

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 990 875**

51 Int. Cl.:

**F02C 3/34**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.07.2015** **E 21196351 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.09.2024** **EP 3974633**

54 Título: **Procedimiento 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:

**02.12.2024**

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 2 990 875 T3

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

## DESCRIPCIÓN

Procedimiento y sistema para la producción de energía con eficiencia mejorada

La presente descripción es una solicitud divisional y se refiere a la materia objeto descrita en la solicitud de patente europea N.º 15 739 729.0 del 7 de julio de 2015 y la solicitud de patente europea N.º 19 201 888.5 del 7 de julio de 2015.

### Campo de la descripción

La materia objeto actualmente descrita se refiere a sistemas y procedimientos para la generación de energía, tal como electricidad, que operan con eficiencias deseables que se logran a través del calentamiento aditivo de al menos parte de una corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje en un intercambiador de calor usando una fuente de calor adicional. En particular, el calor de la fuente adicional puede derivarse, al menos en parte, de la compresión de al menos una parte de la corriente de CO<sub>2</sub> 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, la patente de EE.UU. N.º 8,596,075 de Allam et al., proporciona eficiencias deseables en sistemas de combustión de ciclo cerrado que usan CO<sub>2</sub> como el fluido de trabajo. Los sistemas de este tipo en particular se benefician de la reconocida utilidad de calentar una corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje en un intercambiador de calor de recuperación usando calor del escape de la turbina caliente, así como de añadir calor adicional de una fuente distinta del escape de la turbina. A pesar de tales avances, todavía hay una creciente necesidad en la técnica de sistemas y procedimientos mejorados para la generación de energía que proporcionen un aumento de la eficiencia con la captura de CO<sub>2</sub> y otras impurezas derivadas del combustible y de la combustión.

### Compendio de la descripción

La presente descripción proporciona sistemas y procedimientos de producción de energía con eficiencia mejorada. Los sistemas y procedimientos pueden utilizar CO<sub>2</sub> como fluido de trabajo y se pueden configurar para capturar CO<sub>2</sub> 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 una corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje en un sistema y procedimiento de combustión de oxígeno-combustible a presión elevada que también utiliza calentamiento de recuperación de la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje con calor del escape de la turbina caliente. El calentamiento a nivel de temperatura bajo se puede describir en esta invención 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 la turbina caliente. En otras palabras, el calentamiento aditivo no es el calor que se recupera del escape de la turbina caliente. La presente descripción en particular identifica medios para la obtención y la transferencia del calentamiento aditivo en un sistema y procedimiento 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 tanto, proporciona un aumento ventajoso en la eficiencia.

La presente descripción se refiere a sistemas y procedimientos 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 una corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje seguido de la expansión del gas producto a través de una turbina que produce energía y el enfriamiento del escape de la turbina en un intercambiador de calor de recuperación, que calienta la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje comprimida previamente. Se puede obtener una eficiencia mejorada de la generación de energía mediante el calentamiento aditivo de al menos parte de la corriente de CO<sub>2</sub> 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 de la corriente de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 una corriente oxidada de predominantemente CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, exceso de O<sub>2</sub>, y una cantidad de impurezas derivadas de componentes oxidados en el combustible u oxidante, tales como SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, 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. Una corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje precalentada 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 una operación bajo las condiciones descritas de otro modo en esta invención, y la corriente de CO<sub>2</sub> 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 inactivar y de este modo controlar la temperatura de la corriente de salida. En algunas realizaciones, uno o ambos de un reactor POX y la cámara de combustión pueden utilizar, con fines ilustrativos solamente, una pared enfriada por transpiración que rodea el espacio de reacción o combustión, y la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje precalentada puede pasar a través de la pared tanto para enfriar la pared como para inactivar y de este modo controlar la temperatura de la corriente de salida. El flujo de transpiración promueve una buena mezcla entre el CO<sub>2</sub> de reciclaje y las corrientes 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 como los descritos en la publicación de patente de EE.UU. N.º 2013/0118145 también es abarcado por la presente descripción.

Los productos de combustión combinados y el CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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. Una presión de entrada de turbina de aproximadamente 100 bar (10 MPa) a aproximadamente 500 bar (50 MPa) puede usarse en algunas realizaciones. El oxígeno suministrado a la cámara de combustión puede ser o bien O<sub>2</sub> sustancialmente puro o bien O<sub>2</sub> diluido con CO<sub>2</sub>. En algunas realizaciones, la mezcla del O<sub>2</sub> y del CO<sub>2</sub> puede ser útil para controlar la temperatura de llama adiabática de la reacción de combustión. Como ejemplo no limitativo, la concentración molar de O<sub>2</sub> en la corriente O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> combinada puede ser de aproximadamente 10 % a aproximadamente 50 %, de aproximadamente 15 % a aproximadamente 40 %, o de aproximadamente 20 % a aproximadamente 30 %. El escape de la turbina caliente se puede enfriar en un intercambiador de calor economizador que, a su vez, precalienta la corriente de reciclaje de CO<sub>2</sub> 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 a la corriente de reciclaje de presión alta en el extremo frío del intercambiador de calor, tal como a un nivel de temperatura de aproximadamente 100 °C a aproximadamente 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 por completo 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 aproximadamente 100 °C a aproximadamente 400 °C y de modo que la transferencia de calor desde la corriente de aire comprimida a la corriente de proceso de CO<sub>2</sub> de reciclaje a presión se pueda lograr fácilmente. Por ejemplo, un flujo de corriente lateral tomado del flujo de reciclaje de CO<sub>2</sub> de presión alta en el intercambiador de calor economizador se puede calentar contra el aire comprimido de enfriamiento a una temperatura requerida de aproximadamente 100 °C a aproximadamente 400 °C. Los sistemas y procedimientos 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.º 8,596,075, patente de EE.UU. N.º 8,776,532, patente de EE.UU. N.º 8,986,002, la patente de EE.UU. N.º 9,068,743, la publicación de patente de EE.UU. 2010/0300063, la publicación de patente de EE.UU. N.º 2012/0067054, la publicación de patente de EE.UU. N.º 2012/0237881, y la publicación de patente de EE.UU. N.º 2013/0104525.

La presente descripción proporciona medios adicionales para introducir calor en una corriente de presión alta de CO<sub>2</sub> de reciclaje a una temperatura de aproximadamente 100 °C a aproximadamente 400 °C y, por tanto, aumentar la efectividad de un intercambiador de calor economizador y aumentar la eficiencia general del sistema y procedimiento 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 CO<sub>2</sub> de reciclaje como el calentamiento aditivo necesario para aumentar la eficiencia general de un sistema y procedimiento de producción de energía.

