calentamiento en el primer ciclo de producción de energía incluye recibir el calor proporcionado a la corriente de trabajo de CO₂ en el segundo ciclo de producción de energía; la fuente de calor en el segundo ciclo de producción de energía es una o más de una fuente de calor de combustión, una fuente de calor solar, una fuente de calor nuclear, una fuente de calor geotérmica y una fuente de calor residual industrial; la corriente de trabajo expandida del segundo ciclo de producción de energía se utiliza para agregar calor a la corriente de trabajo de CO₂ en el primer ciclo de producción de energía después de la compresión y antes de la combustión.

Aún más, la producción de energía puede definirse en que la corriente de trabajo de CO₂ del segundo ciclo de producción de energía que se recombina con la corriente de trabajo de CO₂ en el primer ciclo de producción de energía es uno o más de: entrada después de dicha enfriamiento y antes de dicha compresión en el primer ciclo de producción de energía; entrada después de dicha compresión y antes de dicho calentamiento; entrada durante dicho calentamiento en el primer ciclo de producción de energía.

En realizaciones adicionales, la presente descripción también puede proporcionar sistemas de producción de energía. En realizaciones particulares, un sistema de producción de energía puede comprender: un compresor configurado para comprimir una corriente de CO₂ a una presión de al menos aproximadamente 10 MPa (100 bar); una cámara de combustión corriente abajo del compresor; una primera turbina corriente abajo de la cámara de combustión y corriente arriba del compresor; un primer intercambiador de calor colocado para recibir una corriente del compresor y para recibir una corriente independiente de la turbina y configurado para transferir calor entre las corrientes; una segunda turbina corriente abajo del compresor; y un segundo intercambiador de calor colocado para recibir una corriente del compresor y para recibir una corriente independiente de una fuente de calor.

En algunas realizaciones, puede integrarse una fuente de calor externa (tal como una turbina de gas) con un sistema de energía que utiliza CO₂ como corriente de trabajo. En algunas realizaciones, una corriente derivada de una fuente de calor externa (p.ej., una corriente de escape de una turbina de gas) puede ser enfriada contra una corriente de CO₂ de reciclado a alta presión de calentamiento. Opcionalmente, la corriente derivada de la fuente de calor externa puede calentarse adicionalmente mediante la combustión de un combustible carbonoso. En algunas realizaciones, una corriente de CO₂ de reciclado a alta presión calentada por una fuente de calor externa puede expandirse en una turbina productora de energía. La descarga de la turbina puede configurarse para corresponder a las presiones de entrada, intermedias o de salida de un compresor de CO₂ de reciclado en un ciclo de producción de energía independiente (tal como un ciclo Allam descrito en el ejemplo), mientras que la temperatura de entrada de la turbina puede corresponder a la presión de descarga de la bomba de CO₂ en el ciclo de producción de energía independiente. En algunas realizaciones, la corriente de CO₂ de reciclado a alta presión calentada por la fuente de calor externa se puede calentar hasta una temperatura de aproximadamente 400 °C a aproximadamente 1.500 °C, preferiblemente de aproximadamente 700 °C a aproximadamente 1.300 °C. La provisión de calor en tal intervalo de temperatura puede ser particularmente beneficiosa para lograr las mejoras que se describen en la presente memoria.

En otras realizaciones, se puede utilizar un flujo de descarga de turbina auxiliar a temperatura elevada para proporcionar el calor adicional requerido para calentar CO₂ en el intervalo de temperaturas desde la ambiente hasta 500 °C debido al calor específico mucho más alto del CO₂ en el intervalo de presiones de aproximadamente 20 MPa (200 bar) a aproximadamente 40 MPa (400 bar) en comparación con el calor específico por encima de 500 °C. Tal adición de calor en un intervalo de temperaturas más bajo se puede delinear específicamente a partir del calentamiento proporcionado a la corriente de CO₂ de reciclado a alta presión, como se describe en la presente memoria de otra manera. Aunque la adición de calor en el intervalo de temperaturas más bajo puede ser útil para mejorar la eficiencia del ciclo de combustión, la adición de calor en el intervalo de temperaturas más bajo no necesariamente se combina con la adición de calentamiento en el intervalo de temperaturas más grande. Si se desea, un calentamiento adicional de las corrientes de CO₂ de reciclado a alta presión en el intervalo de temperaturas por debajo de 250 °C puede ser beneficioso utilizando el calor derivado del compresor de aire principal adiabático de una planta de separación de aire criogénico, que proporciona el oxígeno requerido para el sistema.

Los sistemas y métodos descritos en la presente memoria son beneficiosos en algunas realizaciones porque se proporciona la capacidad de combinar sistemas de manera que se puedan compartir una o más piezas de equipo. La combinación puede proporcionar múltiples beneficios, que incluyen el aumento de la producción de energía y la reducción de los gastos de capital en relación con el aumento de la capacidad de Kw. Además, las combinaciones no se limitan necesariamente a ciertos intervalos de temperaturas de operación superpuestos. Por el contrario, puede combinarse beneficiosamente un sistema que opera en cualquier intervalo de temperaturas con un ciclo de producción de energía que utiliza CO₂ como corriente de trabajo (como se describe generalmente en la presente memoria) y lograr las mejoras deseadas.

Breve descripción de los dibujos

Habiendo descrito así la descripción en los términos generales anteriores, ahora se hará referencia a los dibujos adjuntos, que no están necesariamente dibujados a escala, y en los que:

La FIG. 1 es un diagrama de flujo de un sistema y método de producción de energía ilustrativo según la presente descripción; y

La FIG. 2 es un diagrama de flujo de un sistema y método de producción de energía que combina una turbina de gas y un ciclo de CO₂ según una realización ilustrativa de la descripción.

Descripción detallada

El presente tema se describirá ahora de manera más completa en lo sucesivo con referencia a realizaciones ilustrativas del mismo. Estas realizaciones ilustrativas se describen de modo que esta descripción será exhaustiva y completa, y transmitirá completamente el alcance del tema a los expertos en la técnica. De hecho, el tema puede realizarse de muchas formas diferentes, y no debe interpretarse como limitado a las realizaciones establecidas en la presente memoria; más bien, estas realizaciones se proporcionan para que esta descripción satisfaga los requisitos legales aplicables. Como se emplea en la memoria descriptiva, y en las reivindicaciones adjuntas, las formas singulares "un", "una", "el/la" incluyen referentes plurales, a menos que el contexto indique claramente lo contrario.

