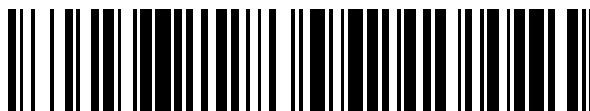


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 772 843**

51 Int. Cl.:

F02C 3/34

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.07.2015 PCT/US2015/039373**

87 Fecha y número de publicación internacional: **14.01.2016 WO16007509**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.07.2015 E 15739729 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.11.2019 EP 3167175**

54 Título: **Método y sistema para la producción de energía con eficiencia mejorada**

30 Prioridad:

08.07.2014 US 201462021839 P

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

08.07.2020

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;
FORREST, BROCK ALAN y
FETVEDT, JEREMY ERON**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 772 843 T3

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

DESCRIPCIÓN

Método y sistema para la producción de energía con eficiencia mejorada

5 CAMPO DE LA DESCRIPCIÓN

El tema actualmente descrito se refiere a sistemas y métodos para la generación de energía, tal como la electricidad, que operan con eficiencias deseables que se logran a través del calentamiento aditivo de al menos parte de un flujo de CO₂ de reciclaje en un intercambiador de calor usando una fuente de calor adicional. Particularmente, el calor de la fuente adicional se puede derivar, al menos en parte, de la compresión de al menos una parte del flujo de CO₂ de reciclaje.

ANTECEDENTES

Los medios convencionales de producción de energía a partir de la combustión de un combustible típicamente carecen de la capacidad de lograr simultáneamente la generación de energía de alta eficiencia y la captura de carbono (por ejemplo, por secuestro u otro uso). Una publicación en el campo de la generación de energía de alta eficiencia con captura de carbono, Patente de EE.UU. N° 8596075 de Allam et al., proporciona eficiencias deseables en sistemas de combustión de ciclo cerrado que usan CO₂ como el fluido de trabajo. Tales sistemas en particular se benefician de la reconocida utilidad de calentar un flujo de CO₂ de reciclaje en un intercambiador de calor recuperativo usando calor del escape de turbina caliente, así como añadiendo calor adicional de una fuente distinta del escape de turbina. A pesar de tales avances, todavía hay una creciente necesidad en la técnica de sistemas y métodos mejorados para la generación de energía que proporcionen un aumento de eficiencia con la captura de CO₂ y otras impurezas derivadas del combustible y de la combustión.

COMPENDIO DE LA DESCRIPCIÓN

La presente descripción proporciona sistemas y métodos de producción de energía con eficiencia mejorada. Los sistemas y métodos pueden utilizar CO₂ como fluido de trabajo y se pueden configurar para capturar CO₂ y otras impurezas derivadas del combustible y de la combustión. Las presentes mejoras se han identificado en relación con la introducción de calentamiento a nivel de temperatura bajo para un flujo de CO₂ de reciclaje en un sistema y método de combustión de oxígeno-combustible a presión elevada que también utiliza calentamiento recuperativo del flujo de CO₂ de reciclaje con calor del escape de turbina caliente. El calentamiento a nivel de temperatura bajo se puede describir en la presente memoria en términos de ser "calentamiento aditivo". Como tal, se entiende que el calentamiento aditivo es calor a nivel de temperatura bajo de una fuente distinta del escape de turbina caliente. En otras palabras, el calentamiento aditivo no es el calor que se recupera del escape de turbina caliente. La presente descripción en particular identifica medios para la obtención y la transferencia del calentamiento aditivo en un sistema y método de combustión de oxígeno-combustible de ciclo cerrado o de ciclo parcialmente cerrado que proporciona una salida de producción de energía que excede la capacidad de calentamiento del calor del combustible solo y por lo tanto proporciona un aumento ventajoso en la eficiencia.

En algunas realizaciones, la presente descripción se refiere a sistemas y métodos para la generación de energía, tal como electricidad, que operan a eficiencias deseables que se logran a través de la combustión de un combustible (por ejemplo, un carbonoso o combustible carbonoso) en oxígeno a una presión elevada en presencia de un flujo de CO₂ de reciclaje seguida de la expansión del gas producto a través de una turbina que produce energía y el enfriamiento del escape de turbina en un intercambiador de calor recuperativo, que calienta el flujo de CO₂ de reciclaje comprimido previamente. Se puede obtener una eficiencia mejorada de la generación de energía mediante el calentamiento aditivo de al menos parte del flujo de CO₂ de reciclaje en un intercambiador de calor usando calentamiento aditivo, que puede ser, por ejemplo, calor derivado, al menos en parte, de la compresión de al menos una parte del flujo de CO₂ de reciclaje.

En varias realizaciones, la producción de energía se puede lograr utilizando un sistema de ciclo cerrado o de ciclo parcialmente cerrado en el que el CO₂ se utiliza como el fluido de trabajo. En tales sistemas, un combustible fósil (por ejemplo, gas natural) o un combustible derivado de un combustible fósil (por ejemplo, gas sintético derivado del carbón u otro combustible carbonoso sólido) se quema por completo en una cámara de combustión usando oxígeno sustancialmente puro como el oxidante para dar un flujo oxidado de predominantemente CO₂, H₂O, exceso de O₂ y una cantidad de impurezas derivadas de componentes oxidados en el combustible u oxidante, tales como SO₂, NO_x, Hg y HCl. Los combustibles fósiles sólidos, tales como carbón, lignito o coque de petróleo, que contienen ceniza no combustible se pueden convertir en un combustible gaseoso por oxidación parcial en un sistema de una única etapa o de múltiples etapas. Tal sistema, por ejemplo, puede comprender un reactor de oxidación parcial. Alternativamente, por ejemplo, tal sistema puede comprender un reactor de oxidación parcial y un sistema de eliminación de cenizas y componentes inorgánicos volátiles. Tales sistemas comprenden además la combustión del gas combustible con oxígeno en la cámara de combustión del sistema de producción de energía. Un flujo de CO₂ de reciclaje precalentado se mezcla en la cámara de combustión con los productos de combustión derivados de la combustión del gas combustible. Se puede usar cualquier cámara de combustión adaptada para operación bajo las condiciones descritas de otro modo en la presente memoria, y el flujo de CO₂ de reciclaje se puede introducir en la cámara de combustión por cualquier medio para ser calentado aún más por la combustión y, si se desea, para sofocar y por ello controlar la temperatura del flujo de salida. En algunas realizaciones, uno o ambos de un reactor POX y la cámara de combustión pueden utilizar, con propósitos de ejemplo solamente, una pared enfriada por

transpiración que rodea el espacio de reacción o combustión, y el flujo de CO₂ de reciclaje precalentado puede pasar a través de la pared tanto para enfriar la pared como para sofocar y por ello controlar la temperatura del flujo de salida. El flujo de transpiración promueve una buena mezcla entre el CO₂ de reciclaje y los flujos de gas combustible quemado en caliente. Sin embargo, también se pueden usar otros tipos de cámaras de combustión, y la presente descripción no se limita al uso de cámaras de combustión enfriadas por transpiración. Aunque ciertos tipos de combustible se ejemplifican anteriormente, se entiende que otros combustibles (por ejemplo, hidrógeno) se pueden utilizar en la cámara de combustión. Del mismo modo, las ventajas que fluyen del uso de calor aditivo se pueden aplicar a sistemas que utilizan el calentamiento sin combustión en parte o totalmente. Por ejemplo, el uso de sistemas solares tales como se describe en la Publicación de Patente de EE.UU. N° 2013/0118145 también se abarca por la presente descripción.

Los productos de combustión combinados y el CO₂ de reciclaje precalentado que abandonan la cámara de combustión están a la temperatura requerida para la entrada a una turbina de producción de energía. El ciclo de energía de CO₂ puede usar una relación de presión a través de la turbina de 5 a 12 en algunas realizaciones, aunque se pueden usar mayores relaciones de presión (por ejemplo, al menos de 20) en otras realizaciones, tales como cuando se utiliza una pluralidad de turbinas de expansión. Se puede usar en algunas realizaciones una presión de entrada de turbina de alrededor de 100 bares (10 Mapa) a alrededor de 500 bares (50 Mapa). El oxígeno suministrado a la cámara de combustión puede ser o bien O₂ sustancialmente puro o bien O₂ diluido con CO₂. En algunas realizaciones, la mezcla del O₂ y del CO₂ puede ser útil para controlar la temperatura de llama adiabática de la reacción de combustión. Como ejemplo no limitativo, la concentración molar de O₂ en el flujo O₂/CO₂ combinado puede ser de alrededor del 10% a alrededor del 50%, de alrededor del 15% a alrededor del 40%, o de alrededor del 20% a alrededor del 30%. El escape de turbina caliente se puede enfriar en un intercambiador de calor economizador, que a su vez precalienta el flujo de reciclaje de CO₂ de presión alta.

La operación eficiente del sistema es dependiente de manera crítica de la optimización del intercambio de calor. Para lograr una alta eficiencia, una gran cantidad de calor aditivo se puede añadir al flujo de reciclaje de presión alta en el extremo frío del intercambiador de calor, tal como a un nivel de temperatura desde alrededor de 100° C hasta alrededor de 400° C. Este calor a nivel de temperatura bajo se puede derivar en algunas realizaciones de los compresores de aire de una planta de oxígeno criogénico, cuyos compresores se pueden operar total o en parte con sus intervalos de presión en un modo adiabático de relación de presión alta de modo que el aire comprimido se eleve de temperatura en la etapa de descarga a un punto en el intervalo de alrededor de 100° C a alrededor de 400° C y de modo que la transferencia de calor desde el flujo de aire comprimido al flujo de proceso de CO₂ de reciclaje a presión se pueda lograr fácilmente. Por ejemplo, un flujo lateral tomado del flujo de reciclaje de CO₂ de presión alta en el intercambiador de calor economizador se puede calentar contra el aire comprimido de enfriamiento a una temperatura requerida de alrededor de 100° C a alrededor de 400° C. Los sistemas y métodos para tal combustión de oxígeno-combustible, producción de calor a nivel bajo y transferencia de calor a nivel bajo se describen en la Patente de EE.UU. N° 8596075, la Patente de EE.UU. N° 8776532, la Patente de EE.UU. N° 8986002, la Patente de EE.UU. 9068743, la Publicación de Patente de EE.UU. N° 2010/0300063, la Publicación de Patente de EE.UU. N° 2012/0067054, la Publicación de Patente de EE.UU. N° 2012/0237881, y la Publicación de Patente de EE.UU. N° 2013/0104525.