Se han hecho propuestas anteriores para optimizar el rendimiento de un ciclo de producción de energía utilizando CO<sub>2</sub> de alta presión como el fluido de trabajo. Por ejemplo, Bryant et al. ("An Analysis and Comparison of the Simple and Recompression Supercritical CO<sub>2</sub> Cycles", presentación de mayo de 2011 en el taller de ciclo de energía de CO<sub>2</sub> supercrítico en Boulder (Colorado), describe los ciclos de Brayton para la generación de energía usando un intercambiador de calor recuperador con CO<sub>2</sub> 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 FIG. 1. En el mismo, el CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> caliente pasa a continuación 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 CO<sub>2</sub> calentado aún más pasa a continuación 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 árbol (ilustrado por la flecha 15). La corriente 10 de escape de turbina pasa al intercambiador de calor 4 recuperador donde se enfría liberando calor hacia la corriente de reciclaje de presión alta. El escape de la turbina se enfría a continuación en un preenfriador 5 donde el calor se descarta de una corriente 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 FIG. 2, que es idéntico al ciclo que se muestra en la FIG. 1 aparte de la adición de una segunda etapa 16 de compresión en la que parte de la corriente 17 de escape de la turbina de presión baja que abandona el circuito de retorno de presión baja a la salida del intercambiador de calor 4a recuperador antes del preenfriador 5 se comprime en su condición caliente en el compresor 16 que sale a través de la línea 18. Esta corriente entra en el intercambiador de calor 4b recuperador después de su mezcla con la corriente 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 la corriente 10 de escape de la 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 una corriente de CO<sub>2</sub> a una temperatura elevada que es mayor que la temperatura de entrada del compresor de CO<sub>2</sub> principal.

La enseñanza de Bryant et al. revela una desventaja en que la entrada de calor evita la primera etapa del intercambiador de calor 4a recuperador. El calor específico mucho mayor de la corriente de CO<sub>2</sub> de presión alta que está siendo calentado en el intercambiador de calor 4a comparado con el enfriamiento de la corriente de escape de la turbina de presión baja en el intercambiador de calor 4a significa que la transferencia de calor en el intercambiador de calor 4a en la corriente de presión alta se debe maximizar para lograr una estrategia de temperatura cercana. Esto no se logra dado que la corriente de CO<sub>2</sub> comprimida calentada evita el intercambiador de calor 4a. Lo que se requiere para la máxima eficiencia es disponer de un sistema de compresión de gas caliente en el que el CO<sub>2</sub> comprimido se enfríe en el intercambiador de calor y aumente la transferencia de calor disponible a la corriente de CO<sub>2</sub> 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 FIG. 1 y FIG. 2 representan la técnica anterior conocida para la compresión de CO<sub>2</sub> caliente, solamente son adecuados para su uso en disposiciones de ciclo de Brayton simples que usan un compresor de CO<sub>2</sub> principal sin enfriadores 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 preenfriador también sea alto. Por lo tanto, resulta 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 CO<sub>2</sub>. Las relaciones de presión más altas conducen a pérdidas de calor excesivas en el sistema. Los ciclos de Bryant et al. que se muestran en la FIG. 1 y FIG. 2 tampoco tienen 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 FIG. 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 enfriadores 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 de 2,2 a una presión de entrada de la turbina de 100 bar y de 3,3 a una presión de entrada de la turbina de 250 bar. Las relaciones de presión bajas requieren caudales de CO<sub>2</sub> muy altos en el sistema para una salida de energía dada que produce 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 procedimientos útiles según la presente descripción pueden utilizar relaciones de presión de aproximadamente 5 o mayores, tales como de aproximadamente 5 a aproximadamente 30. En algunas realizaciones, las relaciones de presión pueden estar preferiblemente en el intervalo de aproximadamente 5 a aproximadamente 12. Los presentes sistemas y procedimientos también pueden utilizar sistemas de compresión de reciclaje de CO<sub>2</sub> principales de enfriamiento intermedio. La relación de presión alta favorece una presión de entrada de turbina por encima de la presión crítica de CO<sub>2</sub> de 7,38 MPa 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 tasas de circulación significativamente más bajas de CO<sub>2</sub> por kW de salida de energía neta. Los sistemas y procedimientos útiles según la presente descripción también utilizan preferiblemente una entrada muy considerable de calor aditivo a un nivel de temperatura, por ejemplo, superior a 100 °C, y particularmente en el intervalo de aproximadamente 100 °C a aproximadamente 400 °C o aproximadamente 100 °C a aproximadamente 300 °C. Los sistemas y procedimientos actualmente descritos son particularmente beneficiosos al proporcionar la utilización de una parte del calor de compresión del compresor de CO<sub>2</sub> de reciclaje principal como este calentamiento aditivo.

La presente descripción proporciona un sistema de generación de energía según la reivindicación 1.

La presente descripción se refiere además a un procedimiento de generación de energía según la reivindicación 11.

### Breve descripción de las figuras

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

La FIG. 1 es un diagrama de flujo de un ciclo de producción de energía de la técnica anterior;

5 La FIG. 2 es un diagrama de flujo de otro ciclo de producción de energía de la técnica anterior; y

La FIG. 3 es un diagrama de flujo de un sistema y procedimiento de producción de energía según una realización ejemplar de la presente descripción que incluye una pluralidad de compresores para comprimir una corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje y derivar calor de la misma para su entrada a un intercambiador de calor recuperador.

### Descripción detallada

10 La presente materia objeto se describirá ahora más completamente en lo sucesivo con referencia a realizaciones ejemplares de la misma. Estas realizaciones ejemplares se describen de manera que esta descripción sea exhaustiva y completa, y transmitirá completamente el alcance de la materia objeto a los expertos en la materia. De hecho, la materia objeto se puede incorporar de muchas formas diferentes y no se debería interpretar como limitada a las realizaciones expuestas en esta invención; más bien, estas realizaciones se proporcionan de modo que esta descripción satisfaga los requisitos legales aplicables. Tal como se utiliza en la memoria descriptiva y en las reivindicaciones adjuntas, las formas singulares "un", "uno/a" y "el/la" incluyen referentes en plural a menos que el contexto indique claramente lo contrario.

La presente descripción se refiere a sistemas y procedimientos que proporcionan generación de energía utilizando predominantemente CO<sub>2</sub> como fluido de trabajo. En particular, el procedimiento usa una turbina de relación de presión alta/presión baja que expande una mezcla de una corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje de presión alta y productos de combustión que surgen de la combustión del combustible. Puede usarse cualquier combustible fósil, particularmente combustibles carbonosos. Los ejemplos no limitativos incluyen gas natural, gases comprimidos, gases combustibles (por ejemplo, que comprenden uno o más de H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, y NH<sub>3</sub>) 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<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, Hg, y similares se pueden separar del ciclo de energía para su eliminación sustancial o completa sin emisiones a la atmósfera. Como se señaló anteriormente, también se pueden utilizar otros combustibles. Se puede usar oxígeno puro como oxidante en el procedimiento de combustión. En algunas realizaciones, la temperatura de combustión se puede regular diluyendo el oxígeno con CO<sub>2</sub> en relaciones como se señala de otro modo en esta invención.