La presente descripción proporciona sistemas y métodos en los que un primer ciclo de producción de energía que utiliza CO₂ como corriente de trabajo puede combinarse con un segundo ciclo de producción de energía, o anidado, en el que al menos una parte de la misma corriente de CO₂ de trabajo puede ser sometida a un tratamiento adicional que da como resultado la producción de energía adicional y/o producción de calor. En tales sistemas y métodos, pueden lograrse altas eficiencias. En particular, el intercambio de calor recuperativo en el primer ciclo de producción de energía puede ser mejorado, a la vez que puede lograrse simultáneamente una producción de energía adicional. El tratamiento adicional en el segundo ciclo de producción de energía puede incluir el calentamiento con una fuente de calor que es independiente de cualquier calentamiento utilizado en el primer ciclo de producción de energía. La combinación del segundo ciclo de producción de energía con el primer ciclo de producción de energía puede ser beneficiosa, al menos en parte, debido a la capacidad de superponer los ciclos para que puedan utilizarse una o más piezas de maquinaria en ambos ciclos. Por ejemplo, un compresor utilizado en el primer ciclo de producción de energía también puede usarse como compresor en el segundo ciclo de producción de energía. La presente descripción puede caracterizarse así en relación con la combinación de al menos un flujo de CO₂ calentado directamente y al menos un flujo de CO₂ calentado indirectamente que utilizan turbo-maquinaria compartida para proporcionar al menos el beneficio de una mayor potencia de salida, a la vez de realizar simultáneamente la optimización de un intercambiador de calor recuperativo. El flujo de CO₂ calentado indirectamente puede, en algunas realizaciones, comprender al menos una porción del CO₂ del flujo calentado directamente. Por lo tanto, una única corriente de CO₂ de reciclado puede estar sujeta a compresión para formar una corriente de alta presión como se define en la presente memoria, dividirse en una corriente que se calienta indirectamente y una corriente que se calienta directamente, y recombinarse después de las etapas de calentamiento respectivas. Alternativamente, una única corriente de CO₂ de reciclado puede estar sujeta a compresión para formar una corriente de alta presión, una parte de la corriente de CO₂ de reciclado de alta presión puede calentarse indirectamente para formar una corriente de CO₂ calentado indirectamente, y la corriente de CO₂ calentado indirectamente puede combinarse con la corriente de CO₂ de reciclado restante para formar una corriente de CO₂ de reciclado total que está sujeta a calentamiento directo.

En algunas realizaciones, una corriente de alta presión de un primer ciclo de producción de energía (p.ej., una corriente de CO₂ de reciclado de alta presión) puede ser calentada por una fuente de calor independiente en un segundo ciclo de producción de energía. La corriente calentada se puede suministrar luego a un expansor adaptado para la producción de energía. Luego, la corriente expandida puede volver a insertarse en el primer ciclo de producción de energía de varias maneras que pueden comunicar beneficiosamente calentamiento al primer ciclo de producción de energía más allá del calentamiento que está disponible mediante la recuperación de una corriente de escape de turbina enfriada. La presión de descarga del expansor en el segundo ciclo de producción de energía puede adaptarse para que la corriente expandida pueda insertarse en el primer ciclo de producción de energía a la presión apropiada para el punto de inserción. El calentamiento proporcionado al primer ciclo de producción de energía de esta manera puede agregarse de varias maneras. Por ejemplo, la corriente expandida del segundo ciclo de producción de energía puede utilizarse directamente (en parte o en total) como corriente de calentamiento en un intercambiador de calor recuperativo en el que el CO₂ de reciclado a alta presión se está recalentando antes de entrar en una cámara de

combustión en el primer ciclo de producción de energía. Alternativamente, la corriente expandida del segundo ciclo de producción de energía puede utilizarse indirectamente, p.ej., como una corriente de calentamiento en un intercambiador de calor adicional mediante el cual se calienta una corriente independiente para uso como corriente de calentamiento en el intercambiador de calor recuperativo.

5 Un ciclo de producción de energía útil como primer ciclo de producción de energía según la presente descripción puede incluir cualquier sistema y método en el que se utilice CO₂ (particularmente CO₂ supercrítico - o sCO₂) en una corriente de trabajo. Como ejemplo no limitante, la patente de EE.UU. N° 8.596.075, de Allam et al., que se incorpora en la presente memoria por referencia, describe un sistema y método en el que una corriente de CO₂ de reciclado se calienta directamente y se utiliza en la producción de energía. Específicamente, la corriente de CO₂ de reciclado se
10 proporciona a alta temperatura y alta presión, se proporciona a una cámara de combustión en la que se quema un combustible carbonoso en oxígeno, se expande a través de una turbina para producir energía, se enfría en un intercambiador de calor, se purifica para retirar el agua y cualquier otra impureza, se presuriza, se vuelve a calentar utilizando el calor extraído del escape de la turbina y se hace pasar de nuevo a la cámara de combustión para repetir el ciclo. Tal sistema y método son beneficiosos porque todas las impurezas derivadas del combustible y la combustión,
15 el exceso de CO₂ y el agua son retirados en forma líquida o sólida (p.ej., cenizas), y prácticamente no hay emisión a la atmósfera de ninguna corriente. El sistema y el método logran una alta eficiencia mediante, por ejemplo, el uso de una entrada de calor de bajo nivel de temperatura (es decir, menos que 500 °C) después de que la corriente de CO₂ de reciclado ha sido represurizada y antes de la combustión.

Un ciclo de producción de energía útil como primer ciclo de producción de energía puede incluir más etapas o menos
20 etapas que las descritas anteriormente, y generalmente puede incluir cualquier ciclo en el que una corriente de CO₂ de reciclado de alta presión se expande para la producción de energía y se recicla de nuevo para una mayor producción de energía. Como se emplea en la presente memoria, una corriente de CO₂ de reciclado de alta presión puede tener una presión de al menos 10 MPa (100 bar), al menos 20 MPa (200 bar) o al menos 30 MPa (300 bar). Una corriente de CO₂ de reciclado de alta presión puede, en algunas realizaciones, tener una presión de
25 aproximadamente 10 MPa (100 bar) a aproximadamente 50 MPa (500 bar), aproximadamente 15 MPa (150 bar) a aproximadamente 45 MPa (450 bar), o aproximadamente 20 MPa (200 bar) a aproximadamente 40 MPa (400 bar). La referencia a una corriente de CO₂ de reciclado de alta presión en la presente memoria puede ser por tanto una corriente de CO₂ a una presión dentro de los intervalos anteriores. Tales presiones también se aplican a las referencias a otras corrientes de alta presión descritas en la presente memoria, tales como una corriente de trabajo de alta presión que
30 comprende CO₂.

En algunas realizaciones, un método de producción de energía según la presente descripción puede comprender combinar un primer ciclo de producción de energía con un segundo ciclo de producción de energía. En particular, el primer ciclo de producción de energía puede ser un ciclo en el que una corriente de CO₂ de reciclado se somete a compresión repetida, calentamiento, combustión, expansión para la producción de energía y enfriamiento. El segundo
35 ciclo de producción de energía puede ser un ciclo en el que el CO₂ reciclado comprimido del primer ciclo de producción de energía se calienta con una fuente de calor que es independiente del primer ciclo de producción de energía, se expande para la producción de energía y se recombina con la corriente de CO₂ reciclada en el primer ciclo de producción de energía.

Como ejemplo no limitante, un sistema 100 de producción de energía y un método de uso del mismo se ilustra en la
40 FIG. 1. En la misma, un primer ciclo 110 de producción de energía incluye una cámara 115 de combustión donde una alimentación 112 de combustible carbonoso y una alimentación 114 de oxidante se queman en presencia de una corriente 143 de CO₂ de reciclado para formar una corriente 117 de producto de combustión a alta presión y alta temperatura que se expande en una turbina 120 para producir energía con un generador 145. La corriente 122 de escape de la turbina 120 a alta temperatura se enfría en un intercambiador 125 de calor recuperativo para producir una corriente 127 de CO₂ de baja presión y baja temperatura que se hace pasar a través de un separador 130 con
45 productos 132 condensados (p.ej., agua) y una corriente 133 de CO₂ de reciclado sustancialmente puro que sale del mismo. La corriente 133 de CO₂ de reciclado sustancialmente puro se comprime en el compresor 135 para formar una corriente 137 de CO₂ de reciclado a alta presión que se divide en una primera porción 138 de corriente de CO₂ de reciclado y una segunda porción 151 de CO₂ de reciclado. La primera porción 138 de corriente de CO₂ de reciclado se hace pasar al intercambiador 125 de calor recuperativo donde se calienta contra la corriente 122 de escape de la
50 turbina de enfriamiento.