La presente descripción proporciona medios adicionales para introducir calor en un flujo de presión alta de CO₂ de reciclaje a una temperatura de alrededor de 100° C a alrededor de 400° C y por lo tanto aumentar la efectividad de un intercambiador de calor economizador y aumentar la eficiencia general del sistema y método de producción de energía que incorpora el presente medio de transferencia de calor. En particular, la presente descripción proporciona el uso de una parte del calor de compresión de un compresor de CO₂ de reciclaje como el calentamiento aditivo necesario para aumentar la eficiencia global de un sistema y método de producción de energía.

Se han hecho propuestas previas para optimizar el rendimiento de un ciclo de producción de energía usando CO₂ de presión alta como el fluido de trabajo. Por ejemplo, Bryant et al. ("An Analysis and Comparison of the Simple and Recompression Supercritical CO₂ Cycles", presentación de mayo de 2011 en el taller de ciclo de energía de CO₂ supercrítico en Boulder (Colorado), describe los ciclos de Brayton para la generación de energía usando un intercambiador de calor recuperador con CO₂ como fluido de trabajo. El documento define las eficiencias de dos ciclos en términos de parámetros de operación y muestra las condiciones bajo las cuales el segundo ciclo da una mayor eficiencia que el primer ciclo simple.

El primer ciclo simple de Bryant et al. se muestra en la FIGURA 1. En el mismo, el CO₂ caliente en la línea 7 que ha sido comprimido en un compresor 1 cerca de adiabático sin enfriamiento intermedio se calienta además en un intercambiador de calor 4 recuperador. El CO₂ caliente entonces pasa a través de la línea 8 al calentador 3 donde se calienta o bien directamente por combustión de un combustible 14 con oxígeno 13, o bien por algún medio de calentamiento externo. El CO₂ calentado además pasa entonces a través de la línea 9 a una turbina 2 de producción de energía donde se expande a una presión inferior produciendo el funcionamiento del eje (ilustrado por la flecha 15). El flujo 10 de escape de turbina pasa al intercambiador de calor 4 recuperador donde se refrigera liberando calor hacia el flujo de reciclaje de presión alta. El escape de turbina se enfría entonces en un enfriador previo 5 donde el calor se descarta de un flujo 11 de enfriamiento que sale a través de la línea 12 antes de volver a entrar finalmente en el compresor 1 en la línea 6.

El segundo ciclo de Bryant se muestra en la FIGURA 2, que es idéntico al ciclo mostrado en la FIGURA 1 aparte de la adición de una segunda etapa 16 de compresión en la que parte del flujo 17 de escape de turbina de presión baja que abandona el circuito de retorno de presión baja a la salida del intercambiador de calor 4a recuperador antes del enfriador previo 5 se comprime en su condición caliente en el compresor 16 que sale a través de la línea 18. Este flujo entra en el intercambiador de calor 4b recuperador después de su mezcla con el flujo principal de reciclaje de presión alta que sale 4a a su temperatura correspondiente y se calienta en la sección del intercambiador de calor 4b contra el flujo 10 de escape de turbina caliente. El efecto de la compresión adicional es inyectar una gran cantidad de calor en el intercambiador de calor recuperador desde el segundo compresor que toma como su flujo de entrada un flujo de CO₂ a una temperatura elevada que es mayor que la temperatura de entrada del compresor de CO₂ principal.

La enseñanza de Bryant et al. revela una desventaja en que la entrada de calor desvía la primera etapa del intercambiador de calor 4a recuperador. El calor específico mucho mayor del flujo de CO₂ de presión alta que está siendo calentado en el intercambiador de calor 4a comparado con el enfriamiento del flujo de escape de turbina de presión baja en el intercambiador de calor 4a significa que la transferencia de calor en el intercambiador de calor 4a en el flujo de presión alta se debe maximizar para lograr un planteamiento de temperatura cercana. Esto no se logra dado que el flujo de CO₂ comprimido calentado desvía el intercambiador de calor 4a. Lo que se requiere para la máxima eficiencia es disponer un sistema de compresión de gas caliente en el que el CO₂ comprimido se enfríe en el intercambiador de calor y aumente la transferencia de calor disponible al flujo de CO₂ de presión alta. La presente descripción se refiere en parte a medios para superar esta desventaja.

Aunque los ciclos de Bryant et al. ilustrados en la FIGURA 1 y en la FIGURA 2 representan la técnica anterior conocida para la compresión de CO₂ caliente, solamente son adecuados para su uso en disposiciones de ciclo de Brayton simples que usan un compresor de CO₂ principal sin refrigeradores intermedios que dan una temperatura de descarga alta. Esto a su vez hace que el flujo de descarga de turbina de enfriamiento que abandona el intercambiador de calor 4a recuperador también esté a una temperatura alta, de modo que el calor rechazado en el intercambiador de calor del enfriador previo también sea alto. Por lo tanto, es evidente que las eficiencias óptimas solamente se lograrán a relaciones de presión baja en este ciclo de compresión caliente, las cuales se muestra que están en el intervalo de 2 a 4 con presiones óptimas de entrada del compresor principal cercanas a la presión crítica de CO₂. Relaciones de presión más altas conducen a pérdidas de calor excesivas en el sistema. Los ciclos de Bryant et al. mostrados en la FIGURA 1 y la FIGURA 2 también dejan de tener en cuenta los detalles del sistema, tales como la presencia de separación de agua líquida en las líneas 6 de entrada del compresor que siguen al enfriamiento en el intercambiador de calor 5 contra los medios de enfriamiento ambiental.

El ciclo de Bryant et al. en la FIGURA 2 tiene varias limitaciones adicionales. Por ejemplo, la eficiencia del ciclo de Bryant et al. disminuye significativamente a medida que la relación de presión aumenta, dado que los compresores principal y de recompresión son esencialmente adiabáticos en operación sin refrigeradores intermedios entre etapas. Los estudios reportados por Bryant et al. muestran que la relación de presión óptima para una temperatura de entrada de turbina de 750° C es 2,2 a una presión de entrada de turbina de 100 bares y 3,3 a una presión de entrada de turbina de 250 bares. Las relaciones de presión bajas requieren tasas de flujo de CO₂ muy altas en el sistema para una salida de energía dada que conduce a altos costes de capital. Por el contrario, la presente descripción proporciona ciclos con relaciones de presión altas y presiones de entrada de turbina altas que dan como resultado una alta eficiencia y un bajo coste de capital.

Los sistemas y métodos útiles según la presente descripción pueden utilizar relaciones de presión de alrededor de 5 o mayores, tales como de alrededor de 5 a alrededor de 30. En algunas realizaciones, las relaciones de presión pueden estar preferiblemente en el intervalo de alrededor de 5 a alrededor de 12. Los sistemas y los métodos también pueden utilizar sistemas de compresión de reciclaje de CO₂ principales de enfriamiento intermedio. La relación de presión alta favorece una presión de entrada de turbina por encima de la presión crítica de CO₂ de 7,38 Mapa y una presión de descarga de turbina por debajo de esta presión. Estas relaciones de presión más altas proporcionan eficiencias altas del 50% al 60% para sistemas alimentados con gas natural con relaciones de circulación significativamente más bajas de CO₂ por kW de salida de energía neta. Los sistemas y métodos útiles según la presente descripción también utilizan preferiblemente una entrada muy considerable de calor aditivo a un nivel de temperatura, por ejemplo, mayor que 100° C, y particularmente en el intervalo de alrededor de 100° C a alrededor de 400° C o alrededor de 100° C a alrededor de 300° C. Los sistemas y métodos descritos actualmente son particularmente beneficiosos al proporcionar la utilización de una parte del calor de compresión desde el compresor de CO₂ de reciclaje principal como este calentamiento aditivo.

En algunas realizaciones, la presente descripción proporciona un método de generación de energía. Por ejemplo, en realizaciones que no todas forman parte de la presente invención, el método puede comprender varias combinaciones de los siguientes pasos: pasar un flujo de CO₂ de reciclaje caliente comprimido a una cámara de combustión; quemar un combustible con oxígeno en una cámara de combustión en presencia del flujo de CO₂ de reciclaje para producir un flujo que contiene CO₂; pasar el flujo que contiene CO₂ a través de una turbina para expandir el flujo que contiene CO₂, generar energía y formar un flujo de escape de turbina que comprende CO₂; retirar calor del flujo de escape de turbina que comprende CO₂; dividir el flujo de escape de turbina enfriado para

formar una primera parte de escape de turbina y una segunda parte de escape de turbina; separar agua de la primera parte de escape de turbina para formar un flujo de CO₂ de reciclaje principal; comprimir el flujo de CO₂ de reciclaje principal; comprimir la segunda parte de escape de turbina adiabáticamente sin enfriamiento intermedio entre las etapas del compresor para formar una segunda parte de escape de turbina comprimida, calentada; retirar calor de la segunda parte de escape de turbina comprimida, calentada; separar agua de la segunda parte de escape de turbina comprimida, enfriada para formar un flujo de CO₂ de reciclaje secundario; combinar el flujo de CO₂ de reciclaje principal y el flujo de CO₂ de reciclaje secundario para formar un flujo de CO₂ de reciclaje total; enfriar el flujo de CO₂ de reciclaje total para formar un flujo de CO₂ de alta densidad; comprimir el flujo de CO₂ de reciclaje total en una segunda etapa de compresión usando una bomba de fluido; calentar flujo de CO₂ de reciclaje total con calor retirado del flujo de escape de turbina; y calentar además el flujo de CO₂ de reciclaje total con calor retirado de la segunda parte de escape de turbina comprimida, calentada, para formar el flujo de CO₂ de reciclaje comprimido, calentado. En algunas realizaciones, los dos flujos de CO₂ comprimidos que siguen a la retirada de calor del flujo de CO₂ de reciclaje secundario se pueden combinar, entonces el flujo combinado se puede enfriar seguido por la separación de agua líquida. En algunas realizaciones, el segundo flujo de escape de turbina se puede comprimir en múltiples etapas con transferencia de calor entre una o más de las etapas. Por ejemplo, el segundo flujo de escape de turbina se puede someter a compresión de múltiples etapas incluyendo etapas de compresión no enfriadas (x) y etapas de compresión con enfriamiento intermedio (y), en donde x e y independientes pueden ser un número entero de 1 o más, de 2 o más, o de 3 o más (por ejemplo, de 1 a 5 o de 2 a 4). En algunas realizaciones, el segundo flujo de escape de turbina se puede presurizar (y calentar) en x etapa o etapas de compresión no enfriadas a un valor intermedio, el gas presurizado se puede utilizar para proporcionar el calor de compresión a un intercambiador de calor recuperativo para ser enfriado, el gas enfriado se puede deshidratar, y el gas se puede pasar de nuevo para someterse a la etapa o etapas de compresión con enfriamiento intermedio y restantes antes de unirse al primer flujo de escape de turbina.