El escape de la turbina caliente se usa para precalentar parcialmente la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje de presión alta. En combinación con este calentamiento, la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje se calienta además usando calentamiento aditivo que se deriva de la energía de compresión de un compresor de CO<sub>2</sub>. Las condiciones de funcionamiento para el compresor de CO<sub>2</sub> pueden variar como se describe adicionalmente en esta invención. Por ejemplo, en algunas realizaciones, puede ser útil utilizar una temperatura de entrada del compresor de CO<sub>2</sub> que sea más alta que la estrategia normal para los medios de enfriamiento ambiental. La temperatura mínima de entrada de la corriente que entra en el compresor de CO<sub>2</sub>, por ejemplo, puede ser aproximadamente del punto de condensación del agua en las condiciones operativas. En algunas realizaciones, el compresor de CO<sub>2</sub> puede tener una temperatura de entrada de aproximadamente 50 °C a aproximadamente 250 °C. Se usa al menos otro medio de calentamiento que proporciona calor a un nivel de temperatura inferior a aproximadamente 400 °C además del calentamiento disponible a partir de la compresión de CO<sub>2</sub>. Tales medios pueden incluir el calor transferido desde los compresores de aire de una planta de separación de aire criogénico que funciona parcial o completamente en el modo adiabático sin enfriamiento intermedio. Cuando se utiliza tal calor, los compresores de aire pueden funcionar 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 del suministro de calentamiento aditivo como se define en esta invención, siendo tal calentamiento aditivo proporcionado particularmente a un nivel de temperatura por debajo de aproximadamente 400 °C (por ejemplo, en el intervalo de aproximadamente 100 °C a aproximadamente 400 °C). El suministro del calentamiento aditivo puede superar la gran diferencia en el calor específico de CO<sub>2</sub> en una entrada de turbina de presión alta típica de aproximadamente 300 bar (30 MPa) y el calor específico de CO<sub>2</sub> en una presión de escape de turbina de presión baja típica de aproximadamente 30 bar (3 MPa). Esta diferencia es evidente en la tabla que se proporciona a continuación.

Temperatura K (°C)	Calor específico de CO <sub>2</sub> (kJ/kg) a 30 bar (3 MPa)	Calor específico de CO <sub>2</sub> (kJ/kg) a 300 bar (30 MPa)
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 procedimiento de producción de energía según la presente descripción comprende particularmente una serie de etapas que pueden proporcionar un aumento de eficiencia. El procedimiento comprende pasar una corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje comprimida, calentada a una cámara de combustión. La corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje comprimida, calentada se puede formar como se describe más adelante. 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<sub>2</sub>) en presencia de la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje para producir una corriente que contiene CO<sub>2</sub>. La corriente que contiene CO<sub>2</sub> de la cámara de combustión puede tener una temperatura de aproximadamente 500 °C o más (por ejemplo, de aproximadamente 500 °C a aproximadamente 1700 °C o de aproximadamente 800 °C a aproximadamente 1600 °C) y una presión de aproximadamente 100 bar (10 MPa) o más (por ejemplo, de aproximadamente 100 bar (10 MPa) a aproximadamente 500 bar (50 MPa)). La corriente que contiene CO<sub>2</sub> pasa a través de una turbina para expandir la corriente que contiene CO<sub>2</sub>, generar energía y formar una corriente de escape de la turbina que comprende CO<sub>2</sub>. La corriente que contiene CO<sub>2</sub> se puede expandir a través de la turbina a una relación de presión de menos de 12 o menos de 10 (por ejemplo, de aproximadamente 5 a aproximadamente 12). En realizaciones alternativas, se pueden usar relaciones de presión altas como se señala en esta invención, tal como en el caso de utilizar una pluralidad de turbinas, como se describe en la publicación de patente de EE.UU. N.º 2013/0213049.

La corriente de escape de la turbina se puede procesar para eliminar productos de combustión y cualquier CO<sub>2</sub> neto producido por la combustión del combustible. Para este fin, la corriente de escape de la 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 esta invención. 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 puede describirse con al menos tres secciones de intercambio de calor que funcionan a través de diferentes intervalos de temperatura. El calor extraído de la corriente de escape de la turbina se puede utilizar para calentar la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje como se describe a continuación.

La corriente de escape de la 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 másico total de la corriente de escape de la turbina. La primera parte de escape de la turbina se enfría preferiblemente a una temperatura que es menor que el punto de rocío del agua después de salir del intercambiador de calor. La primera parte de escape de la turbina se puede pasar a través de un separador para eliminar el agua y se puede tratar adicionalmente para eliminar otros productos de combustión o impurezas. La corriente resultante se puede describir como una corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje principal, y esta corriente se puede comprimir tal como en un compresor de múltiples etapas con enfriamiento intermedio entre las etapas. Preferiblemente, la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje principal se comprime a una presión de aproximadamente 40 bar (4 MPa) a aproximadamente 100 bar (10 MPa). En algunas realizaciones, la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje principal se comprime a una presión de aproximadamente 60 bar (6 MPa) a aproximadamente 100 bar (10 MPa) o de aproximadamente 67 bar (6,7 MPa) a aproximadamente 80 bar (8 MPa).

La segunda parte de la corriente de escape de la turbina se comprime para formar una segunda parte de escape de la turbina comprimida y calentada. La segunda parte de escape de la turbina puede comprender el resto del escape de la turbina no presente en la primera parte (por ejemplo, 50 % o menos, 30 % o menos, o 10 % o menos (pero mayor que 0 %) del flujo másico total de la corriente de escape de la turbina).

Preferiblemente, la segunda parte de escape de la turbina se puede retirar del escape de la turbina entre las secciones de intercambio de calor segunda y tercera (por ejemplo, los intercambiadores de calor segundo y tercero 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 la turbina se comprime preferiblemente para lograr una temperatura en el intervalo de aproximadamente 100 °C a aproximadamente 400 °C y una presión de aproximadamente 40 bar (4 MPa) a aproximadamente 100 bar (10 MPa). En algunas realizaciones, la presión puede ser de aproximadamente 60 bar (6 MPa) a aproximadamente 100 bar (10 MPa) o de aproximadamente 67 bar (6,7 MPa) a aproximadamente 80 bar (8 MPa). La segunda parte de escape de la 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 la turbina enfriada puede estar a una temperatura que esté por debajo del punto de condensación del agua, y la corriente enfriada puede pasar a través de uno o más separadores para eliminar agua y cualquier otra impureza. La corriente restante es una corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje secundaria, y se combina con la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje principal. Dicha combinación puede darse en diversos puntos. Por ejemplo, la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje principal se puede añadir a la segunda parte enfriada del escape de la turbina después de su paso a través del intercambiador de calor de temperatura baja y antes de su paso a través del separador. Alternativamente, la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje principal y la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje secundaria se pueden combinar después de la separación del agua o en otro punto del ciclo. El CO<sub>2</sub> 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 la turbina se puede comprimir usando compresión de múltiples etapas donde no hay enfriamiento intermedio entre etapas seguido de enfriamiento intermedio entre etapas posteriores. El gas comprimido y calentado de la segunda parte de escape de la 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 la corriente así enfriada se puede someter a la compresión con enfriamiento intermedio antes de combinarse con la primera parte de escape de la turbina. El número de etapas no enfriadas (x) y etapas con enfriamiento intermedio (y) puede ser independientemente 1 o más, 2 o más, o 3 o más (por ejemplo, 1 a 5 o 2 a 4).

La corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje total (formada por la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje principal y la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje secundaria) se bombea a una presión adecuada para su paso a la cámara de combustión. Preferiblemente, la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje total se bombea a una presión de 100 bar (10 MPa) o más o de aproximadamente 200 bar (20 MPa) o más, tal como de aproximadamente 100 bar (10 MPa) a aproximadamente 500 bar (50 MPa).

La corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje comprimida se pasa de nuevo a través de los intercambiadores de calor para ser calentada. La corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje comprimida se calienta usando el calor extraído de la corriente de escape de la turbina (que se puede caracterizar como el calor de combustión que permanece en la corriente de escape de la turbina). Sin embargo, el calor en la corriente de escape de la turbina es insuficiente para conseguir una estrategia de temperatura cercana entre la corriente de escape de la turbina y la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje comprimida, calentada en el extremo caliente del intercambiador de calor. Según la presente descripción, el calor de la segunda parte de escape de la turbina comprimida se usa como calentamiento aditivo para reducir la diferencia de temperatura entre la corriente de escape de la turbina y la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje calentada, comprimida que sale del intercambiador de calor y entra en la cámara de combustión. El calentamiento aditivo puede caracterizarse como el calor de recompresión y se separa del calor de combustión que está presente en el escape de la turbina. El uso del calentamiento aditivo puede ser beneficioso para reducir la diferencia de temperatura entre la corriente de escape de la turbina y la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje calentada, comprimida que sale del intercambiador de calor y que entra en la cámara de combustión aproximadamente a 50 °C o menos, aproximadamente a 40 °C o menos, o aproximadamente a 30 °C o menos, tal como de aproximadamente 10 °C a aproximadamente 50 °C, o de aproximadamente 20 °C a aproximadamente 40 °C.

Se proporciona al menos un calentamiento aditivo por otros medios en combinación con el calor de recompresión. Por ejemplo, se puede utilizar CO<sub>2</sub> calentado a partir de una fuente externa. Dicha fuente externa puede ser, por ejemplo, CO<sub>2</sub> extraído de una fuente geológica, CO<sub>2</sub> tomado de una tubería o similares. En tales realizaciones, puede ser innecesaria una división de la corriente de escape de la turbina, tales realización no forman parte de la invención reivindicada y el CO<sub>2</sub> calentado se puede introducir en el sistema de la misma manera que el calor de recompresión descrito anteriormente. El CO<sub>2</sub> adicional se puede retirar del sistema con el CO<sub>2</sub> neto reciclado de una fuente externa completamente fuera del sistema de producción de energía que 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 una corriente de condensación.

En la FIG. 3 se muestra una realización ejemplar de un sistema según la presente descripción. La realización se describe en relación con una realización ejemplar de un procedimiento de combustión que utiliza parámetros definidos. Por lo tanto, las temperaturas y presiones específicas pueden variar según las condiciones de operación específicas.

En la realización de la FIG. 3, una corriente de escape de la turbina 55 a 728 °C y 30 bar (3 MPa) pasa a través de tres intercambiadores de calor 29, 27 y 26 economizadores en serie, que sale como corriente 46 a 46 °C y 29 bar (2,9 MPa). El intercambiador de calor 29 puede caracterizarse como un intercambiador de calor de alta temperatura, el intercambiador de calor 27 puede caracterizarse como un intercambiador de calor de temperatura intermedia, y el

intercambiador de calor 26 puede caracterizarse como un intercambiador de calor de baja temperatura. Se entiende que las expresiones "alta temperatura", "temperatura intermedia" y "baja temperatura" solamente pretenden describir los intervalos de temperatura de funcionamiento de los tres intercambiadores de calor entre sí. La corriente 46 se enfría en un intercambiador de calor enfriado con agua 58 a 17,2 °C, y una corriente de agua condensada 56 se separa en el recipiente 53 separador de fases. Una corriente 61 de gas CO<sub>2</sub> de cabeza sale del recipiente 53 separador de fases y se introduce en un compresor de reciclaje de CO<sub>2</sub> centrífugo de dos etapas 21 (etapa 1) y 22 (etapa 2), donde una corriente de descarga 44 de la primera etapa 21 del compresor se enfría en un enfriador intermedio 23 a 17,2 °C, sale como la corriente 45 y a continuación se comprime en la segunda etapa 22 del compresor para formar la corriente 48 a 80 bar (8 MPa). Esta corriente 48 de descarga del compresor de reciclaje principal se une con la corriente 47, y la corriente 69 combinada 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 aproximadamente 30 °C. El agua 68 condensada se separa en un separador 67 de fases que produce la corriente 49 de CO<sub>2</sub> de reciclaje total, que está en estado supercrítico y tiene una densidad alta de 850 Kg/m<sup>3</sup>. Una corriente 62 de CO<sub>2</sub> de producto neto, equivalente al carbono en el gas combustible convertido a CO<sub>2</sub> en la cámara de combustión, se elimina del sistema (después del enfriamiento, como se ilustra, o antes del enfriamiento) para su secuestro, uso en recuperación de petróleo mejorada, o similares.

La corriente 49 de CO<sub>2</sub> de reciclaje total se enfría en el intercambiador de calor 70 a una temperatura de 17,2 °C y a continuación entra en una bomba 25 centrífuga de múltiples etapas con una presión de descarga de 305 bar (30,5 MPa) para formar una corriente 50 de reciclaje de CO<sub>2</sub> de presión alta, que se calienta en los tres intercambiadores de calor 26, 27 y 29 economizadores en serie, que sale como corriente 54 a una temperatura de 725 °C y 302 bar (30,2 MPa). La corriente 54 se calienta a 1154 °C en la cámara de combustión 30 mediante la combustión directa de una corriente 40 de gas natural con una corriente 41 de O<sub>2</sub> al 99,5 %, ambas a 320 bar (32 MPa). En la realización ejemplificada, el modelado se realizó con CH<sub>4</sub> puro como gas combustible. La corriente mezclada de CO<sub>2</sub> de reciclaje y de los productos 57 de combustión entra en una turbina 31 de energía con una presión de descarga de 30 bar (3 MPa) y sale como la corriente 55 de escape de la turbina.

Como se observa en la tabla anterior, la diferencia en el calor específico de CO<sub>2</sub> a 300 bar (30 MPa) y 30 bar (3 MPa) aumenta a medida que la temperatura cae de 727 °C (1000 K). A la luz de esta diferencia, se requiere un calentamiento aditivo para lograr una estrategia de temperatura cercana entre la corriente 55 de escape de la turbina y la corriente 54 de CO<sub>2</sub> 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 de la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje que, en la realización ejemplar, se comprime a una presión de aproximadamente 29 bar (2,9 MPa) a aproximadamente 80 bar (8 MPa).