Un segundo ciclo 150 de producción de energía incluye una fuente 160 de calor que puede ser, por ejemplo, una turbina de gas que produce una corriente 162 de escape a alta temperatura y alta presión. La corriente 162 de escape calentada se hace pasar a través de un intercambiador 155 de calor en el que es enfriada contra la segunda porción
55 151 de corriente de CO₂ de reciclado de calentamiento extraída del primer ciclo 110 de producción de energía. Aunque la fuente 160 de calor se ilustra como un único elemento, se entiende que pueden utilizarse una pluralidad de fuentes de calor. Por ejemplo, pueden utilizarse dos o más turbinas de gas en paralelo, o puede utilizarse una combinación de diferentes tipos de fuentes de calor (p.ej., una turbina de gas combinada con una fuente de calor residual). La corriente 157 enfriada que sale del intercambiador 155 de calor puede ventilarse como se ilustra. En otras realizaciones, la corriente enfriada puede someterse a uno o más tratamientos, y/o la corriente 157 enfriada puede reciclarse a la fuente
60 160 de calor para calentarse de nuevo.

La fuente 160 de calor puede ser cualquier fuente adaptada para proporcionar una corriente a una temperatura suficientemente alta. En particular, la fuente de calor puede caracterizarse como independiente del primer ciclo de producción de energía. Una fuente de calor independiente puede ser una fuente de calor que es externa al ciclo de producción de energía y, por lo tanto, no participa en el ciclo de producción de energía. Por ejemplo, en la FIG. 1, se ilustra una única cámara 115 de combustión. La adición de una segunda cámara de combustión se entendería como una fuente de calor adicional, pero no se consideraría una fuente de calor externa o una fuente de calor que fuera independiente del ciclo de producción de energía, ya que la segunda cámara de combustión calentaría directamente la corriente de CO₂ reciclado y la producción del calor a través de la combustión afectaría directamente a los parámetros de funcionamiento de los elementos adicionales del ciclo de producción de energía. Como se ve en la FIG. 1, la fuente 160 de calor es independiente del primer ciclo 110 de producción de energía, porque la corriente de CO₂ reciclado nunca es calentada directamente por la fuente 160 de calor. Más bien, la fuente 160 de calor proporciona un calentamiento que se agrega indirectamente a la corriente de CO₂ reciclado por contracorriente a través del intercambiador 155 de calor. Como ejemplos no limitantes, la fuente de calor independiente que proporciona calentamiento indirecto a la corriente de CO₂ reciclado puede ser una o más de una fuente de calor de combustión (p.ej., una turbina de gas), una fuente de calor solar, una fuente de calor nuclear, una fuente de calor geotérmica o una fuente de calor residual industrial. En realizaciones adicionales, la energía puede suministrarse usando una fuente que no calienta sustancialmente pero que se combina con un elemento generador de calor. Por ejemplo, puede acoplarse un elemento giratorio (por ejemplo, una turbina eólica) con una bomba de calor.

Volviendo a la FIG. 1, después de calentar en el intercambiador 155 de calor, la segunda porción 141 de la corriente de CO₂ de reciclado calentada se expande a través de una turbina 165 para producir energía con un generador 170. La corriente 142 de escape de la turbina puede utilizarse de varias maneras para comunicar más calentamiento a la primera porción 138 de la corriente de CO₂ de reciclado. Como se ilustra en la FIG. 1, la corriente 142 de escape de la turbina se hace pasar a través del intercambiador 125 de calor recuperativo para calentar aún más la primera porción 138 de la corriente de CO₂ de reciclado. Aunque la corriente 142 de escape de la turbina se muestra entrando en el extremo caliente del intercambiador de calor recuperativo, se entiende que la corriente 142 de escape de la turbina puede ingresarse en el intercambiador 125 de calor recuperativo al nivel de calentamiento apropiado en base a la temperatura real de la corriente 142 de escape de la turbina. Además, en algunas realizaciones, la corriente 142 de escape de la turbina no puede retornar al intercambiador 125 de calor. Más bien, la corriente 142 puede ingresarse en uno o ambos de la corriente 133 de CO₂ de reciclado y la corriente 127 de CO₂ de baja temperatura. Aunque se ilustra un único intercambiador 125 de calor recuperativo, puede utilizarse una pluralidad de intercambiadores de calor recuperativos que funcionan a diferentes intervalos de temperatura, y la corriente 142 puede ingresarse en uno o más de dicha pluralidad de intercambiadores de calor recuperativos.

En otras realizaciones, la corriente 142 de escape de la turbina puede combinarse con la primera porción 138 de la corriente de CO₂ de reciclado antes de la entrada al intercambiador 142 de calor recuperativo. En tales realizaciones, por ejemplo, se puede proporcionar una compresión adicional a la segunda porción 151 de la corriente de CO₂ de reciclado y/o la segunda porción 141 de la corriente de CO₂ de reciclado calentada.

En otras realizaciones adicionales, la corriente 142 de escape de la turbina puede pasar a través de un intercambiador de calor independiente (no ilustrado en la figura 1). La primera porción 138 de la corriente de CO₂ de reciclado puede hacerse pasar a través del intercambiador de calor independiente antes de la entrada al intercambiador de calor recuperativo. Una corriente lateral de la primera porción 138 de la corriente de CO₂ de reciclado tomada durante el paso a través del intercambiador de calor recuperativo en un intervalo de calentamiento apropiado puede extraerse y hacerse pasar a través del intercambiador de calor independiente, y la corriente lateral calentada puede recombinarse luego con la primera porción de la corriente de CO₂ de reciclado en un intervalo de calentamiento apropiado. Todo o parte de la corriente 143 de CO₂ de reciclado calentada que sale del intercambiador 125 de calor recuperativo puede hacerse pasar a través del intercambiador de calor independiente para un calentamiento adicional. En estas realizaciones ilustrativas, el calor proporcionado en el segundo ciclo 150 de producción de energía agrega más calentamiento a la primera porción 138 de la corriente de CO₂ de reciclado más allá del nivel de calentamiento que está disponible desde la corriente 122 de escape de la turbina en solitario. La corriente 143 de CO₂ de reciclado calentada se ingresa posteriormente en la cámara 115 de combustión.

La corriente 142 de escape de la turbina del segundo ciclo 150 de producción de energía se enfría al pasar a través del intercambiador 125 de calor recuperativo y sale del extremo frío del mismo como corriente 144 de CO₂ de reciclado que, como se ilustra, se recombina con la corriente 133 de CO₂ de reciclado sustancialmente puro que sale del separador 130. Beneficiosamente, la turbina 165 en el segundo ciclo 150 de producción de energía puede funcionar con una relación de expansión deseada de modo que la presión de la corriente 142 de escape de la turbina esté suficientemente cerca de una presión requerida en un punto en el primer ciclo de producción de energía donde la corriente de CO₂ de reciclado se recombina. En algunas realizaciones, la corriente 144 de CO₂ de reciclado que sale del intercambiador 125 de calor recuperativo puede estar a una temperatura tal que un mayor enfriamiento sea beneficioso. Tal enfriamiento puede ocurrir en el separador 130, por ejemplo, cuando la corriente 144 de CO₂ de reciclado se combina con la corriente 127 a una presión más baja. Alternativamente, una corriente 144 de CO₂ de reciclado puede pasar a través de un refrigerador añadido (no mostrado en la figura 1).