En realizaciones adicionales, la presente descripción proporciona un sistema de generación de energía. Por ejemplo, en realizaciones que no todas forman parte de la presente invención, el sistema puede comprender: una cámara de combustión; una turbina de producción de energía; uno o más intercambiadores de calor; un primer camino de flujo de enfriamiento a través de uno o más intercambiadores de calor; un camino de flujo de calentamiento a través de uno o más intercambiadores de calor; un separador de flujo en comunicación con el primer camino de flujo de enfriamiento a través de uno o más intercambiadores de calor; un primer compresor en comunicación con el separador de flujo; un segundo camino de flujo de enfriamiento a través de uno o más intercambiadores de calor, el segundo camino de flujo de enfriamiento en comunicación con el compresor; uno o más separadores de agua; un segundo compresor; y una bomba. En particular, el camino de flujo de calentamiento a través de uno o más intercambiadores de calor está aguas abajo de la bomba y aguas arriba de la cámara de combustión; y el camino de flujo de calentamiento a través del uno o más intercambiadores de calor está en una disposición de calentamiento con el primer camino de flujo de enfriamiento y el segundo camino de flujo de enfriamiento a través del uno o más intercambiadores de calor. En algunas realizaciones, el primer camino de flujo de enfriamiento y el segundo camino de flujo de enfriamiento se pueden definir por componentes de separación de agua y/o componentes de bomba separados e independientes. Cuando se usan dos o más intercambiadores de calor, los intercambiadores de calor pueden estar en serie.

En algunas realizaciones según la reivindicación 1, la presente descripción se refiere a un método para calentar un flujo de gas de recirculación. Tal método comprende los siguientes pasos: pasar un flujo G de gas a una presión P₁ y a una temperatura T₁ a través de un intercambiador de calor recuperativo de manera que el flujo de gas se enfríe a una temperatura T₂ que es menor que T₁; separar el flujo G de gas en una primera fracción G₁ y una segunda fracción G₂; comprimir la fracción G₁ del flujo de gas a una presión P₂ que es mayor que P₁; comprimir la fracción G₂ del flujo de gas a una presión P₃ que es mayor que P₁ para calentar la fracción G₂ del flujo de gas a una temperatura T₃ que es mayor que T₂; retirar el calor de la fracción G₁ del flujo de gas comprimido; combinar la fracción G₁ del flujo de gas y la fracción G₂ del flujo de gas para formar un flujo G_C de gas de recirculación combinado; bombear el flujo G_C de gas de recirculación a una presión P₄ que es mayor que P₂ y mayor que P₃; y pasar el flujo G_C de gas de recirculación al intercambiador de calor recuperativo de manera que el flujo G_C de gas se caliente por el flujo G de gas de enfriamiento; en donde el calor retirado de la fracción del flujo G₂ de gas comprimido se agrega al flujo G_C de gas de recirculación después de bombear a la presión P₄. En realizaciones adicionales, el método para calentar un flujo de gas de recirculación puede comprender una cualquiera o más de las siguientes afirmaciones en cualquier combinación de las mismas.

La temperatura T₃ puede ser de alrededor de 100° C a alrededor de 400° C.

La presión P₂ de la fracción G₁ del flujo de gas y la presión P₃ de la fracción G₂ del flujo de gas pueden ser cada una por separado de alrededor de 40 bares (4 Mapa) a alrededor de 100 bares (10 Mapa).

La presión P₄ del flujo G_C de gas de recirculación puede ser de alrededor de 100 bares (10 Mapa) a alrededor de 500 bares (50 Mapa).

La relación de masa entre la fracción G_1 de gas y la fracción G_2 de gas en la masa total del flujo G de gas puede ser de alrededor de 50:50 a alrededor de 99:1, o puede ser de alrededor de 50:50 a alrededor de 90:10, o puede ser de alrededor de 50:50 a alrededor de 70:30 o puede ser de alrededor de 70:30 a alrededor de 90:10.

- 5 El flujo G_C de gas de recirculación después de pasar a través del intercambiador de calor recuperativo y de recibir el calor de la fracción G_2 de gas comprimido puede tener una temperatura T_4 que está dentro de los 50° C de T_1 .

La fracción G_2 del flujo de gas se puede comprimir con compresión de múltiples etapas sin enfriamiento intermedio.

- 10 Después de retirar calor de la fracción G_2 del flujo de gas, la fracción G_2 del flujo de gas se puede comprimir aún más antes de combinarse con la fracción G_1 del flujo de gas.

- 15 El intercambiador de calor recuperativo puede comprender tres intercambiadores de calor o tres secciones de intercambio de calor en serie. En tales realizaciones, el calor se puede transferir en un primer intercambiador de calor o sección de intercambio de calor que opera en el intervalo R_1 de temperatura, un segundo intercambiador de calor o sección de intercambio de calor que opera en el intervalo R_2 de temperatura, y un tercer intercambiador de calor o sección de intercambio de calor que opera en el intervalo R_3 de temperatura con la relación de temperatura de $R_1 > R_2 > R_3$.

- 20 El flujo G de gas se puede separar entre el primer intercambiador de calor o sección de intercambio de calor y el segundo intercambiador de calor o sección de intercambio de calor.

El flujo G de gas se puede separar entre el segundo intercambiador de calor o sección de intercambio de calor y el tercer intercambiador de calor o sección de intercambio de calor.

- 25 El calor retirado de la fracción G_2 del flujo de gas comprimido se puede añadir al flujo G_C de gas de recirculación en uno o en ambos del tercer intercambiador de calor o sección de intercambio de calor y del segundo intercambiador de calor o sección de intercambio de calor.

- 30 El método además puede comprender añadir calor al flujo G_C de gas de recirculación después de bombear a la presión P_4 . En tales realizaciones, el calor añadido se puede derivar de una o ambas de una unidad de separación de aire y una turbina de gas.

- 35 El método además puede comprender pasar el flujo G_C de gas de recirculación calentado desde el intercambiador de calor recuperativo a una cámara de combustión que quema un combustible con oxígeno para formar un flujo de producto de combustión.

El flujo G de gas puede ser un flujo de escape de turbina.

- 40 En algunas realizaciones según la reivindicación 6, la presente descripción se refiere además a un método de generación de energía. El método comprende los siguientes pasos: quemar un combustible con oxígeno en la cámara de combustión en presencia de un flujo de CO_2 de reciclaje para producir un flujo de combustión que contiene CO_2 ; pasar el flujo de combustión que contiene CO_2 a través de una turbina para expandir el flujo de combustión que contiene CO_2 , generar energía y formar un flujo de escape de turbina; retirar calor del flujo de escape de turbina; dividir el flujo de escape de turbina para formar una primera parte de escape de turbina y una segunda parte de escape de turbina; separar agua de la primera parte de escape de turbina para formar un flujo de CO_2 de reciclaje principal; comprimir el flujo de CO_2 de reciclaje principal; comprimir la segunda parte de escape de turbina para formar una segunda parte de escape de turbina comprimida, calentada; retirar calor de la segunda parte de escape de turbina comprimida, calentada; separar agua de la segunda parte de escape de turbina comprimida, enfriada para formar un flujo de CO_2 de reciclaje secundario; combinar el flujo de CO_2 de reciclaje principal y el flujo de CO_2 de reciclaje secundario para formar un flujo de CO_2 de reciclaje combinado; comprimir el flujo de CO_2 de reciclaje combinado; calentar el flujo de CO_2 de reciclaje combinado con calor retirado del flujo de escape de turbina; y calentar además el flujo de CO_2 de reciclaje combinado con calor retirado de la segunda parte de escape de turbina comprimida, calentada. En realizaciones adicionales, el método puede comprender una o más de las siguientes afirmaciones en cualquier combinación.

- 55 El flujo de combustión que contiene CO_2 puede tener una temperatura de alrededor de 500° C a alrededor de 1700° C y una presión de alrededor de 100 bares (10 Mapa) a alrededor de 500 bares (50 Mapa).

La relación de presión a través de turbina puede ser de alrededor de 5 a alrededor de 12.

- 60 El calor se puede retirar del flujo de escape de turbina en un intercambiador de calor recuperativo que comprende tres o más secciones o que comprende tres o más intercambiadores de calor individuales.

- 65 El calentamiento del flujo de CO_2 de reciclaje combinado con calor retirado del flujo de escape de turbina y el calentamiento adicional del flujo de CO_2 de reciclaje combinado con calor retirado de la segunda parte de escape de turbina comprimida, calentada se pueden llevar a cabo en el intercambiador de calor recuperativo.

La relación de masa de la primera parte de escape de turbina a la segunda parte de escape de turbina en base a la masa total del flujo de escape de turbina puede ser de alrededor de 50:50 a alrededor de 99:1.

- 5 El calor retirado de la segunda parte de escape de turbina comprimida, calentada puede estar en un intervalo de temperatura de alrededor de 100° C a alrededor de 400° C.

El flujo de CO₂ de reciclaje principal y la segunda parte de escape de turbina se pueden comprimir independientemente a una presión de alrededor de 40 bares (4 Mapa) a alrededor de 100 bares (10 Mapa).

- 10 El flujo de CO₂ de reciclaje combinado después del calentamiento con calor retirado del flujo de escape de turbina y el calentamiento adicional con calor retirado de la segunda parte de escape de turbina comprimida, calentada puede tener una temperatura que esté dentro de los 50° C de la temperatura del flujo de escape de turbina.

- 15 La segunda parte de escape de turbina se puede comprimir adiabáticamente sin enfriamiento intermedio entre las etapas del compresor.

- En algunas realizaciones según la reivindicación 9, un sistema generador de energía comprende lo siguiente: una cámara de combustión configurada para gastar un flujo de combustión; una turbina de producción de energía configurada para recibir y expandir el flujo de combustión y formar un flujo de escape de turbina; un intercambiador de calor recuperativo configurado para recibir el flujo de escape de turbina; un separador de flujos configurado para separar el flujo de escape de turbina enfriado en un primer flujo de gas y un segundo flujo de gas; un primer compresor configurado para recibir y comprimir el primer flujo de gas; un segundo compresor configurado para recibir y comprimir el segundo flujo de gas; una bomba configurada para presurizar el primer flujo de gas y el segundo flujo de gas en combinación, la bomba colocada aguas abajo del primer compresor y del segundo compresor; un primer camino de flujo a través del intercambiador de calor recuperativo configurado para el paso del flujo de escape de turbina; un segundo camino de flujo a través del intercambiador de calor recuperativo configurado para el paso del primer flujo de gas y el segundo flujo de gas presurizados en combinación; un tercer camino de flujo a través del intercambiador de calor recuperativo configurado para el paso del segundo flujo de gas comprimido; en donde el primer camino de flujo y el tercer camino de flujo están configurados para calentar el segundo camino de flujo. En realizaciones adicionales, el sistema puede incluir una cualquiera o más de las siguientes afirmaciones en cualquier combinación.