Volviendo a la realización ejemplar de la FIG. 3, una parte de la corriente 51 de escape de la turbina enfriada 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 la corriente 52 a 246 °C y 80 bar (8 MPa). La corriente 52 comprimida y calentada vuelve a entrar en el extremo caliente del intercambiador de calor 27 economizador, y la corriente se pasa a través del intercambiador de calor 27 y el intercambiador de calor 26 donde se enfría y sale como la corriente 47 a 54 °C. Todo el calor de compresión en el compresor 28 suministrado por la corriente de trabajo 34 se transfiere así a la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje de presión alta, y esta entrada de calor es equivalente al calor de combustión entregado en la cámara de combustión 30, ya que reduce la diferencia de temperatura del extremo caliente. El caudal de la corriente 51 se maximiza para lograr una diferencia de temperatura significativamente pequeña entre las corrientes 65 y 66 en la entrada respecto al intercambiador de calor 29 economizador de temperatura alta. Esta diferencia de temperatura entre las corrientes 65 y 66 es preferiblemente de aproximadamente 50 °C o menos, de aproximadamente 40 °C o menos, de aproximadamente 30 °C o menos, de aproximadamente 20 °C o menos, particularmente de aproximadamente 10 °C a aproximadamente 50 °C, o de aproximadamente 20 °C a aproximadamente 40 °C. Como se ha analizado anteriormente, la corriente 47 se une con la corriente 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 CO<sub>2</sub> como se ha descrito anteriormente proporciona un aumento de eficiencia en el sistema de producción de energía.

Tenga en cuenta que otras fuentes de calentamiento a temperatura baja (por ejemplo, corriente de condensación o escape de la turbina de gas) se pueden utilizar como el calentamiento aditivo. La realización ejemplar de la FIG. 3 incluye la planta 81 de separación de aire criogénico y el flujo de aire principal 42a que ha sido comprimido adiabáticamente a 5,7 bar (0,57 MPa) y 223 °C que entra en el extremo caliente del intercambiador de calor 27 economizador como la corriente 42 y que sale del intercambiador de calor 26 como la corriente 43 a 54 °C. En algunas realizaciones, la corriente 42 puede surgir de la corriente 42b, que se ilustra como calor derivado de una turbina de gas 83. Aunque no se ilustra en la FIG. 3, en algunas realizaciones, la corriente de O<sub>2</sub> se puede suministrar desde la planta de separación de aire a 80 bar (8 MPa) y a temperatura ambiente y se puede mezclar con CO<sub>2</sub> de la corriente 49 para dar 25 % en moles de O<sub>2</sub> que se puede comprimir a 320 bar (32 MPa) antes de que se caliente a 725 °C en los intercambiadores de calor 27, 26 y 29 economizadores. En la práctica, este compresor de CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> también puede contar con una sección de compresor de gas caliente como se ha mostrado para el compresor de reciclaje de CO<sub>2</sub>. En la FIG. 3, las corrientes de entrada de agua de enfriamiento se representan como las corrientes 38, 59, 72 y 36, mientras que las corrientes de salida respectivas se representan como las corrientes 39, 60, 74 y 37. Las entradas de energía del compresor se ilustran en la FIG. 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 CO<sub>2</sub> se ilustra como el elemento 33. La salida de energía del árbol de la 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 procedimientos descritos pueden ser particularmente aplicables a sistemas y procedimientos de combustión para la producción de energía, también se abarca una aplicación más amplia para el calentamiento eficiente de una corriente de gas, no formando tales realizaciones parte de la invención reivindicada. Como tal, en algunas realizaciones, la presente descripción puede referirse a un procedimiento de calentamiento de una corriente de gas, y particularmente para calentar una corriente de gas de recirculación. La corriente de gas de recirculación puede ser cualquier corriente de gas que esté en ciclo continuo a través de etapas de calentamiento y enfriamiento, incluyendo opcionalmente etapas de compresión y expansión.

Una corriente de gas G que se puede someter a calentamiento según la presente descripción puede ser cualquier gas; sin embargo, puede ser particularmente ventajoso que la corriente de gas G comprenda CO<sub>2</sub>, tal como que sea al menos aproximadamente 10 %, al menos aproximadamente 25 %, al menos aproximadamente 50 %, al menos aproximadamente 75 % o al menos aproximadamente 90 % en masa de CO<sub>2</sub>. Una corriente de gas de recirculación G particularmente puede estar a una temperatura T<sub>1</sub> aumentada (por ejemplo, de aproximadamente 500 °C a aproximadamente 1700 °C) y una presión P<sub>1</sub> que permita la formación de una cantidad deseada de calor de compresión, por ejemplo, una presión de menos de aproximadamente 40 bar (4 MPa). La corriente de gas G a una presión P<sub>1</sub> y a una temperatura T<sub>1</sub> se enfría mediante su paso a través de un intercambiador de calor de recuperación. Preferiblemente, el enfriamiento es tal que la corriente de gas G se enfría a una temperatura T<sub>2</sub> que es menor que T<sub>1</sub>. 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 en diferentes intervalos de temperatura, cuyos intervalos pueden superponerse. El uso de múltiples intercambiadores de calor y/o secciones de intercambio de calor permite que las corrientes se añadan o retiren a diferentes intervalos de temperatura.

La corriente de gas G se puede separar en una primera fracción G<sub>1</sub> y en una segunda fracción G<sub>2</sub>. Dicha separación puede ocurrir después de que la corriente de gas G se haya enfriado a la temperatura T<sub>2</sub> o a una temperatura intermedia T<sub>int</sub> que está entre T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub>. La temperatura T<sub>2</sub>, por ejemplo, puede ser la temperatura en el extremo frío del intercambiador de calor de recuperación (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<sub>int</sub>, 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 de gas G<sub>2</sub> puede ser retirada a una temperatura intermedia antes de un enfriamiento adicional de la primera fracción de gas G<sub>1</sub>. Después de que la fracción G<sub>1</sub> de la corriente de gas se haya enfriado, a continuación se comprime a una mayor presión P<sub>2</sub>, que preferiblemente puede ser mayor que P<sub>1</sub>. Dicha compresión, por ejemplo, se puede llevar a cabo con un compresor de múltiples etapas que tiene enfriamiento intermedio. La presión P<sub>3</sub> puede ser, por ejemplo, de aproximadamente 40 bar (4 MPa) a aproximadamente 100 bar (10 MPa), de aproximadamente 60 bar (6 MPa) a aproximadamente 100 bar (10 MPa) o de aproximadamente 67 bar (6,7 MPa) a aproximadamente 80 bar (8 MPa).

La fracción G<sub>2</sub> de la corriente de gas retirada se comprime de manera separada a una presión P<sub>3</sub> que también es preferiblemente mayor que P<sub>1</sub>. La presión P<sub>3</sub> puede estar en el mismo intervalo de presión P<sub>2</sub>; sin embargo, P<sub>2</sub> y P<sub>3</sub> no necesariamente necesitan ser idénticas. En algunas realizaciones, la fracción G<sub>2</sub> de la corriente de gas se puede comprimir usando compresión adiabática sin enfriamiento intermedio para calentar la fracción G<sub>2</sub> de la corriente de gas a una temperatura T<sub>3</sub> que es mayor que T<sub>2</sub>. En realizaciones donde la fracción G<sub>2</sub> de la corriente de gas se puede retirar a la temperatura intermedia T<sub>int</sub>, T<sub>3</sub> preferiblemente es mayor que T<sub>int</sub>. El calor de la fracción G<sub>2</sub> de la corriente de gas comprimida se retira y usa como calentamiento aditivo para la corriente de gas de recirculación como se describe adicionalmente a continuación.