El calentamiento adicional proporcionado por el segundo ciclo de producción de energía como se ilustró anteriormente puede ser particularmente útil para reducir o eliminar el diferencial de temperatura que de otro modo existe en el

extremo caliente del intercambiador de calor recuperativo debido a las diferentes capacidades de calor específicas del escape de la turbina que entra en el intercambiador de calor recuperativo y la corriente de CO₂ de reciclado que sale del intercambiador de calor recuperativo. Los sistemas y métodos en la presente memoria están adaptados para lograr tal beneficio al proporcionar la cantidad y calidad de calor necesarias como el calentamiento adicional. En base al caudal, la presión y la temperatura conocidos de la corriente de CO₂ de reciclado que entra en la turbina en el segundo sistema de producción de energía, puede elegirse una relación de expansión que permita que la corriente de CO₂ de reciclado que sale de la turbina en el segundo sistema de producción de energía proporcione la cantidad mínima de calor y temperatura necesitadas por el intercambiador de calor recuperativo en el primer ciclo de producción de energía.

Un sistema y método como el descrito anteriormente crea un circuito cerrado termodinámico anidado dentro de un primer ciclo de producción de energía. La mezcla de gases en el ciclo anidado puede interactuar con el flujo expulsado directo de CO₂ de reciclado, ya que ambos ciclos pueden compartir equipos de bombeo, así como equipos de condensación si se desea. Por ejemplo, aunque la corriente 144 se muestra estando combinada con la corriente 133 en la FIG. 1, la corriente 144 puede combinarse alternativamente con la corriente 127 antes de la entrada al separador 130 y/o antes de la entrada a un condensador (no ilustrado en la figura 1).

Cada uno del primer ciclo de producción de energía y el segundo ciclo de producción de energía pueden ser capaces de ser llevados a cabo independientemente para la producción de energía. La combinación de los mismos, sin embargo, proporciona beneficios particulares. En un primer ciclo de producción de energía tal como se muestra en la FIG. 1, una ventaja es la capacidad de recuperar una cantidad significativa del calor del escape de la turbina para su uso en el recalentamiento de la corriente de CO₂ de reciclado después de la compresión y antes del paso a la cámara de combustión. Sin embargo, la eficiencia puede verse limitada por la capacidad de agregar suficiente calor para elevar la temperatura de la corriente de CO₂ de reciclado que sale del extremo caliente del intercambiador de calor recuperativo para estar lo suficientemente cerca de la temperatura del escape de la turbina que entra en el extremo caliente del intercambiador de calor recuperativo. La necesidad de entrada de calentamiento adicional se identifica en la patente de EE.UU. N° 8.596.075, de Allam et al., y se identifican varias fuentes posibles de calor de baja intensidad (p.ej., a una temperatura menor que aproximadamente 500 °C). La presente descripción mejora aún más tales sistemas y métodos en que puede usarse una fuente externa de calor (es decir, calor que es completamente independiente del primer ciclo de producción de energía) para proporcionar el calentamiento adicional necesario para lograr la eficiencia del recuperador requerida a la vez que se proporcionan simultáneamente aumentos significativos en la generación de energía sin la necesidad de cambios significativos en el equipo primario utilizado en el primer ciclo de producción de energía. En realizaciones particulares, la presente descripción proporciona específicamente la integración de estaciones/equipos de energía existentes en un ciclo de producción de energía utilizando una corriente de CO₂ de reciclado como corriente de trabajo.

En algunas realizaciones, los presentes sistemas y métodos pueden adaptarse para mejorar la eficiencia de un ciclo de producción de energía. Para este fin, se puede operar un ciclo de producción de energía como se describe en la presente memoria en relación con un primer ciclo de producción de energía. El ciclo de producción de energía para el cual se mejora la eficiencia puede incluir típicamente cualquier ciclo de producción de energía mediante el cual un fluido de trabajo que comprende CO₂ se cicla repetidamente al menos a través de etapas de compresión, calentamiento, expansión y enfriamiento. En diversas realizaciones, un ciclo de producción de energía para el que puede mejorarse la eficiencia puede incluir combinaciones de las siguientes etapas:

- combustión de un combustible carbonoso con un oxidante en presencia de una corriente de CO₂ reciclado para proporcionar una corriente de producto de combustión a una temperatura de al menos aproximadamente 500 °C o al menos aproximadamente 700 °C (p.ej., aproximadamente 500 °C a aproximadamente 2.000 °C o aproximadamente 600 °C a aproximadamente 1500 °C) y una presión de al menos aproximadamente 10 MPa (100 bar) o al menos aproximadamente 20 MPa (200 bar) (p.ej., aproximadamente 10 MPa (100 bar) a aproximadamente 50 MPa (500 bar) o aproximadamente 15 MPa (150 bar) a aproximadamente 40 MPa (400 bar));
- expansión de una corriente de CO₂ reciclado a alta presión (p.ej., a una presión como se indicó anteriormente) a través de una turbina para producción de energía;
- enfriamiento de una corriente de CO₂ reciclado a alta temperatura (p.ej., a una presión como se indicó anteriormente), particularmente de una corriente de descarga de turbina, en un intercambiador de calor recuperativo;
- condensación de uno o más productos de combustión (p.ej., agua) en un condensador, estando presentes los productos de combustión particularmente en una corriente de producto de combustión que se ha expandido y enfriado;
- separar el agua y/o otros materiales del CO₂ para formar una corriente de CO₂ reciclado;

- comprimir una corriente de CO₂ reciclado a una presión alta (p.ej., una presión como se indicó anteriormente), que se lleva a cabo opcionalmente en múltiples etapas con inter-enfriamiento para aumentar la densidad de la corriente; y
- calentar una corriente de CO₂ reciclado comprimida en un intercambiador de calor recuperativo, particularmente calentamiento contra una corriente de escape de la turbina de enfriamiento.

Como se indicó anteriormente, la eficiencia mejorada de un ciclo de producción de energía se puede lograr particularmente agregando más calentamiento al CO₂ reciclado comprimido por encima del nivel de calentamiento (p.ej., calentamiento recuperativo en un intercambiador de calor) que está disponible de una corriente de escape de la turbina. La presente descripción logra tal calentamiento adicional utilizando una porción de la corriente de CO₂ reciclado del ciclo de producción de energía. Ventajosamente, puede agregarse un ciclo anidado al ciclo de producción de energía utilizando al menos el mismo equipo de compresión que el utilizado en el ciclo de producción de energía. En particular, puede proporcionarse un calentamiento adicional extrayendo una porción del CO₂ reciclado comprimido, calentando la porción extraída de CO₂ reciclado comprimido con una fuente de calor que es independiente del ciclo de producción de energía, y transfiriendo calor del CO₂ reciclado comprimido extraído y calentado a la porción restante del CO₂ reciclado comprimido en el ciclo de producción de energía. Por lo tanto, el ciclo anidado puede ser sustancialmente similar al segundo ciclo de producción de energía descrito en relación con la FIG. 1.