- 35 El intercambiador de calor recuperativo puede comprender una serie de tres o más intercambiadores de calor o una serie de tres o más secciones de calentamiento.

El sistema además puede comprender uno o más separadores configurados para separar al menos agua de uno o ambos del primer flujo de gas y del segundo flujo de gas.

- 40 El primer compresor puede comprender un compresor de múltiples etapas con enfriamiento intermedio.

El segundo compresor puede comprender un compresor adiabático de múltiples etapas sin enfriamiento intermedio entre etapas del compresor.

- 45 **BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS**

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

- 50 La FIGURA 1 es un diagrama de flujo de un ciclo de producción de energía de la técnica anterior;
La FIGURA 2 es un diagrama de flujo de un ciclo de producción de energía adicional de la técnica anterior; y
La FIGURA 3 es un diagrama de flujo de un sistema y método de producción de energía según una realización ejemplar de la presente descripción que incluye una pluralidad de compresores para comprimir un flujo de CO₂ de reciclaje y derivar calor del mismo para su entrada a un intercambiador de calor recuperador.

- 55 **DESCRIPCIÓN DETALLADA**

El presente tema se describirá ahora más plenamente en lo sucesivo con referencia a realizaciones ejemplares del mismo. Estas realizaciones ejemplares se describen de modo que esta descripción será minuciosa y completa, y transportará plenamente el alcance del tema a los expertos en la técnica. De hecho, el tema se puede incorporar de muchas formas diferentes y no se debería interpretar como limitado a las realizaciones expuestas en la presente memoria; más bien, estas realizaciones se proporcionan de modo que esta descripción satisfaga los requisitos legales aplicables. Como se usa en la especificación, y en las reivindicaciones adjuntas, las formas singulares “un”, “uno”, “una”, “el”, “la”, incluyen referentes plurales a menos que el contexto lo dicte claramente de otro modo.

- 65 La presente descripción se refiere a sistemas y métodos que proporcionan generación de energía usando predominantemente CO₂ como fluido de trabajo. En particular, el proceso usa una turbina de relación de presión alta/presión baja que expande una mezcla de un flujo de CO₂ de reciclaje de presión alta y productos de combustión

que surgen de la combustión del combustible. Se puede usar cualquier combustible fósil, particularmente los combustibles carbonosos. Ejemplos no limitativos incluyen gas natural, gases comprimidos, gases combustibles (por ejemplo, que comprenden uno o más de H_2 , CO , CH_4 , H_2S y NH_3) y gases combustibles similares. Los combustibles sólidos, por ejemplo, carbón, lignito, coque de petróleo, betún, biomasa y similares, o combustibles líquidos viscosos se pueden usar también con la incorporación de elementos del sistema necesarios. Por ejemplo, se puede usar una cámara de combustión de oxidación parcial para convertir el combustible sólido o líquido viscoso en un gas combustible que esté sustancialmente libre de partículas sólidas. Todas las impurezas derivadas del combustible y de la combustión en un estado oxidado, tales como compuestos de azufre, NO , NO_2 , CO_2 , H_2O , Hg , y similares se pueden separar del ciclo de energía para su eliminación sustancial o completamente sin emisiones a la atmósfera. Como se ha señalado anteriormente, también se pueden utilizar otros combustibles del mismo modo. El oxígeno puro se puede usar como oxidante en el proceso de combustión. En algunas realizaciones, la temperatura de combustión se puede regular diluyendo el oxígeno con CO_2 en proporciones como se señala de otro modo en la presente memoria.

El escape de turbina caliente se usa para precalentar parcialmente el flujo de CO_2 de reciclaje de presión alta. En combinación con este calentamiento, el flujo de CO_2 de reciclaje se calienta además usando calentamiento aditivo que se deriva de la energía de compresión de un compresor de CO_2 . Las condiciones de funcionamiento para el compresor de CO_2 pueden variar como se describe además en la presente memoria. Por ejemplo, en algunas realizaciones, puede ser útil utilizar una temperatura de entrada del compresor de CO_2 que sea más alta que el planteamiento normal para los medios de enfriamiento ambientales. La temperatura mínima de entrada del flujo que entra en el compresor de CO_2 , por ejemplo, puede ser aproximadamente del punto de condensación del agua en las condiciones operativas. En algunas realizaciones, el compresor de CO_2 puede tener una temperatura de entrada de alrededor de $50^\circ C$ a alrededor de $250^\circ C$. Opcionalmente, se pueden usar otros medios de calentamiento que proporcionan calor a un nivel de temperatura por debajo de alrededor de $400^\circ C$ además del calentamiento disponible a partir de la compresión de CO_2 . Tales medios pueden incluir el calor transferido desde los compresores de aire de una planta de separación de aire criogénico que opera parcial o completamente en el modo adiabático sin enfriamiento intermedio. Cuando se utiliza tal calor, los compresores de aire se pueden operar preferiblemente con relaciones de presión por encima de 2,5 en las etapas adiabáticas.

Se ha descubierto según la presente descripción que la eficiencia de la producción de energía se puede mejorar a través de la provisión de calentamiento aditivo como se define en la presente memoria, tal calentamiento aditivo que se proporciona particularmente a un nivel de temperatura por debajo de alrededor de $400^\circ C$ (por ejemplo, en el intervalo de alrededor de $100^\circ C$ a alrededor de $400^\circ C$). La provisión del calentamiento aditivo puede superar la gran diferencia en el calor específico de CO_2 en una entrada de turbina de presión alta típica de alrededor de 300 bares (30 Mapa) y el calor específico de CO_2 en una presión de escape de turbina de presión baja típica de alrededor de 30 bares (3 Mapa). Esta diferencia es evidente en la tabla proporcionada a continuación.

Temperatura K ($^\circ C$)	Calor específico de CO_2 (kJ/kg) a 30 bares (3 Mapa)	Calor específico de CO_2 (kJ/kg) a 300 bares (30 Mapa)
300 (26,85)	1,18	1,95
350 (76,85)	1,05	2,00
400 (126,85)	1,02	1,90
450 (176,85)	1,03	1,63
500 (226,85)	1,06	1,47
600 (326,85)	1,10	1,31
750 (476,85)	1,17	1,23
1000 (726,85)	1,24	1,28

Un método de producción de energía según la presente descripción comprende particularmente una serie de pasos que pueden proporcionar un aumento de eficiencia. El método comprende pasar un flujo de CO_2 de reciclaje comprimido, calentado a una cámara de combustión. El flujo de CO_2 de reciclaje comprimido, calentado se forma como se describe adicionalmente a continuación. En la cámara de combustión, un combustible se quema con el oxidante (por ejemplo, oxígeno de al menos un 98% o al menos un 99% de pureza, opcionalmente diluido con CO_2) en presencia del flujo de CO_2 de reciclaje para producir un flujo que contiene CO_2 . El flujo que contiene CO_2 de la cámara de combustión puede tener una temperatura de alrededor de $500^\circ C$ o más (por ejemplo, de alrededor de $500^\circ C$ a alrededor de $1700^\circ C$ o de alrededor de $800^\circ C$ a alrededor de $1600^\circ C$) y una presión de alrededor de 100 bares (10 Mapa) o más (por ejemplo, de alrededor de 100 bares (10 Mapa) a alrededor de 500 bares (50 Mapa)). El flujo que contiene CO_2 pasa a través de una turbina para expandir el flujo que contiene CO_2 , generar energía y formar un flujo de escape de turbina que comprende CO_2 . El flujo que contiene CO_2 se puede expandir a través de turbina a una relación de presión de menos de 12 o de menos de 10 (por ejemplo, de alrededor de 5 a alrededor de 12). En realizaciones alternativas, se pueden usar relaciones de presión altas como se señala en la presente memoria, tal como en el caso de utilizar una pluralidad de turbinas, como se describe en la Publicación de Patente de EE.UU. N° 2013/0213049.

El flujo de escape de turbina se puede procesar para eliminar productos de combustión y cualquier CO₂ neto producido por la combustión del combustible. Con este fin, el flujo de escape de turbina se enfría mediante el paso a través de un intercambiador de calor. Se puede utilizar cualquier intercambiador de calor adecuado para su uso bajo las condiciones de temperatura y presión descritas en la presente memoria. En algunas realizaciones, el intercambiador de calor puede comprender una serie de al menos dos, al menos tres, o incluso más intercambiadores de calor economizadores. Se puede usar un único intercambiador de calor con al menos dos secciones, con al menos tres secciones (o incluso con más secciones). Por ejemplo, el intercambiador de calor se puede describir como que tiene al menos tres secciones de intercambio de calor que operan a través de diferentes intervalos de temperatura. El calor retirado del flujo de escape de turbina se puede utilizar para calentar el flujo de CO₂ de reciclaje como se describe a continuación.

El flujo de escape de turbina se divide en dos o más partes. La primera parte puede comprender el 50% o más, el 70% o más, o el 90% o más (pero menos del 100%) del flujo de masa total del flujo de escape de turbina. La primera parte de escape de turbina se enfría preferiblemente a una temperatura que es menor que el punto de condensación del agua después de abandonar el intercambiador de calor. La primera parte de escape de turbina se puede pasar a través de un separador para eliminar el agua y se puede tratar además para eliminar otros productos de combustión o impurezas. El flujo resultante se puede describir como un flujo de CO₂ de reciclaje principal, y este flujo se puede comprimir tal como en un compresor de múltiples etapas con enfriamiento intermedio entre las etapas. Preferiblemente, el flujo de CO₂ de reciclaje principal se comprime a una presión de alrededor de 40 bares (4 Mapa) a alrededor de 100 bares (10 Mapa). En algunas realizaciones, el flujo de CO₂ de reciclaje principal se comprime a una presión de alrededor de 60 bares (6 Mapa) a alrededor de 100 bares (10 Mapa) o de alrededor de 67 bares (6,7 Mapa) a alrededor de 80 bares (8 Mapa).