Después de que el calor de compresión se haya retirado de la fracción G<sub>2</sub> de la corriente de gas, la fracción G<sub>1</sub> de la corriente de gas y la fracción G<sub>2</sub> de la corriente de gas se combinan para formar una corriente G<sub>C</sub> de gas de recirculación combinada. La corriente G<sub>C</sub> de gas de recirculación tendrá una presión que es sustancialmente similar a la presión P<sub>2</sub> y/o P<sub>3</sub> y se bombea a una presión P<sub>4</sub> mayor que es mayor que P<sub>2</sub> y mayor que P<sub>3</sub>. Tal bombeo es deseable si la corriente G<sub>C</sub> de gas de recirculación está siendo utilizada en una aplicación de presión alta. Sin embargo, en algunas realizaciones, la presión P<sub>2</sub> y/o P<sub>3</sub> puede ser adecuada y puede no ser requerida una compresión adicional.

La corriente G<sub>C</sub> de gas de recirculación (opcionalmente a la presión P<sub>4</sub>) puede pasar al intercambiador de calor de recuperación de manera que la corriente G<sub>C</sub> de gas se calienta por la corriente G de gas de enfriamiento. El calor extraído de la fracción G<sub>2</sub> de la corriente de gas comprimida se añade a la corriente G<sub>C</sub> de gas de recirculación. Dicho calentamiento aditivo se puede llevar a cabo después del bombeo a la presión P<sub>4</sub>. En algunas realizaciones, el calentamiento aditivo se puede llevar a cabo en el intercambiador de calor de recuperación. Por ejemplo, si se usa un único intercambiador de calor de recuperación, el calor de la fracción G<sub>2</sub> de la corriente de gas comprimida se puede

introducir en el intercambiador de calor en un punto adecuado para proporcionar el calentamiento aditivo a la corriente  $G_C$  de gas de recirculación en el intervalo de temperatura deseado. En realizaciones donde se usa una pluralidad de intercambiadores de calor (o secciones de intercambio de calor), el calor de la fracción  $G_2$  de la corriente de gas que se comprime 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  $G_2$  de la corriente de gas se puede calentar a una temperatura en el intervalo de aproximadamente 100 °C a aproximadamente 400 °C, y el calor de la fracción  $G_2$  de la corriente de gas que se comprime 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 FIG. 3, por ejemplo, la fracción  $G_2$  de la corriente de gas que se comprime equivaldría a la corriente 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 FIG. 3, comprende tres intercambiadores de calor que transfieren cada uno en intervalos de temperatura separados (cuyos intervalos pueden superponerse). En el ejemplo de la FIG. 3, el intercambiador de calor 29 puede caracterizarse por funcionar en un intervalo de temperatura  $R_1$ , el intercambiador de calor 27 puede caracterizarse por funcionar en un intervalo de temperatura  $R_2$  y el intercambiador de calor 26 puede caracterizarse por funcionar en un intervalo de temperatura  $R_3$ . 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  $G_2$  de la corriente de gas que se comprime puede ser beneficioso para llevar la temperatura de la corriente  $G_C$  de gas de recirculación combinada significativamente cerca de la temperatura de la corriente  $G$  de gas antes del enfriamiento. Por ejemplo, la corriente  $G_C$  de gas de recirculación después de pasar a través del intercambiador de calor de recuperación y de recibir el calor de la fracción  $G_2$  de gas que se comprime puede tener una temperatura  $T_4$  que esté dentro de los 50 °C de  $T_1$ . Típicamente, la temperatura  $T_4$  de la corriente  $G_C$  de gas de recirculación después de pasar a través del intercambiador de calor de recuperación permanecerá por debajo de  $T_1$ . En tales realizaciones, la corriente  $G_C$  de gas de recirculación después de pasar a través del intercambiador de calor de recuperación y de recibir el calor de la fracción  $G_2$  de gas que se comprime puede tener una temperatura  $T_4$  que es menor que  $T_1$  en no más de 50 °C.

La estrategia de  $T_4$  a  $T_1$  se puede mejorar aún más mediante la adición de calor de una o más fuentes adicionales. Dicha fuente de calor adicional puede comprender cualquier dispositivo o combinación de dispositivos configurados para impartir un calentamiento a una corriente que sea suficiente para calentar una corriente de gas como se describe en esta invención, de modo que la corriente de gas logre la calidad y cantidad de calor deseadas. 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 suministrar el calor necesario.

El procedimiento para calentar una corriente de gas de recirculación puede comprender además una o más etapas. Por ejemplo, la corriente de gas  $G$  puede ser una corriente que sale de una turbina. Como tal, la presión  $P_1$  de la corriente de gas  $G$  puede ser menor que una presión  $P_0$  anterior de la corriente 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 % de la misma). En algunas realizaciones, la corriente  $G_C$  de gas de recirculación se puede someter a una etapa 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, la corriente  $G_C$  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, la corriente de gas de recirculación  $G_C$  se puede calentar y a continuación pasar a través de una turbina para su expansión y producción de energía. La corriente que sale de la turbina puede a continuación caracterizarse de nuevo como una corriente de gas  $G$ .

Muchas modificaciones y otras realizaciones de la materia objeto actualmente descrita vendrán a la mente de un experto en la materia a la que pertenece esta materia objeto que tiene el beneficio de las enseñanzas presentadas en las descripciones anteriores y los dibujos asociados. Por lo tanto, debe entenderse que la presente descripción no debe limitarse a las realizaciones específicas descritas en esta invención y que se pretende incluir modificaciones y otras realizaciones dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas. Aunque en esta invención se emplean términos específicos, se utilizan solo en un sentido genérico y descriptivo y no con fines de limitación.

## REIVINDICACIONES

1. Un sistema de generación de energía que comprende:

una cámara de combustión (30) configurada para evacuar una corriente de combustión;

una turbina de producción de energía (31) configurada para recibir y expandir la corriente de combustión y formar una corriente de escape de la turbina;

un primer compresor (21; 22) configurado para recibir una parte de la corriente de escape de la turbina y formar una corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje comprimida;

un intercambiador de calor de recuperación configurado para recibir la corriente de escape de la turbina y la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje comprimida de modo que la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje comprimida se caliente con el calor extraído de la corriente de escape de la turbina;

una primera fuente de calentamiento aditivo dispuesta para proporcionar calentamiento para la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje comprimida además del calor extraído de la corriente de escape de la turbina, comprendiendo la primera fuente de calor aditivo un segundo compresor (28) configurado para recibir y comprimir una parte de la corriente de escape de la turbina y formar una corriente comprimida y calentada para su paso al intercambiador de calor de recuperación;

una bomba (25) configurada para recibir la corriente del primer compresor y la corriente del segundo compresor y presurizar las corrientes en combinación, la bomba (25) colocada aguas abajo del primer compresor (21; 22) y del segundo compresor (28); y

al menos una segunda fuente de calentamiento aditivo dispuesta para calentar la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje comprimida además del calor extraído de la corriente de escape de la turbina.