En realizaciones adicionales, la presente descripción también se refiere a sistemas de producción de energía. En particular, tales sistemas pueden comprender una o más bombas o compresores configurados para comprimir una corriente de CO₂ a una presión alta como se describe en la presente memoria. Los sistemas pueden comprender una o más válvulas o divisores configurados para dividir la corriente de CO₂ comprimida al menos en una primera porción de corriente de CO₂ y una segunda porción de corriente de CO₂. Los sistemas pueden comprender un primer intercambiador de calor (o unidad de intercambio de calor que comprende una pluralidad de secciones) configurado para calentar la primera porción de corriente de CO₂ contra una corriente de descarga de turbina de alta temperatura y un segundo intercambiador de calor configurado para calentar la segunda porción de corriente de CO₂ contra una corriente calentada desde una fuente de calor externa (o independiente). Los sistemas pueden comprender una primera turbina configurada para expandir la primera porción de corriente de CO₂ para producir energía y una segunda turbina configurada para expandir la segunda porción de corriente de CO₂ para producir energía. Los sistemas pueden comprender uno o más elementos de transferencia configurados para transferir calor desde la segunda porción de corriente de CO₂ calentada a la primera porción de corriente de CO₂. Los sistemas pueden comprender una cámara de combustión configurada para quemar un combustible carbonoso en un oxidante en presencia de la primera porción de corriente de CO₂.

Los sistemas de la presente descripción pueden caracterizarse en relación con una configuración como un sistema de producción de energía primario y un sistema de producción de energía secundario, teniendo los dos sistemas fuentes de calor independientes y al menos un elemento de compresión compartido (y opcionalmente al menos un elemento de condensación compartido). Por ejemplo, un sistema según la presente descripción puede comprender un sistema de producción de energía primario que incluye un compresor configurado para comprimir una corriente de CO₂ a alta presión como se describe en la presente memoria, una cámara de combustión corriente abajo del compresor, una primera turbina corriente abajo de la cámara de combustión y corriente arriba del compresor, y un primer intercambiador de calor colocado para recibir una corriente del compresor y recibir una corriente independiente de la turbina. Opcionalmente, puede colocarse un separador corriente abajo del primer intercambiador de calor y corriente arriba del compresor. Además, opcionalmente, se puede colocar un compresor corriente arriba del compresor y corriente abajo del primer intercambiador de calor. Un sistema según la presente descripción también puede comprender un sistema de producción de energía secundario que incluye el compresor del sistema de producción de energía primario, una segunda turbina corriente abajo del compresor y un segundo intercambiador de calor colocado para recibir una corriente del compresor y para recibir una corriente independiente de una fuente de calor externa (o independiente). El sistema puede comprender además una o más válvulas o divisores corriente abajo del compresor y corriente arriba de cada uno del primer intercambiador de calor y el segundo intercambiador de calor.

Ejemplo

Las realizaciones de la presente descripción se ilustran adicionalmente mediante el siguiente ejemplo, que se expone para ilustrar el presente tema descrito y no debe interpretarse como limitante. A continuación, se describe una realización de un sistema y método de producción de energía que utiliza un ciclo de CO₂ anidado, como se ilustra en la FIG. 2.

Se modeló un ciclo de producción de energía en base a la combinación de una turbina de gas con un ciclo de producción de energía que utiliza una corriente de trabajo de CO₂ circulante, como se describe en la patente de EE.UU. N° 8.596.075, de Allam et al., denominándose dicho ciclo de producción de energía en la presente memoria ciclo Allam. Las turbinas de gas industriales son sistemas eficientes, de bajo costo y capital, con una larga historia de desarrollo técnico y una gran capacidad de fabricación mundial. El ciclo Allam ofrece aproximadamente la misma eficiencia que el sistema NGCC al mismo costo de capital con la ventaja de capturar toda la producción de CO₂ a partir de gas natural como un producto sustancialmente puro a una presión de tubería típicamente entre aproximadamente 10 MPa (100 bar) y aproximadamente 20 MPa (200 bar). En la realización ilustrativa, una turbina de gas se integra

con el ciclo Allam eliminando todo el sistema de energía de vapor de una planta NGCC y utilizando el escape de la turbina de gas caliente para proporcionar calor para la generación de energía adicional utilizando el fluido de trabajo de CO₂ del ciclo Allam y proporcionando la entrada de calor de baja temperatura requerida en el ciclo Allam para lograr la máxima eficiencia. Esta combinación permite mantener una alta eficiencia para el sistema integrado a la vez que proporciona también un menor coste de capital por Kw de capacidad instalada. En algunas realizaciones, la combinación de la presente descripción puede ir acompañada de una caída sustancialmente insignificante en la eficiencia global para el sistema integrado. Sin embargo, en otras realizaciones, no puede haber sustancialmente ninguna caída en la eficiencia global. En otras realizaciones adicionales, la combinación de la presente descripción puede permitir un aumento en la eficiencia global para el sistema integrado. En las diversas realizaciones de la presente descripción, una reducción en los gastos de capital también puede ser un resultado beneficioso.

Brevemente, en la realización ilustrativa, el escape caliente de una turbina de gas se hace pasar a través de una unidad de recuperación de calor similar a un HRSG que calienta una corriente de CO₂ a alta presión (por ejemplo, 30 MPa (300 bar) a 50 MPa (500 bar)) tomada como flujo adicional de las unidades de compresión de reciclado del CO₂ del ciclo Allam. El CO₂ calentado se hace pasar a través de una turbina productora de energía que tiene una presión de descarga que corresponde a la presión de entrada de la bomba de CO₂ del ciclo Allam o a la presión de entrada o presión intermedia del compresor de ciclado del CO₂. El flujo de descarga de la turbina auxiliar, que tiene una temperatura en el intervalo de aproximadamente 200 °C a aproximadamente 500 °C, se utiliza luego para proporcionar el calentamiento a baja temperatura para las corrientes de CO₂ de reciclado a alta presión en el ciclo Allam más el calentamiento adicional requerido en el intercambiador de calor de escape de la turbina de gas. Opcionalmente, puede haber una entrada de calor de bajo grado adicional a las corrientes de CO₂ de alta presión totales operando el compresor de aire principal de la planta de oxígeno criogénico adiabáticamente. Esto libera una parte del flujo de descarga del expansor auxiliar para precalentar la entrada de gas natural total a la turbina de gas y las cámaras de combustión del ciclo Allam. Opcionalmente, el escape de la turbina de gas se puede elevar en temperatura con un disparo adicional de gas combustible utilizando el contenido de oxígeno residual en el escape de la turbina de gas. Esto aumenta la temperatura de entrada y la potencia de salida de la turbina de potencia auxiliar ya que la corriente de CO₂ de alta presión se calentará a una temperatura más alta en el calentador de escape de la turbina de gas. Opcionalmente, el flujo de enfriamiento requerido por la turbina de alta presión del ciclo Allam a una temperatura en el intervalo de aproximadamente 300 °C a aproximadamente 500 °C puede calentarse utilizando el flujo de escape de la turbina auxiliar en lugar del flujo de escape principal de la turbina del ciclo Allam. La temperatura de entrada de la turbina de gas auxiliar puede estar en el intervalo de aproximadamente 500 °C a aproximadamente 900 °C. No se requerirá refrigeración interna o de película especial ni recubrimientos para las palas de la turbina a estas temperaturas.

Se muestra una realización ilustrativa de un sistema integrado en la FIG. 2, estando basado el modelo ilustrado en la integración de una turbina de gas GE7FB y una central eléctrica de ciclo Allam que tiene las características de rendimiento independientes mostradas en la Tabla 1 a continuación (en donde todos los cálculos están basados en el uso de metano puro (CH₄) como gas combustible).