La segunda parte del flujo de escape de turbina se comprime para formar una segunda parte de escape de turbina comprimida, calentada. La segunda parte de escape de turbina puede comprender el equilibrio del escape de turbina no presente en la primera parte (por ejemplo, el 50% o menos, el 30% o menos, o el 10% o menos (pero mayor que el 0%) del flujo de masa total del flujo de escape de turbina). Preferiblemente, la segunda parte de escape de turbina se puede retirar del escape de turbina entre la segunda y tercera secciones de intercambio de calor (por ejemplo, el segundo y tercer intercambiadores de calor en serie que se mueven de caliente a frío; en otras palabras, los intercambiadores de calor que trabajan entre la temperatura más baja y una temperatura intermedia). La segunda parte de escape de turbina se comprime preferiblemente para conseguir una temperatura en el intervalo de alrededor de 100° C a alrededor de 400° C y una presión de alrededor de 40 bares (4 Mapa) a alrededor de 100 bares (10 Mapa). En algunas realizaciones, la presión puede ser de alrededor de 60 bares (6 Mapa) a alrededor de 100 bares (10 Mapa) o de alrededor de 67 bares (6 Mapa) a alrededor de 80 bares (8 Mapa). La segunda parte de escape de turbina se reintroduce en el intercambiador de calor, preferiblemente pasando del extremo caliente del intercambiador de calor de temperatura intermedia al extremo frío del intercambiador de calor de temperatura baja. La segunda parte de escape de turbina enfriada puede estar a una temperatura que esté por debajo del punto de condensación del agua, y el flujo enfriado puede pasar a través de uno o más separadores para eliminar agua y cualquier otra impureza. El flujo restante es un flujo de CO₂ de reciclaje secundario y se combina con el flujo de CO₂ de reciclaje principal. Tal combinación puede ser en una variedad de puntos. Por ejemplo, el flujo de CO₂ de reciclaje principal se puede añadir a la segunda parte enfriada del escape de turbina después de su paso a través del intercambiador de calor de temperatura baja y antes de su paso a través del separador. Alternativamente, el flujo de CO₂ de reciclaje principal y el flujo de CO₂ de reciclaje secundario se pueden combinar después de la separación del agua o en otro punto del ciclo. El CO₂ neto producido a partir de la combustión se puede retirar en este punto, tal como para su uso en la recuperación de petróleo mejorada, para secuestro, o similares.

En algunas realizaciones, la segunda parte de escape de turbina se puede comprimir usando compresión de múltiples etapas en donde no hay enfriamiento intermedio entre etapas seguida de enfriamiento intermedio entre etapas posteriores. El gas comprimido y calentado de la segunda parte de escape de turbina que sale de las etapas no enfriadas se puede introducir en el intercambiador de calor como se ha descrito de otro modo anteriormente, y el flujo así enfriado se puede someter a la compresión con enfriamiento intermedio antes de combinarse con la primera parte de escape de turbina. El número de etapas no enfriadas (x) y etapas con enfriamiento intermedio (y) puede ser independientemente de 1 o más, de 2 o más, o de 3 o más (por ejemplo, de 1 a 5 o de 2 a 4).

El flujo de CO₂ de reciclaje total (formado por el flujo de CO₂ de reciclaje principal y el flujo de CO₂ de reciclaje secundario) se bombea a una presión adecuada para su paso a la cámara de combustión. Preferiblemente, el flujo de CO₂ de reciclaje total se bombea a una presión de 100 bares (10 Mapa) o más o de alrededor de 200 bares (20 Mapa) o más, tal como de alrededor de 100 bares (10 Mapa) a alrededor de 500 bares (50 Mapa). El flujo de CO₂ de reciclaje comprimido entonces se pasa de nuevo a través de los intercambiadores de calor para ser calentado. El flujo de CO₂ de reciclaje comprimido se calienta usando el calor retirado del flujo de escape de turbina (que se puede caracterizar como el calor de combustión que permanece en el flujo de escape de turbina). El calor en el flujo de escape de turbina, sin embargo, es insuficiente para conseguir un planteamiento de temperatura cercana entre el flujo de escape de turbina y el flujo de CO₂ de reciclaje comprimido, calentado en el extremo caliente del intercambiador de calor. Según la presente descripción, el calor de la segunda parte de escape de turbina, comprimida se usa como calentamiento aditivo para reducir el diferencial de temperatura entre el flujo de escape de turbina y el flujo de CO₂ de reciclaje calentado, comprimido que abandona el intercambiador de calor y que entra en

la cámara de combustión. El calentamiento aditivo se caracteriza como el calor de recompresión y se separa del calor de combustión que está presente en el escape de turbina. El uso del calentamiento aditivo puede ser beneficioso para reducir el diferencial de temperatura entre el flujo de escape de turbina y el flujo de CO₂ de reciclaje calentado, comprimido que abandona el intercambiador de calor y que entra en la cámara de combustión a

5 alrededor de 50° C o menos, a alrededor de 40° C o menos, o a alrededor de 30° C o menos, tal como de alrededor de 10° C a alrededor de 50° C, o de alrededor de 20° C a alrededor de 40° C.

En algunas realizaciones, el calentamiento aditivo se puede proporcionar por otros medios en combinación con o, en realizaciones que no forman parte de la presente invención, como alternativa al calor de la recompresión. Por

10 ejemplo, se puede utilizar CO₂ calentado de una fuente externa. Tal fuente externa puede ser, por ejemplo, CO₂ retirado de una fuente geológica, CO₂ tomado de una tubería, o similares. En tales realizaciones, puede ser innecesaria una división del flujo de escape de turbina, y el CO₂ calentado se puede introducir al sistema de la misma manera que el calor de recompresión descrito anteriormente. El CO₂ adicional se puede retirar del sistema con el producto de CO₂ neto y se puede devolver a la fuente de calor. De tal manera, un CO₂ de reciclaje de una

15 fuente externa completamente fuera del sistema de producción de energía se puede utilizar como calentamiento aditivo. Alternativamente, parte o la totalidad del calentamiento aditivo puede ser de un escape de turbina de gas o de un flujo de condensación.

Una realización ejemplar de un sistema según la presente descripción se muestra en la FIGURA 3. La realización se describe en relación con una realización ejemplar de un método de combustión que utiliza parámetros definidos. Las temperaturas y presiones específicas, por lo tanto, pueden variar en base a las condiciones de operación específicas.

20

En la realización de la FIGURA 3, un flujo de escape de turbina 55 a 728° C y 30 bares (3 Mapa) pasa a través de tres intercambiadores de calor 29, 27 y 26 economizadores en serie, que salen como flujo 46 a 46° C y 29 bares (2,9 Mapa). El intercambiador de calor 29 se puede caracterizar como un intercambiador de calor de temperatura alta, el intercambiador de calor 27 se puede caracterizar como un intercambiador de calor de temperatura intermedia, y el intercambiador de calor 26 se puede caracterizar como un intercambiador de calor de temperatura baja. Se entiende que los términos "temperatura alta", "temperatura intermedia" y "temperatura baja" se pretende que describan

25 solamente los intervalos de temperatura de operación de los tres intercambiadores de calor entre sí. El flujo 46 se enfría en un intercambiador de calor enfriado por agua 58 a 17,2° C, y un flujo de agua condensada 56 se separa en el recipiente 53 separador de fases. Un flujo 61 de gas CO₂ suplementario abandona el recipiente 53 separador de fases y se introduce en un compresor de reciclaje de CO₂ centrífugo de dos etapas 21 (etapa 1) y 22 (etapa 2), en donde un flujo 44 de descarga de la primera etapa 21 del compresor se enfría en un enfriador intermedio 23 a 17,2°

30 C, sale como el flujo 45 y luego se comprime en la segunda etapa 22 del compresor para formar el flujo 48 a 80 bares (8 Mapa). Este flujo 48 de descarga del compresor de reciclaje principal se une con el flujo 47, y el flujo 69 combinado se enfría en un intercambiador de calor 24 enfriado con agua a una temperatura de 22,7 ° C. En otras realizaciones, esta temperatura puede estar en el intervalo de 10° C a alrededor de 30° C. El agua 68 condensada se separa en un separador 67 de fases que produce el flujo 49 de CO₂ de reciclaje total, que está en estado supercrítico y tiene una densidad alta de 850 Kg/m³. Un flujo 62 de CO₂ de producto neto, equivalente al carbono en el gas combustible convertido a CO₂ en la cámara de combustión, se elimina del sistema (después del enfriamiento, como se ilustra, o antes del enfriamiento) para secuestro, uso en recuperación de petróleo mejorada, o similares.

35 40

El flujo 49 de CO₂ de reciclaje total se enfría en el intercambiador de calor 70 a una temperatura de 17,2° C y luego entra en una bomba 25 centrífuga de múltiples etapas con una presión de descarga de 305 bares (30,5 Mapa) para formar un flujo 50 de reciclaje de CO₂ de presión alta, que se calienta en los tres intercambiadores de calor 26, 27 y 29 economizadores en serie, saliendo como flujo 54 a una temperatura de 725° C y 302 bares (30,2 Mapa). El flujo 54 se calienta a 1154° C en la cámara de combustión 30 mediante la combustión directa de un flujo 40 de gas natural con un flujo 41 de O₂ al 99,5%, ambos a 320 bares (32 Mapa). En la realización ejemplificada, el modelado se hizo con CH₄ puro como el gas combustible. El flujo mezclado de CO₂ de reciclaje y de los productos 57 de combustión entra en una turbina 31 de energía con una presión de descarga de 30 bares (3 Mapa) y sale como el

45 50

flujo 55 de escape de turbina. Como se ve en la tabla anterior, la diferencia en el calor específico de CO₂ a 300 bares (30 Mapa) y 30 bares (3 Mapa) aumenta a medida que la temperatura cae de 1000 K (727° C). A la luz de esta diferencia, se requiere un calentamiento aditivo para lograr un planteamiento de temperatura cercana entre el flujo 55 de escape de turbina y el flujo 54 de CO₂ de reciclaje, y tal calentamiento aditivo se puede suministrar, por ejemplo, en el intercambiador de calor 26 economizador de "temperatura baja" y/o el intercambiador de calor 27 economizador de "temperatura intermedia". Según la presente descripción, el calentamiento aditivo se proporciona utilizando el calor adiabático de compresión de parte del flujo de CO₂ de reciclaje que, en la realización ejemplar, se comprime a una presión de

55 60

Volviendo a la realización ejemplar de la FIGURA 3, una parte del flujo 51 de escape de turbina enfriado entre las dos secciones 27 y 26 del intercambiador de calor economizador a una temperatura de 138° C se puede retirar y comprimir en un compresor 28 adiabático de una única etapa o de múltiples etapas produciendo el flujo 52 a 246° C y 80 bares (8 Mapa). El flujo 52 comprimido y calentado vuelve a entrar en el extremo caliente del intercambiador de

65

calor 27 economizador, y el flujo se pasa a través del intercambiador de calor 27 y el intercambiador de calor 26 donde se enfría y sale como el flujo 47 a 54° C. Todo el calor de compresión en el compresor 28 suministrado por el flujo 34 de trabajo se transfiere así al flujo de CO₂ de reciclaje de presión alta, y esta entrada de calor es equivalente al calor de combustión entregado en la cámara de combustión 30, dado que reduce la diferencia de temperatura del extremo caliente. La tasa de flujo del flujo 51 se maximiza para lograr una diferencia de temperatura significativamente pequeña entre los flujos 65 y 66 en la entrada al intercambiador de calor 29 economizador de temperatura alta. Esta diferencia de temperatura entre los flujos 65 y 66 es preferiblemente de alrededor de 50° C o menos, de alrededor de 40° C o menos, de alrededor de 30° C o menos, de alrededor de 20° C o menos, particularmente de alrededor de 10° C a alrededor de 50° C, o de alrededor de 20° C a alrededor de 40° C. Como se ha tratado anteriormente, el flujo 47 se une con el flujo 48 de descarga del compresor de reciclaje principal para su enfriamiento en el intercambiador de calor 24 a 22,7 ° C. El calentamiento aditivo proporcionado por la compresión de CO₂ como se ha descrito anteriormente proporciona un aumento de eficiencia en el sistema de producción de energía.