2. El sistema de generación de energía según la reivindicación 1, que comprende además un separador de flujo configurado para separar la corriente de escape de la turbina en una primera corriente dispuesta para el paso al primer compresor (21; 22) y una segunda corriente dispuesta para el paso al segundo compresor (28).

3. El sistema de generación de energía según la reivindicación 1, donde el intercambiador de calor de recuperación está configurado con una primera trayectoria de flujo para el paso de la corriente de escape de la turbina, una segunda trayectoria de flujo para el paso de la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje comprimida, una tercera trayectoria de flujo para el paso de una corriente desde la primera fuente de calor aditivo y una trayectoria de flujo adicional para el paso de una corriente desde la al menos una segunda fuente de calor aditivo, donde la primera trayectoria de flujo, la tercera trayectoria de flujo y la trayectoria de flujo adicional están configuradas para calentar la segunda trayectoria de flujo.

4. El sistema de generación de energía según la reivindicación 1, en donde el intercambiador de calor de recuperación comprende una serie de tres o más intercambiadores de calor (29; 27; 26) o una serie de tres o más secciones de calentamiento.

5. El sistema de generación de energía según la reivindicación 1, que comprende además uno o más separadores (53; 67) configurados para separar al menos el agua de la corriente de escape de la turbina.

6. El sistema de generación de energía según la reivindicación 1, en donde el primer compresor (21; 22) comprende un compresor de enfriamiento intermedio de múltiples etapas.

7. El sistema de generación de energía según la reivindicación 1, donde el segundo compresor (28) comprende un compresor adiabático de múltiples etapas sin enfriamiento intermedio entre las etapas del compresor.

8. El sistema de generación de energía según la reivindicación 1, donde la al menos una segunda fuente de calentamiento aditivo comprende una planta de separación de aire configurada para una compresión adiabática.

9. El sistema de generación de energía según la reivindicación 1, donde la al menos una segunda fuente de calentamiento aditiva comprende una turbina de gas.

10. El sistema de generación de energía según la reivindicación 1, donde la al menos una segunda fuente de calentamiento aditivo comprende una corriente de CO<sub>2</sub> calentada a partir de una fuente que es externa al sistema de generación de energía; preferiblemente donde la fuente externa al sistema de generación de energía es una fuente de CO<sub>2</sub> geológico o una tubería de CO<sub>2</sub>.

11. Un procedimiento de generación de energía, comprendiendo el procedimiento:

quemar un combustible con oxígeno en una cámara de combustión (30) en presencia de una corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje para producir una corriente de combustión que contiene CO<sub>2</sub>;

hacer pasar la corriente de combustión que contiene CO<sub>2</sub> a través de una turbina (31) para expandir la corriente

de combustión que contiene CO<sub>2</sub>, generar energía y formar una corriente de escape de la turbina;

hacer pasar la corriente de escape de la turbina a través de un intercambiador de calor de recuperación para extraer calor de la corriente de escape de la turbina;

5 comprimir una parte de la corriente de escape de la turbina en un primer compresor (21; 22) y formar una corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje comprimida;

hacer pasar la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje comprimida a través del intercambiador de calor de recuperación de modo que la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje comprimida se caliente con el calor extraído de la corriente de escape de la turbina;

10 hacer pasar una corriente de una primera fuente de calor aditivo a través del intercambiador de calor de recuperación de modo que la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje comprimida se caliente por la corriente de la primera fuente de calor aditivo, comprendiendo la primera fuente de calor aditivo un segundo compresor (28) configurado para recibir y comprimir una parte de la corriente de escape de la turbina; y

15 hacer pasar una corriente de una segunda fuente de calor aditivo a través del intercambiador de calor de recuperación de modo que la corriente de CO<sub>2</sub> de reciclaje comprimida se caliente por la corriente a partir de la segunda fuente de calor aditivo en combinación con la primera fuente de calor aditivo.

12. El procedimiento según la reivindicación 11, que comprende además dividir la corriente de escape de la turbina para formar una primera parte de escape de la turbina para la compresión en el primer compresor (21; 22) y una segunda parte de escape de la turbina para la compresión en el segundo compresor (28).

20 13. El procedimiento según la reivindicación 12, donde una relación de masa de la primera parte de escape de la turbina a la segunda parte de escape de la turbina según la masa total de la corriente de escape de la turbina es de aproximadamente 50:50 a aproximadamente 99:1.

14. El procedimiento según la reivindicación 11, donde se aplican una o más de las siguientes condiciones:

25 la corriente de combustión que contiene CO<sub>2</sub> tiene una temperatura de aproximadamente 500 °C a aproximadamente 1700 °C y una presión de aproximadamente 100 bar (10 MPa) a aproximadamente 500 bar (50 MPa);

una relación de presión a través de la turbina (31) es de aproximadamente 5 a aproximadamente 12;

el calor se extrae de la corriente de escape de la turbina en un intercambiador de calor de recuperación

que comprende tres o más secciones (29; 27; 26) o que comprende tres o más intercambiadores de calor individuales.