TABLA 1

<u>Parámetro</u>	<u>Sistema 7FB NGCC</u>	<u>Sistema de energía del ciclo Allam</u>
Salida de potencia neta	280,3 MW	298,2 MW
Entrada de calor de gas natural	488,8 MW	510,54 MW
Eficiencia neta	57,3%	58,41%
Vacío del condensador	5,76 kPa (1,7 pulgadas Hg, 0,835 psia)	ND
Energía de la turbina de gas	183,15 MW	ND
Entrada de O ₂ (99,5% en moles a 3 MPa (30 bar))	ND	3.546 MT/día
Salida de CO ₂ (97% en moles de pureza a 15 MPa (150 bar))	ND	2.556 MT/día

Haciendo referencia a la FIG. 2, una turbina 1 de gas GE 7FB que funciona en condiciones ISO tiene una corriente 64 de entrada de aire que entra en el compresor de la turbina de gas y una corriente 3 de gas natural que entra en la cámara 2 de combustión de la turbina de gas. La turbina de gas produce una potencia 6 de salida de 183,15 MW a partir de un generador 5 eléctrico acoplado. El escape 4 de la turbina de gas a 624 °C puede calentarse en una cámara

26 de combustión quemando una corriente 27 de gas natural adicional que produce una corriente 28 calentada que se hace pasar al intercambiador 58 de calor para precalentar una corriente 38 de CO₂ de reciclado a alta presión a 30,5 MPa (305 bar) a 50 °C para producir la corriente 29 de salida calentada y la corriente 34 de descarga enfriada, que puede ventilarse. La eficiencia del sistema global no cambia al quemar combustible adicional en el escape de la turbina de gas 7FB para aumentar la temperatura de entrada de la turbina 7 auxiliar de alta presión. La corriente 38 de CO₂ de reciclado de alta presión se toma como un flujo adicional de la descarga de la bomba 55 de CO₂ del ciclo Allam, que está acoplada al motor eléctrico 56. La turbina 7 está acoplada a un generador 8 eléctrico que produce una corriente 9 de energía de exportación. Para el caso específico considerado, la turbina 7 se ha especificado con una presión de salida de 3 MPa (30 bar) y una presión de entrada de 30 MPa (300 bar). La entrada de calor al escape de 7FB en el quemador 26 es de 65,7 MW. Esto da como resultado que el flujo 4 de escape 7FB se calienta de 624 °C a 750 °C. La corriente 66 de salida está a 457 °C y la presión de descarga de 3 MPa (30 bar) permite que esta corriente, después del enfriamiento, se vuelva a comprimir en el compresor 18 de CO₂ de reciclado de dos etapas del ciclo Allam que tiene una presión de entrada de 2,9 MPa (29 bar). Las presiones de salida más favorables para la turbina 7 corresponden a las presiones de entrada, intermedias y de salida para el compresor 18 de CO₂ de reciclado, que tiene una entrada de 2,9 MPa (29 bar) a un intervalo de salida de 6,7 MPa (67 bar) a 8 MPa (80 bar) dependiendo de las condiciones de enfriamiento del agua de enfriamiento/ambiente.

La corriente 66 de salida de la turbina está integrada en el sistema para precalentar las corrientes de CO₂ de alta presión de manera óptima. La corriente 66 se divide en 3 partes. La corriente 65 entra en el intercambiador 68 de calor donde se usa para precalentar las corrientes (3a a 3, 14a a 14 y 27a a 27) de gas natural a una temperatura de salida de 425 °C y sale como corriente 67. La corriente 25 entra en el intercambiador 60 de calor donde se utiliza para calentar la corriente 36 de CO₂ a 30 MPa (300 bar) y 50 °C tomada de la corriente 35 de descarga de la bomba 55 de CO₂ para producir la corriente 62 de enfriamiento a 400 °C para la turbina 17 del ciclo Allam, más la corriente 59 de CO₂ de reciclado calentada externamente a 424 °C, que entra en el intercambiador 61 de calor principal en un punto intermedio. La corriente 30 entra en el enfriador 58 de escape 7FB en un punto intermedio y proporciona calentamiento adicional en la sección de temperatura más baja, saliendo como corriente 32. Estas tres tareas de intercambio de calor independientes para el flujo 66 de escape de la turbina de gas auxiliar compensan el gran aumento en el calor específico de la corriente de CO₂ a 30 MPa (30 MPa) a temperaturas más bajas y cubren las tareas requeridas por el calentamiento total del flujo de CO₂ a alta presión.

La planta 82 de separación de aire criogénico produce una corriente 49 de oxígeno producto a una presión de 3 MPa (30 bar) y una pureza de 99,5% en moles. La corriente 83 de alimentación de aire se comprime adiabáticamente en un compresor 69 axial con un compresor 70 de aire de refuerzo acoplado, ambos accionados por un motor 71 eléctrico. Toda la corriente de aire de alimentación se comprime en 69 a 0,57 MPa (5,7 bar). La salida 78 de aire a 226 °C se usa para calentar una corriente 74 de CO₂ a 30 MPa (300 bar) de entrada de 50 °C a 220 °C en el intercambiador 73 de calor dando la corriente 75 de salida. Esta se divide en dos corrientes 76 y 77, que se introducen en puntos intermedios en los intercambiadores 60 y 58 de calor, respectivamente, para proporcionar una mayor entrada de calor en el nivel de temperatura más bajo a las corrientes 38 y 36 de CO₂ de calentamiento a alta presión. La corriente 80 principal de alimentación de aire y la corriente 81 de aire reforzado a una presión de 6,5 MPa (65 bar), después de un enfriamiento hasta casi la temperatura ambiente, entran en la ASU 82.

El sistema del ciclo Allam comprende una turbina 17 con una cámara 13 de combustión asociada acoplada a un generador 16 eléctrico que produce una salida 15. La corriente 11 de combustible de gas natural se comprime a 32 MPa (320 bar) en un compresor inter-enfriado 12 de dos etapas accionado por un motor 10 eléctrico. El gas natural se precalienta en 68. La turbina se acopla directamente al compresor 18 de reciclado de CO₂ principal, que tiene dos etapas con un refrigerador 19 intermedio. La presión de entrada en la línea 21 es 2,9 MPa (29 bar) y la presión de descarga en la línea 22 es 6,7 MPa (67 bar). El flujo 22 de descarga se enfría hasta cerca de la temperatura ambiente en el intercambiador 40 de calor dando un flujo 39 de entrada de la bomba de CO₂ con una densidad de aproximadamente 0,8 kg/litro. La descarga de la bomba proporciona (además del flujo 37 de reciclado de CO₂ principal) corrientes adicionales 36, 38 y 74 utilizadas para la integración de la turbina de gas 7FB. El CO₂ neto producido a partir de la combustión de la corriente 14 de gas natural se descarga a una presión de 30,5 MPa (305 bar) como corriente 84 para su entrega a una tubería. El principal intercambiador de calor recuperativo de la unidad 61 del ciclo Allam enfría la corriente 24 de escape de la turbina a 725 °C a 60 °C, corriente 41, que tiene la corriente 33 del sistema de integración de turbina de gas 7FB agregada a la misma (siendo la corriente 33 una combinación de la corriente 31 desde el intercambiador 60 de calor y la corriente 32 desde el intercambiador 58 de calor y la corriente 67 desde el intercambiador 68 de calor). La corriente 42 combinada se enfría cerca de la temperatura ambiente en el refrigerador 43 para producir la corriente 44 que entra en el separador 45 donde se separa el agua líquida condensada, dejando como corriente 46. La corriente 47 de gas CO₂ de salida a 2,9 MPa (29 bar) se divide en la corriente 21 de entrada al compresor de CO₂ de reciclado principal y una corriente 48 que se mezcla con la corriente 49 de oxígeno puro para producir una corriente 50 oxidante con un contenido de O₂ de 25% en moles. Esta corriente se comprime a 30,5 MPa (305 bar) en un compresor 54 multietapa (con refrigerador intermedio 54a) accionado por un motor 52 eléctrico. La corriente 51 de descarga junto con la corriente 37 de CO₂ de reciclado se calientan a 715 °C en el intercambiador 61 de calor contra la corriente 24 de escape de la turbina para formar la corriente 20 que entra en la cámara 13 de combustión y la corriente 23 que entra en la corriente de escape de la cámara de combustión para moderar la temperatura de entrada de la turbina 17 a aproximadamente 1.150 °C.