Cabe señalar que otras fuentes de calentamiento a temperatura baja (por ejemplo, flujo de condensación o escape de turbina de gas) se pueden utilizar como el calentamiento aditivo en realizaciones que no forman parte de la presente invención. La realización ejemplar de la FIGURA 3 incluye la planta 81 de separación de aire criogénico y el flujo 42a de aire principal que ha sido comprimido adiabáticamente a 5,7 bares (0,57 Mapa) y 223° C que entra en el extremo caliente del intercambiador de calor 27 economizador como el flujo 42 y que abandona el intercambiador de calor 26 como el flujo 43 a 54° C. En algunas realizaciones, el flujo 42 puede surgir del flujo 42b, que se ilustra como calor derivado de una turbina 83 de gas. Aunque no se ilustra en la FIGURA 3, en algunas realizaciones, el flujo de O₂ se puede suministrar desde la planta de separación de aire a 80 bares (8 Mapa) y a temperatura ambiente y se puede mezclar con CO₂ del flujo 49 para dar 25 mol% de O₂ que se puede comprimir a 320 bares (32 Mapa) antes de que se caliente a 725° C en los intercambiadores de calor 27, 26 y 29 economizadores. En la práctica, este compresor de CO₂+O₂ también puede presentar una sección de compresión de gas caliente como se ha mostrado para el compresor de reciclaje de CO₂. En la FIGURA 3, los flujos de entrada de agua de enfriamiento se representan como los flujos 38, 59, 72 y 36, mientras que los flujos de salida respectivos se representan como los flujos 39, 60, 74 y 37. Las entradas de energía del compresor se ilustran en la FIGURA 3 como los elementos 32 y 34, y tales entradas de energía pueden ser eléctricas o pueden ser accionadas por turbina. La entrada de energía eléctrica de la bomba de CO₂ se ilustra como el elemento 33. La salida de energía del eje de turbina se ilustra como el elemento 64 del generador 63.

La realización ejemplar descrita se evaluó con el software de modelado ASPEN usando eficiencias de máquina, diferencias de temperatura del intercambiador de calor y caídas de presión del sistema reales, dando una eficiencia neta del 58,5% (base LHV). El cálculo se basó en una entrada térmica de 500 MW a la cámara de combustión 30.

Aunque los sistemas y métodos descritos pueden ser particularmente aplicables a los sistemas y métodos de combustión para la producción de energía, también se abarca una aplicación más amplia para el calentamiento eficiente de un flujo de gas. Como tal, en algunas realizaciones, la presente descripción puede referirse a un método para calentar un flujo de gas, y particularmente para calentar un flujo de gas de recirculación. El flujo de gas de recirculación puede ser cualquier flujo de gas que esté en ciclo continuo a través de etapas de calentamiento y enfriamiento, incluyendo opcionalmente etapas de compresión y expansión.

Un flujo G de gas que se puede someter a calentamiento según la presente descripción puede ser cualquier gas; sin embargo, puede ser particularmente ventajoso que el flujo G de gas comprenda CO₂, tal como que sea al menos de alrededor de un 10%, al menos de alrededor de un 25%, al menos de alrededor de un 50%, al menos de alrededor de un 75% o al menos de alrededor de un 90% en masa de CO₂. Un flujo G de gas de recirculación particularmente está a una temperatura T₁ aumentada (por ejemplo, de alrededor de 500° C a alrededor de 1700° C) y una presión P₁ que permita la formación de una cantidad deseada de calor de compresión, por ejemplo, una presión de menos de alrededor de 40 bares (4 Mapa). El flujo G de gas a una presión P₁ y a una temperatura T₁ se enfría mediante su paso a través de un intercambiador de calor recuperativo. La refrigeración es tal que el flujo G de gas se enfría a una temperatura T₂ que es menor que T₁. En algunas realizaciones, el enfriamiento se puede llevar a cabo usando una serie de múltiples intercambiadores de calor (por ejemplo, 2, 3 o más intercambiadores de calor) o usando un intercambiador de calor que incluye una pluralidad de secciones de intercambio de calor o usando una combinación de los mismos. Los intercambiadores de calor individuales (o secciones de intercambio de calor) pueden intercambiar calor a diferentes intervalos de temperatura, con intervalos que pueden superponerse. El uso de múltiples intercambiadores de calor y/o secciones de intercambio de calor permite que los flujos sean añadidos o retirados a diferentes intervalos de temperatura.

El flujo G de gas se separa en una primera fracción G₁ y una segunda fracción G₂. Tal separación ocurre después de que el flujo G de gas se haya enfriado a la temperatura T₂ o a una temperatura T_{int} intermedia que está entre T₁ y T₂. La temperatura T₂, por ejemplo, puede ser la temperatura en el extremo frío del intercambiador de calor recuperativo (o el intercambiador de calor o la sección de intercambio de calor que trabaja en el intervalo de temperatura más bajo), y la temperatura T_{int}, por ejemplo, puede ser una temperatura en el extremo frío de un segundo intercambiador de calor (o segunda sección de intercambio de calor) en una serie de tres o más intercambiadores de calor (o secciones de intercambio de calor). Preferiblemente, la segunda fracción G₂ de gas puede ser retirada a una

temperatura intermedia antes de un enfriamiento adicional de la primera fracción G_1 de gas. Después de que la fracción G_1 del flujo de gas se haya enfriado, entonces se comprime a una mayor presión P_2 , que es mayor que P_1 . Tal compresión, por ejemplo, se puede llevar a cabo con un compresor de múltiples etapas que tiene enfriamiento intermedio. La presión P_3 puede ser, por ejemplo, de alrededor de 40 bares (4 Mapa) a alrededor de 100 bares (10 Mapa), de alrededor de 60 bares (6 Mapa) a alrededor de 100 bares (10 Mapa) o de alrededor de 67 bares (6,7 Mapa) a alrededor de 80 bares (8 Mapa).

La fracción G_2 del flujo de gas retirada se comprime de manera separada a una presión P_3 que es mayor que P_1 . La presión P_3 puede estar en el mismo intervalo de presión P_2 ; sin embargo, P_2 y P_3 no necesariamente necesitan ser idénticas. En algunas realizaciones, la fracción G_2 del flujo de gas se puede comprimir usando compresión adiabática sin enfriamiento intermedio para calentar la fracción G_2 del flujo de gas a una temperatura T_3 que es mayor que T_2 . En realizaciones en donde la fracción G_2 del flujo de gas se puede retirar a la temperatura T_{int} intermedia, T_3 preferiblemente es mayor que T_{int} . El calor de la fracción G_2 del flujo de gas comprimido se retira y usa como calentamiento aditivo para el flujo de gas de recirculación como se describe aún más a continuación.

Después de que el calor de compresión se haya retirado de la fracción G_2 del flujo de gas, la fracción G_1 del flujo de gas y la fracción G_2 del flujo de gas se combinan para formar un flujo G_C de gas de recirculación combinado. El flujo G_C de gas de recirculación tendrá una presión que es sustancialmente similar a la presión P_2 y/o P_3 y se bombea a una presión P_4 mayor que es mayor que P_2 y mayor que P_3 . Tal bombeo es deseable si el flujo G_C de gas de recirculación está siendo utilizado en una aplicación de presión alta. En algunas realizaciones, sin embargo, la presión P_2 y/o P_3 puede ser adecuada y puede no ser requerida una compresión adicional.

El flujo G_C de gas de recirculación a la presión P_4 se pasa al intercambiador de calor recuperativo de manera que el flujo G_C de gas se calienta por el flujo G de gas de enfriamiento. El calor retirado de la fracción G_2 del flujo de gas comprimido se añade al flujo G_C de gas de recirculación. Tal calentamiento aditivo se lleva a cabo después de bombear a la presión P_4 . En algunas realizaciones, el calentamiento aditivo se puede llevar a cabo en el intercambiador de calor recuperativo. Por ejemplo, si se usa un único intercambiador de calor recuperativo, el calor de la fracción del flujo de gas comprimido G_2 se puede introducir en el intercambiador de calor en un punto adecuado para proporcionar el calentamiento aditivo al flujo G_C de gas de recirculación en el intervalo de temperatura deseado. En realizaciones en donde se usa una pluralidad de intercambiadores de calor (o secciones de intercambio de calor), el calor de la fracción G_2 del flujo de gas comprimido se puede añadir a uno o más de los intercambiadores de calor (o secciones de intercambio de calor) de temperatura más baja. Por ejemplo, durante la compresión, la fracción G_2 del flujo de gas se puede calentar a una temperatura en el intervalo de alrededor de 100° C a alrededor de 400° C, y el calor de la fracción G_2 del flujo de gas comprimido se puede añadir a uno o más intercambiadores de calor (o secciones de intercambio de calor) que trabajan en este intervalo de temperatura. En la FIGURA 3, por ejemplo, la fracción G_2 del flujo de gas comprimido equivaldría al flujo 52, que pasa a través de los intercambiadores de calor 26 y 27, que están trabajando en un intervalo de temperatura más baja que el intercambiador de calor 29. En general, una serie de intercambiadores de calor tal como se ilustra en FIGURA 3, comprende tres intercambiadores de calor que transfieren cada uno en intervalos de temperatura separados (cuyos intervalos pueden superponerse). En el ejemplo de la FIGURA 3, el intercambiador de calor 29 se puede caracterizar como que opera en un intervalo R_1 de temperatura, el intercambiador de calor 27 se puede caracterizar como que opera en un intervalo R_2 de temperatura, y el intercambiador de calor 26 se puede caracterizar como que opera en un intervalo R_3 de temperatura. Como se ilustra, dado que el intercambiador de calor 29 está en el extremo caliente de la serie y el intercambiador de calor 26 está en el extremo frío de la serie, la relación de temperatura de la serie de intercambiadores de calor sería $R_1 > R_2 > R_3$.