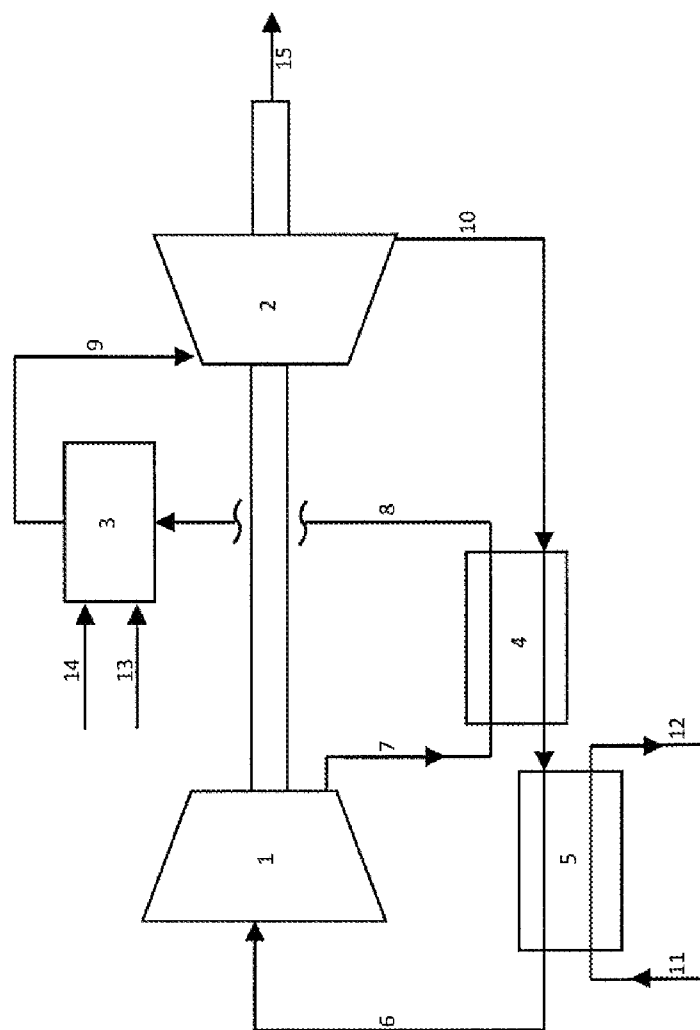


FIG. 1

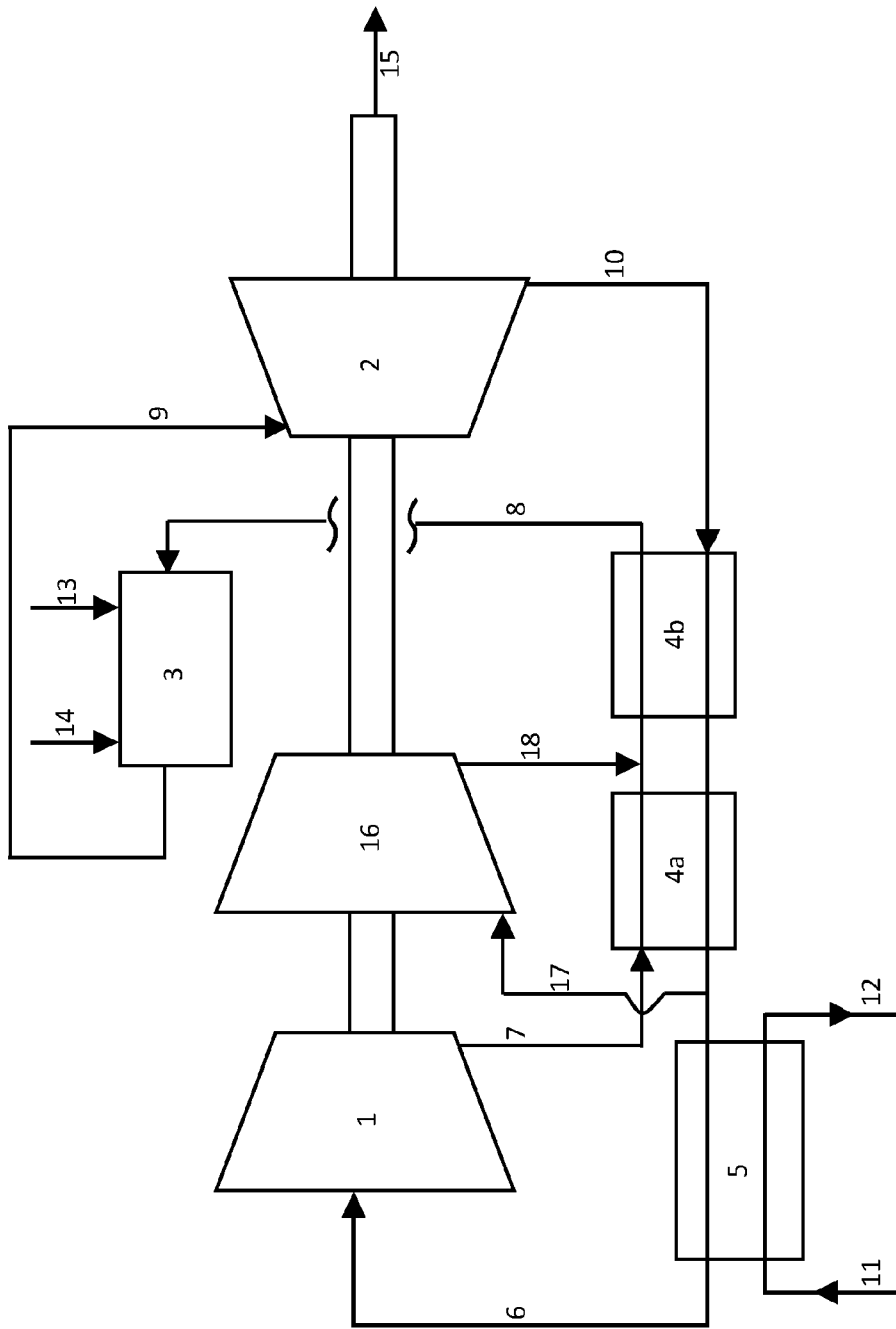


FIG. 2

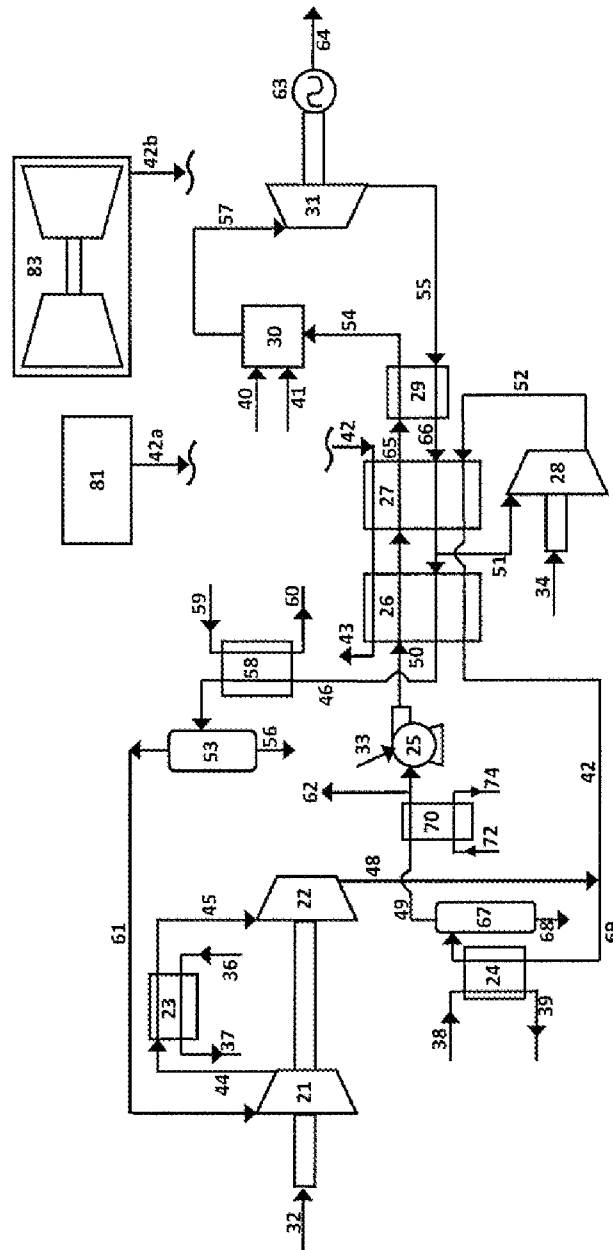


FIG. 3