El sistema integrado ilustrado incorpora un modelo específico de turbina de gas que da como resultado una utilización eficiente del calor disponible en el escape de la turbina de gas. Se pueden utilizar turbinas de gas más grandes y más pequeñas. Los valores de rendimiento en base al modelo ilustrado están en la Tabla 2.

TABLA 2

<u>Parámetro</u>	<u>Sistema Integrado</u>
Potencia de salida neta total	594,1 MW
Entrada de calor de gas natural total	1.040 MW
Eficiencia neta total	57,131%
Entrada de O ₂ (99,5% en moles a 3 MPa (30 bar))	3.546 MT/día
Salida de CO ₂ (pureza de 97% en moles a 15 MPa (150 bar))	2.556 MT/día

5

El sistema ilustrado puede utilizarse para la integración de unidades de turbina de gas de ciclo abierto existentes que comprimen el aire ambiente como su fluido de trabajo. Es igualmente aplicable a las turbinas de gas de ciclo cerrado que usan cámaras de combustión de combustible oxigenado, utilizándose el escape de la turbina enfriado como alimentación del compresor de la turbina de gas después de la retirada del CO₂ producido, agua, inertes y exceso de oxígeno. Para este tipo de turbina de gas, es posible una retirada prácticamente completa de CO₂ desde el sistema. Para una turbina de gas de ciclo abierto convencional, solo puede retirarse el CO₂ derivado del ciclo Allam para su secuestro.

10

REIVINDICACIONES

1. Un método de producción de energía, que comprende:
 - operar un primer ciclo (110) de producción de energía en donde una corriente de trabajo de CO₂ se somete a una expansión repetida para la producción de energía, enfriamiento, compresión, calentamiento y combustión; y
 - 5 operar un segundo ciclo (150) de producción de energía en donde al menos una porción de la corriente de trabajo de CO₂ comprimida del primer ciclo de producción de energía se calienta con una fuente (160) de calor que es independiente del primer ciclo (110) de producción de energía, se expande para la producción de energía y se recombina con la corriente de trabajo de CO₂ en el primer ciclo (110) de producción de energía.
2. El método de producción de energía de la reivindicación 1, en donde, en la operación del primer ciclo (110) de
 10 producción de energía:
 - dicha expansión para la producción de energía comprende expandir la corriente de trabajo de CO₂ a través de una primera turbina (120) para producir una primera cantidad de energía;
 - dicho enfriamiento comprende extraer calor de la corriente de trabajo de CO₂ en un intercambiador (125) de calor recuperativo;
 - 15 dicha compresión comprende comprimir la corriente de trabajo de CO₂ con al menos un compresor (135);
 - dicho calentamiento comprende calentar la corriente de trabajo de CO₂ utilizando calor extraído en el intercambiador (125) de calor recuperativo; y
 - dicha combustión comprende sobrecalentar la corriente de trabajo de CO comprimida en una cámara (115) de combustión.
- 20 3. El método de producción de energía de la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en donde dicho calentamiento en el primer ciclo (110) de producción de energía incluye recibir el calor proporcionado a la corriente de trabajo de CO₂ en el segundo ciclo (150) de producción de energía.
4. El método de producción de energía de la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en donde la fuente (160) de calor
 25 en el segundo ciclo (150) de producción de energía es una o más de una fuente de calor de combustión, una fuente de calor solar, una fuente de calor nuclear, una fuente de calor geotérmico y una fuente de calor residual industrial.
5. El método de producción de energía de la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en donde la corriente de trabajo
 30 expandida del segundo ciclo (150) de producción de energía se utiliza para agregar calor a la corriente de trabajo de CO₂ en el primer ciclo (110) de producción de energía después de la compresión y antes de la combustión.
6. El método de producción de energía de la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en donde la corriente de trabajo de
 35 CO₂ del segundo ciclo (150) de producción de energía que se recombina con la corriente de trabajo de CO₂ en el primer ciclo (110) de producción de energía es uno o más de:
 - entrada después de dicho enfriamiento y antes de dicha compresión en el primer ciclo (110) de producción de energía;
 - entrada después de dicha compresión y antes de dicho calentamiento;
 - 35 entrada durante dicho calentamiento en el primer ciclo (110) de producción de energía.
7. Un método para mejorar la eficiencia de un ciclo de producción de energía, comprendiendo el método:
 - operar el ciclo de producción de energía para que el CO₂ comprimido y reciclado se haga pasar a través de una
 40 cámara (115) de combustión en la que un combustible carbonoso se quema con un oxidante para producir una corriente de escape que comprende CO₂ reciclado; la corriente de escape se expande a través de una turbina (120) para producir energía y formar una corriente de escape de turbina que comprende CO₂ reciclado; la corriente de escape de la turbina se enfría en un intercambiador (125) de calor recuperativo; la corriente de escape de la turbina enfriada se hace pasar a través de un separador (130) para separar el CO₂ reciclado; el CO₂ reciclado se comprime; y el CO₂ reciclado comprimido se calienta pasando a través del intercambiador (125) de calor recuperativo contra la corriente de escape de la turbina; y
 - 45 agregar más calentamiento al CO₂ reciclado comprimido por encima del nivel de calentamiento que está disponible de la corriente de escape de la turbina, siendo proporcionado el calentamiento adicional extrayendo una porción del CO₂ reciclado comprimido, calentando la porción extraída de CO₂ reciclado comprimido con una fuente de calor que es independiente del ciclo de producción de energía, y transfiriendo calor del CO₂ reciclado comprimido extraído y calentado a la porción restante del CO₂ comprimido reciclado en el ciclo de producción de energía.

8. El método de la reivindicación 7, que comprende hacer pasar el CO₂ reciclado comprimido extraído y calentado a través del intercambiador (125) de calor recuperativo para transferir calor al CO₂ reciclado comprimido en el mismo.
9. El método de la reivindicación 7, que comprende pasar el CO₂ reciclado comprimido extraído y calentado a través de un intercambiador (155) de calor secundario para calentar una corriente lateral de CO₂ reciclado que luego se combina con la porción restante del CO₂ reciclado comprimido en el intercambiador de calor recuperativo.
10. El método de la reivindicación 7, que comprende expandir el CO₂ reciclado comprimido extraído y calentado a través de una segunda turbina (165) para producir energía.
11. Un sistema de producción de energía, que comprende:
- un compresor (135) configurado para comprimir una corriente de CO₂ a una presión de al menos aproximadamente 10 MPa (100 bar);
 - una cámara (115) de combustión corriente abajo del compresor (135);
 - una primera turbina (120) corriente abajo de la cámara (115) de combustión y corriente arriba del compresor (135);
 - un primer intercambiador (125) de calor colocado para recibir una corriente del compresor (135) y recibir una corriente independiente de la turbina (120) y configurado para transferir calor entre las corrientes;
 - una segunda turbina (165) corriente abajo del compresor; y
 - un segundo intercambiador (155) de calor colocado para recibir una corriente del compresor (135) y recibir una corriente independiente de una fuente (160) de calor.
12. El sistema de producción de energía de la reivindicación 11, en donde la fuente (160) de calor para la corriente independiente recibida por el segundo intercambiador (155) de calor es una o más de una fuente de calor de combustión, una fuente de calor solar, una fuente de calor nuclear, una fuente de calor geotérmica y una fuente de calor residual industrial.