El uso del calentamiento aditivo proporcionado por el calor de compresión en la fracción G_2 del flujo de gas comprimido puede ser beneficioso para llevar la temperatura del flujo G_C de gas de recirculación combinado significativamente cerca de la temperatura del flujo G de gas antes del enfriamiento. Por ejemplo, el flujo G_C de gas de recirculación después de pasar a través del intercambiador de calor recuperativo y de recibir el calor de la fracción de gas G_2 comprimido puede tener una temperatura T_4 que esté dentro de los 50° C de T_1 . Típicamente, la temperatura T_4 del flujo G_C de gas de recirculación después de pasar a través del intercambiador de calor recuperativo permanecerá por debajo de T_1 . En tales realizaciones, el flujo G_C de gas de recirculación después de pasar a través del intercambiador de calor recuperativo y de recibir el calor de la fracción G_2 de gas comprimido puede tener una temperatura T_4 que es inferior a T_1 en no más de 50° C.

El planteamiento de T_4 a T_1 se puede mejorar aún más a través de la adición de calor de una o más fuentes adicionales. Tal fuente de calor adicional puede comprender cualquier dispositivo o combinación de dispositivos configurados para impartir un calentamiento a un flujo que sea suficiente para calentar un flujo de gas como se describe en la presente memoria de modo que el flujo de gas logre la calidad y cantidad de calor deseada. Como ejemplos no limitantes, la fuente de calor adicional 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 de residuos industriales. La fuente de calor adicional puede incluir un intercambiador de calor, una bomba de calor, un dispositivo de producción de energía y cualquier combinación adicional de elementos (por ejemplo, tuberías y similares) adecuados para formar, proporcionar o entregar el calor necesario.

El método para calentar un flujo de gas de recirculación puede comprender además uno o más pasos. Por ejemplo, el flujo G de gas puede ser un flujo que sale de una turbina. Como tal, la presión P_1 del flujo G de gas puede ser menor que una presión P_0 anterior del flujo de gas antes de su paso a través de la turbina. En algunas realizaciones, P_0 puede ser sustancialmente similar a P_4 (por ejemplo, dentro del 10%, dentro del 5% o dentro del 2% del mismo).

En algunas realizaciones, el flujo G_C de gas de recirculación se puede someter a un paso de sobrecalentamiento después de salir del extremo caliente del intercambiador de calor (es decir, después de ser recalentado en el intercambiador de calor y de recibir el calentamiento aditivo de compresión de G_2). Por ejemplo, el flujo G_C de gas de recirculación se puede calentar con calor de combustión, con calor solar, con calor nuclear, con calor geotérmico, con calor de residuos industriales, o con cualquier combinación de los mismos. En algunas realizaciones, el flujo G_C de gas de recirculación se puede calentar así y entonces pasar a través de una turbina para su expansión y producción de energía. El flujo que abandona la turbina entonces se puede caracterizar de nuevo como el flujo G de gas.

Muchas modificaciones y otras realizaciones del tema descrito actualmente vendrán a la mente de un experto en la técnica a la que pertenece este tema que tiene el beneficio de las enseñanzas presentadas en las descripciones anteriores y los dibujos asociados. Por lo tanto, se ha de entender que la presente descripción no se limita a las realizaciones específicas descritas en la presente memoria y que modificaciones y otras realizaciones se pretende que estén incluidas dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas. Aunque se emplean términos específicos en la presente memoria, se usan solamente en un sentido genérico y descriptivo y no con propósitos de limitación.

REIVINDICACIONES

1. Un método para calentar un flujo de gas de recirculación que comprende:

- 5 pasar un flujo G de gas a una presión P_1 y a una temperatura T_1 a través de un intercambiador de calor recuperativo de manera que el flujo de gas se enfríe a una temperatura T_2 que es menor que T_1 ;
 separar el flujo G de gas en una primera fracción G_1 y una segunda fracción G_2 ;
 comprimir la fracción G_1 del flujo de gas a una presión P_2 que es mayor que P_1 ;
 10 comprimir la fracción G_2 del flujo de gas a una presión P_3 que es mayor que P_1 para calentar la fracción G_2 del flujo de gas a una temperatura T_3 que es mayor que T_2 ;
 retirar el calor de la fracción G_2 del flujo de gas comprimido;
 combinar la fracción G_1 del flujo de gas y la fracción G_2 del flujo de gas para formar el flujo G_C de gas de recirculación combinado;
 bombear el flujo G_C de gas de recirculación a una presión P_4 que es mayor que P_2 y mayor que P_3 ; y
 15 pasar el flujo G_C de gas de recirculación al intercambiador de calor recuperativo de manera que el flujo G_C de gas se caliente por el flujo G de gas de enfriamiento;
 en donde el calor retirado de la fracción G_2 del flujo de gas comprimido se añade al flujo G_C de gas de recirculación G_C después de bombear a presión P_4 .

20 2. El método según la reivindicación 1, en donde se aplican una o más de las siguientes condiciones:

- la temperatura T_3 es de alrededor de 100°C a alrededor de 400°C ;
 la presión P_2 de la fracción G_1 del flujo de gas y la presión P_3 de la fracción G_2 del flujo de gas son cada una por separado de alrededor de 40 bares (4 Mapa) a alrededor de 100 bares (10 Mapa);
 25 la presión P_4 del flujo G_C de gas de recirculación es de alrededor de 100 bares (10 Mapa) a alrededor de 500 bares (50 Mapa);
 la relación de masa entre la fracción G_1 de gas y la fracción G_2 de gas en base a la masa total del flujo G de gas es de alrededor de 50:50 a alrededor de 99:1;
 el flujo G_C de gas de recirculación después de pasar a través del intercambiador de calor recuperativo y de recibir el calor de la fracción G_2 de gas comprimido tiene una temperatura T_4 que está dentro de los 50°C de T_1 ;
 30 la fracción G_2 del flujo de gas se comprime con compresión de múltiples etapas sin enfriamiento intermedio;
 después de retirar calor de la fracción G_2 del flujo de gas, la fracción G_2 del flujo de gas se comprime aún más antes de combinarse con la fracción G_1 del flujo de gas.

35 3. El método según la reivindicación 1, en donde el intercambiador de calor recuperativo comprende tres intercambiadores de calor (29, 27, 26) o tres secciones de intercambio de calor en serie, de manera que el calor se transfiera en un primer intercambiador de calor (29) o sección de intercambio de calor que opera en el intervalo R_1 de temperatura, un segundo intercambiador de calor (27) o sección de intercambio de calor que opera en el intervalo R_2 de temperatura, y un tercer intercambiador de calor (26) o sección de intercambio de calor que opera en el intervalo R_3 de temperatura con la relación de temperatura de $R_1 > R_2 > R_3$.

4. El método según la reivindicación 3, en donde se aplican una o más de las siguientes condiciones:

- 45 el flujo G de gas se separa entre el primer intercambiador de calor (29) o sección de intercambio de calor y el segundo intercambiador de calor (27) o sección de intercambio de calor;
 el flujo G de gas se separa entre el segundo intercambiador de calor (27) o sección de intercambio de calor y el tercer intercambiador de calor (26) o sección de intercambio de calor;
 el calor retirado de la fracción G_2 del flujo de gas comprimido se añade al flujo G_C de gas de recirculación en uno o ambos del tercer intercambiador de calor (26) o sección de intercambio de calor y del segundo intercambiador de calor (27) o sección de intercambio de calor.

5. El método según la reivindicación 1, en donde se aplican una o más de las siguientes condiciones:

- 55 el método comprende además añadir calor al flujo G_C de gas de recirculación después de bombear a la presión P_4 , en donde el calor añadido se deriva de una o ambas de una unidad (81) de separación de aire y una turbina (83) de gas;
 el método comprende además pasar el flujo G_C de gas de recirculación calentado desde el intercambiador de calor recuperativo a una cámara de combustión (30) que quema un combustible con oxígeno para formar un flujo de producto de combustión;
 60 el flujo G de gas es un flujo de escape de turbina.

6. Un método para generar energía, el método comprende:

- 65 quemar un combustible con oxígeno en una cámara de combustión (30) en presencia de un flujo de CO_2 de reciclaje para producir un flujo de combustión que contiene CO_2 ;

pasar el flujo de combustión que contiene CO₂ a través de una turbina (31) para expandir el flujo de combustión que contiene CO₂, generar energía y formar un flujo de escape de turbina;
 retirar calor del flujo de escape de turbina;
 dividir el flujo de escape de turbina para formar una primera parte de escape de turbina y una segunda parte de escape de turbina;
 separar agua de la primera parte de escape de turbina para formar un flujo de CO₂ de reciclaje principal;
 comprimir el flujo de CO₂ de reciclaje principal;
 comprimir la segunda parte de escape de turbina para formar una segunda parte de escape de turbina comprimida, calentada;
 retirar el calor de la segunda parte de escape de turbina comprimida, calentada;
 separar agua de la segunda parte de escape de turbina comprimida, enfriada para formar un flujo de CO₂ de reciclaje secundario;
 combinar el flujo de CO₂ de reciclaje principal y el flujo de CO₂ de reciclaje secundario para formar un flujo de CO₂ de reciclaje combinado;
 comprimir el flujo de CO₂ de reciclaje combinado;
 calentar el flujo de CO₂ de reciclaje combinado con calor retirado del flujo de escape de turbina; y
 calentar aún más el flujo de CO₂ de reciclaje combinado con calor retirado de la segunda parte de escape de turbina comprimida, calentada.

7. El método según la reivindicación 6, en donde se aplican una o más de las siguientes condiciones:

el flujo de combustión que contiene CO₂ tiene una temperatura de alrededor de 500° C a alrededor de 1700° C y una presión de alrededor de 100 bares (10 Mapa) a alrededor de 500 bares (50 Mapa);
 la relación de presión a través de la turbina es de alrededor de 5 a alrededor de 12;
 el calor se retira del flujo de escape de turbina en un intercambiador de calor recuperativo que comprende tres o más secciones o que comprende tres o más intercambiadores de calor (29, 27, 26) individuales, particularmente en donde el calentamiento del flujo de CO₂ de reciclaje combinado con calor retirado del flujo de escape de turbina y el calentamiento adicional del flujo de CO₂ de reciclaje combinado con el calor retirado de la segunda parte de escape de turbina comprimida, calentada se lleva a cabo en el intercambiador de calor recuperativo.