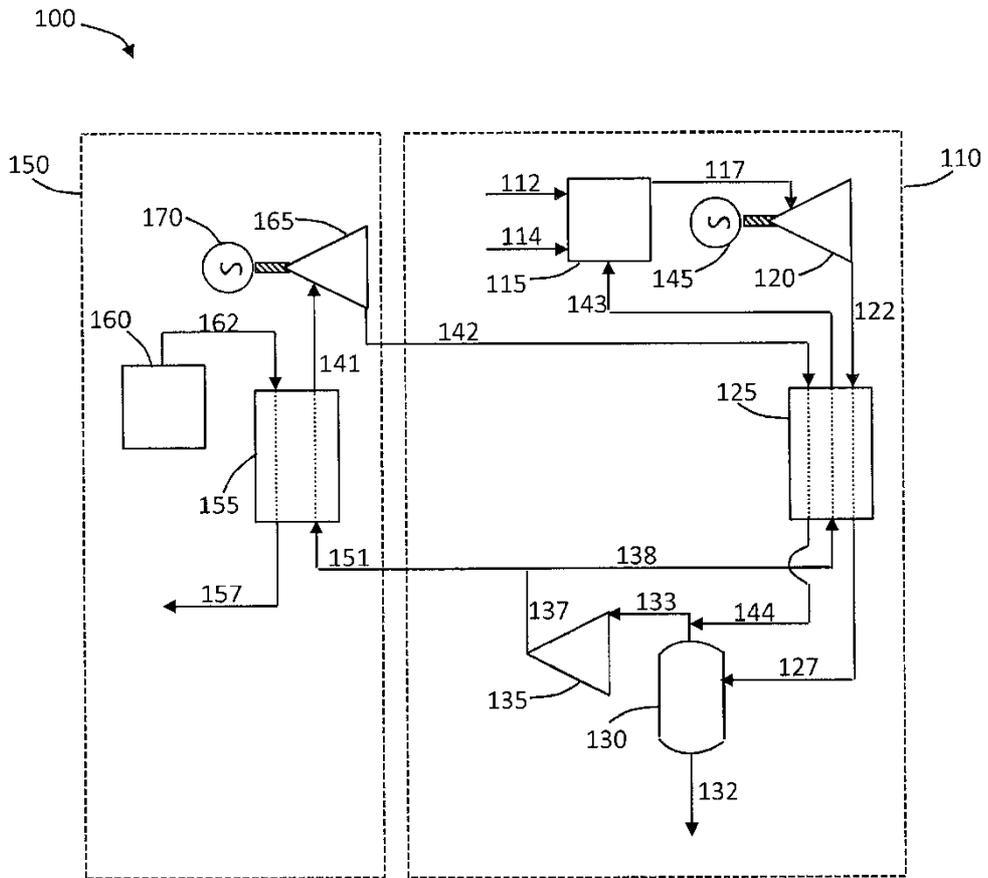


FIG. 1

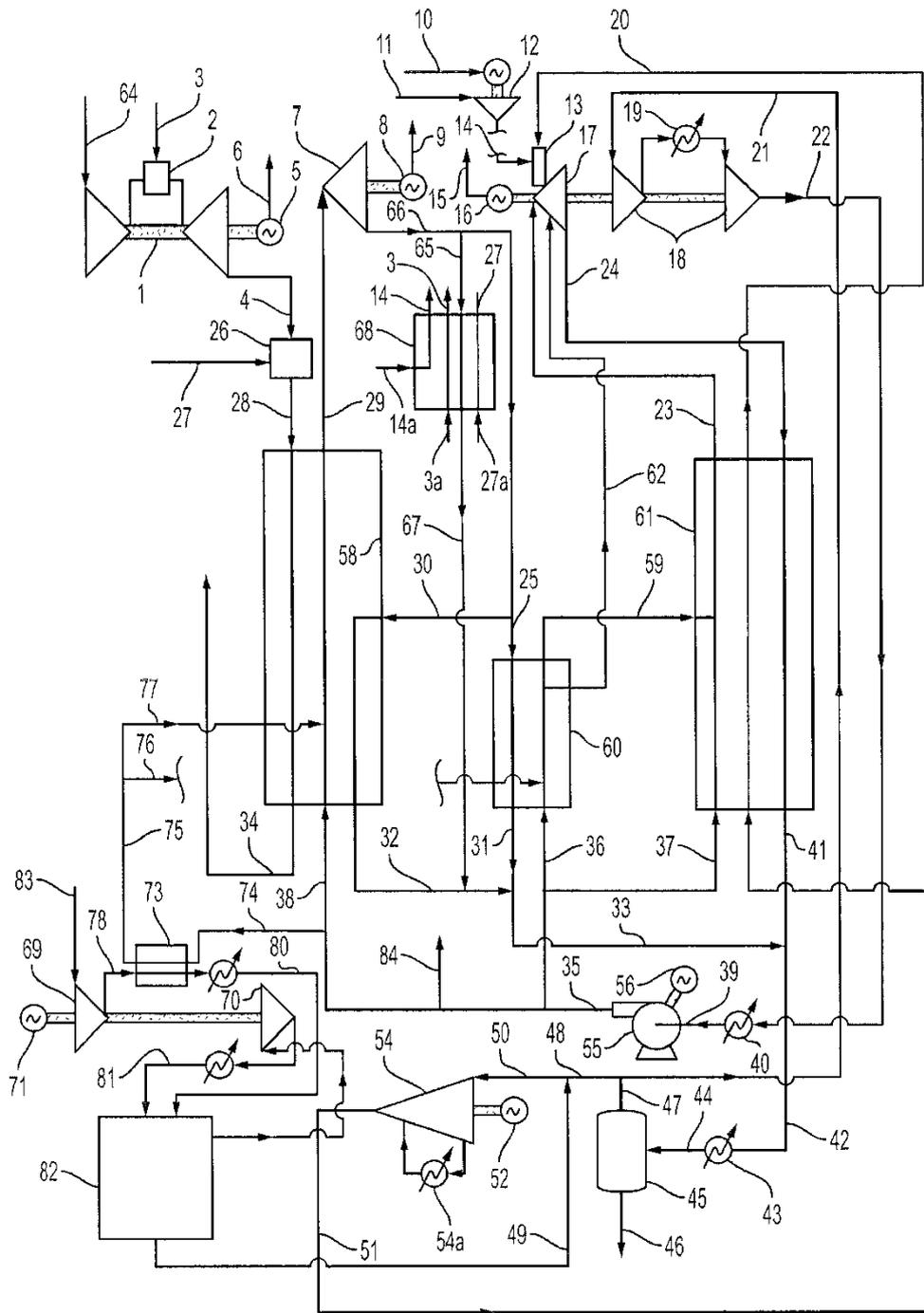


FIG. 2