8. El método según la reivindicación 6, en donde se aplican una o más de las siguientes condiciones:

la relación de masa de la primera parte de escape de turbina a la segunda parte de escape de turbina en base a la masa total del flujo de escape de turbina es de alrededor de 50:50 a alrededor de 99:1;
 el calor retirado de la segunda parte de escape de turbina comprimida, calentada está en un intervalo de temperatura de alrededor de 100° C a alrededor de 400° C;
 el flujo de CO₂ de reciclaje principal y la segunda parte de escape de turbina se comprimen de manera independiente a una presión de alrededor de 40 bares (4 Mapa) a alrededor de 100 bares (10 Mapa);
 el flujo de CO₂ de reciclaje combinado después del calentamiento con el calor retirado del flujo de escape de turbina y del calentamiento adicional con el calor retirado de la segunda parte de escape de turbina comprimida, calentada tiene una temperatura que está dentro de los 50° C de la temperatura del flujo de escape de turbina;
 la segunda parte de escape de turbina se comprime adiabáticamente sin enfriamiento intermedio entre las etapas del compresor.

9. Un sistema de generación de energía que comprende:

una cámara de combustión (30) configurada para consumir un flujo de combustión;
 una turbina (31) de producción de energía configurada para recibir y expandir el flujo de combustión y formar un flujo de escape de turbina;
 un intercambiador de calor recuperativo configurado para recibir el flujo de escape de turbina;
 un separador de flujo configurado para separar el flujo de escape de turbina enfriado en un primer flujo de gas y en un segundo flujo de gas;
 un primer compresor (21, 22) configurado para recibir y comprimir el primer flujo de gas;
 un segundo compresor (28) configurado para recibir y comprimir el segundo flujo de gas;
 una bomba (25) configurada para presurizar el primer flujo de gas y el segundo flujo de gas en combinación, la bomba colocada aguas abajo del primer compresor (21, 22) y del segundo compresor (28);
 un primer camino de flujo a través del intercambiador de calor recuperativo configurado para el paso del flujo de escape de turbina;
 un segundo camino de flujo a través del intercambiador de calor recuperativo configurado para el paso del primer flujo de gas presurizado y el segundo flujo de gas en combinación;
 un tercer camino de flujo a través del intercambiador de calor recuperativo configurado para el paso del segundo flujo de gas comprimido;
 en donde el primer camino de flujo y el tercer camino de flujo se configuran para calentar el segundo camino de flujo.

- 5 10. El sistema de generación de energía según la reivindicación 9, en donde el intercambiador de calor recuperativo comprende una serie de tres o más intercambiadores de calor (29, 27, 26) o una serie de tres o más secciones de calentamiento.
11. El sistema de generación de energía según la reivindicación 9, que comprende además uno o más separadores (53, 67) configurados para separar al menos agua de uno o ambos del primer flujo de gas y del segundo flujo de gas.
- 10 12. El sistema de generación de energía según la reivindicación 9, en donde el primer compresor (21, 22) comprende un compresor con enfriamiento intermedio de múltiples etapas.
- 15 13. El sistema de generación de energía según la reivindicación 9, en donde el segundo compresor (28) comprende un compresor adiabático de múltiples etapas sin enfriamiento intermedio entre las etapas del compresor.

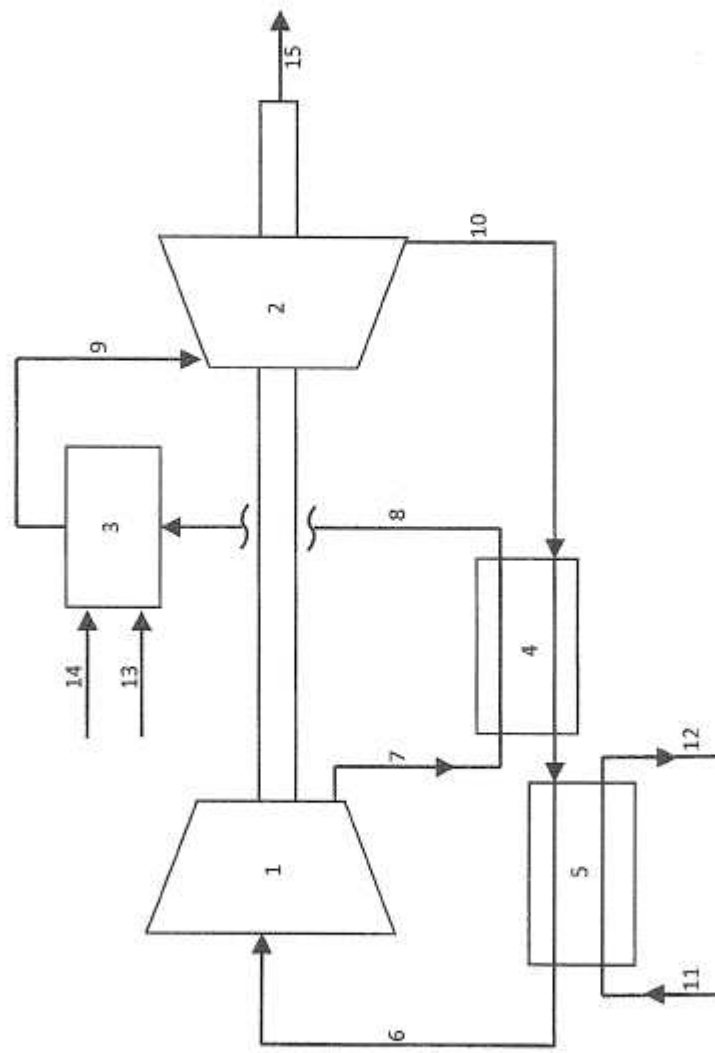


FIG. 1

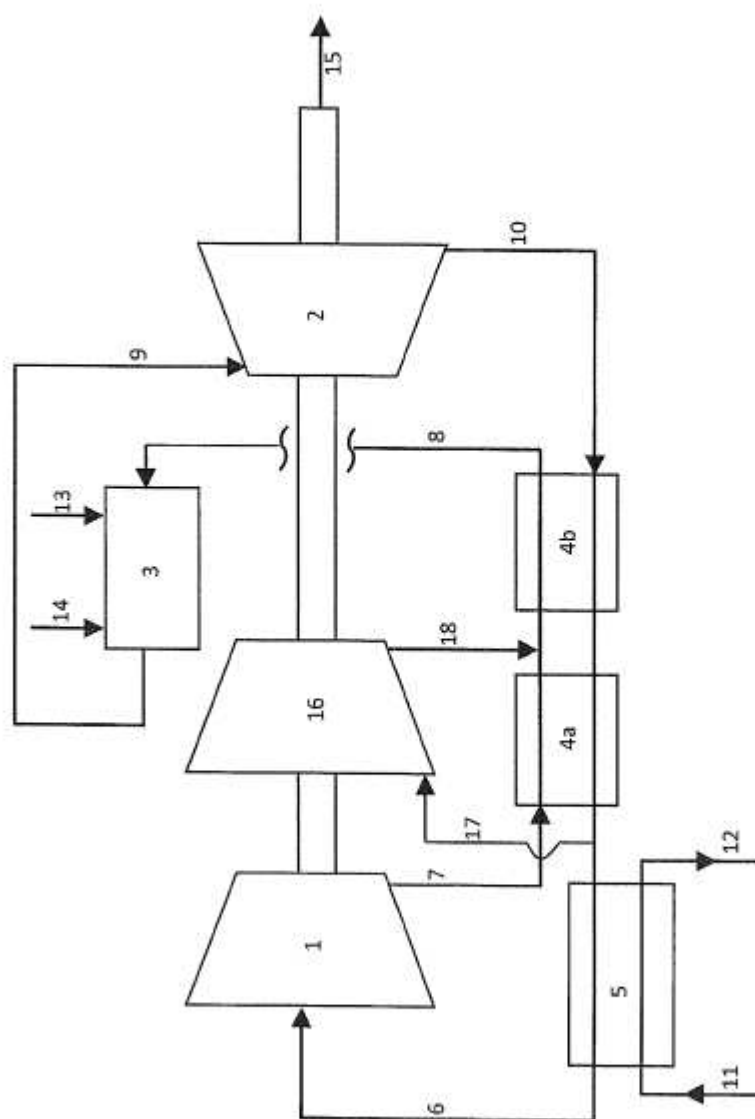


FIG. 2

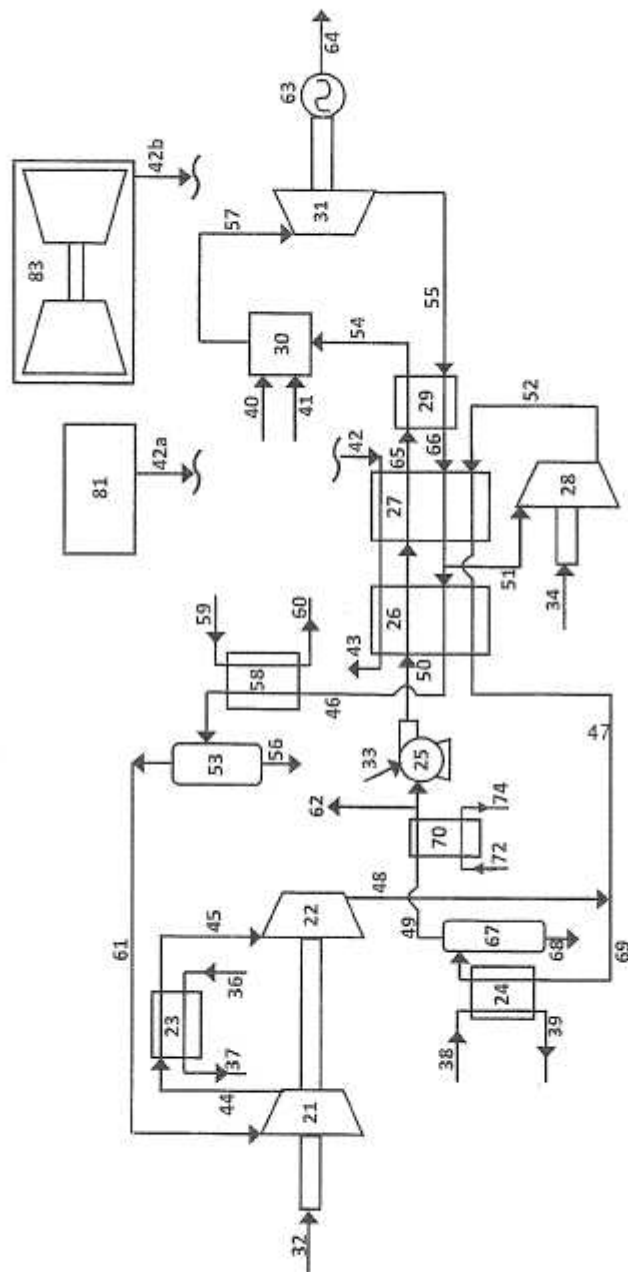


FIG. 3