

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 708 352**

51 Int. Cl.:

**F02C 1/06** (2006.01)

**F02C 3/34** (2006.01)

**F02C 6/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **13.03.2014 PCT/US2014/026181**

87 Fecha y número de publicación internacional: **25.09.2014 WO14151656**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.03.2014 E 14720795 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.10.2018 EP 2971647**

54 Título: **Sistema y método para generación de energía de alta eficiencia utilizando un fluido de trabajo de circulación de dióxido de carbono**

30 Prioridad:

**15.03.2013 US 201313843313**

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

**09.04.2019**

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;  
PALMER, MILES R. ;  
BROWN, JR., GLENN WILLIAM;  
FETVEDT, JEREMY ERON y  
FORREST, BROCK ALAN**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

ES 2 708 352 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**

Sistema y método para generación de energía de alta eficiencia utilizando un fluido de trabajo de circulación de dióxido de carbono

5

**CAMPO DE LA INVENCION**

La presente invención se refiere a sistemas y métodos para la generación de energía, tal como electricidad, a través del uso de un fluido circulante para la transferencia de energía generada a través de la combustión de alta eficiencia de un combustible. En particular, el sistema y el método pueden utilizar dióxido de carbono como el fluido circulante.

10

**ANTECEDENTES DE LA INVENCION**

Se estima que los combustibles fósiles continuarán proporcionando el grueso de los requerimientos de energía eléctrica mundial durante los próximos 100 años, mientras se desarrollan y despliegan fuentes de energía no-carbón. Los métodos conocidos de generación de potencia a través de la combustión de combustibles fósiles y/o biomasa adecuada, sin embargo, están afectados por los costes crecientes de la energía y por una producción creciente de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otras emisiones. El calentamiento global se considera de manera creciente como una consecuencia potencialmente catastrófica de las crecientes emisiones de carbono por las naciones desarrolladas y en vías de desarrollo. La energía solar y eólica no parecen capaces de sustituir la combustión de combustibles fósiles a corto plazo, y la energía nuclear tiene peligros asociados tanto con la proliferación como también con el desecho de los residuos nucleares.

15

20

25

30

Los medios convencionales de producción de potencia a partir de combustibles fósiles o biomasa adecuada son cargados ahora de manera creciente con un requerimiento de captura de CO<sub>2</sub> a alta presión para suministro a sitios de recolección. Sin embargo, se ha probado que este requerimiento es difícil de cumplir, puesto que la tecnología actual sólo proporciona eficiencias térmicas muy bajas incluso para los mejores diseños de captura de CO<sub>2</sub>. Además, los costes de capital para conseguir la captura de CO<sub>2</sub> son altos y esto da como resultado unos costes de la electricidad significativamente más altos comparados con los sistemas que emiten CO<sub>2</sub> a la atmósfera. De acuerdo con ello, existe una necesidad cada vez creciente en la técnica de sistemas y métodos para la generación de energía de alta eficiencia que permitan una reducción de la emisión de CO<sub>2</sub> y/o una facilidad mejorada de recolección de CO<sub>2</sub> producido.

35

40

El documento U.S. 4.498.289 describe un sistema de energía de combustión directa que genera y emplea un gas de combustión que incluye dióxido de carbono o un fluido de trabajo que incluye una cámara de combustión para quemar una mezcla que incluye oxígeno combustible carbonoso y fluido de trabajo de dióxido de carbono a una primera presión por encima de 1100 PSI, proporcionando de esta manera un gas de combustión que incluye dióxido de carbono y agua sustancialmente a la primera presión y por encima de 31 °C. El documento WO 2004/044388 describe un sistema de generación de energía quemado con oxígeno con una cámara de combustión a alta presión que tiene un subconjunto de control de la temperatura de reciclaje del agua y una cámara de combustión de presión intermedia que tiene un subconjunto de control de la temperatura de reciclaje de CO<sub>2</sub>.

**SUMARIO DE LA INVENCION**

La presente invención proporciona un método de generación de energía de acuerdo con la reivindicación 1 y un sistema de generación de energía de acuerdo con la reivindicación 10.

45

En ciertos aspectos, la invención proporciona sistemas de producción de energía que pueden producir energía a alta eficiencia con bajo coste de capital y también puede producir CO<sub>2</sub> sustancialmente puro a la presión de tubería para recolección. El CO<sub>2</sub> puede ser reciclado también en el sistema de producción de energía.

50

Los sistemas y métodos de la invención se caracterizan por la capacidad de utilizar una amplia variedad de fuentes de combustible. Por ejemplo, la cámara de combustión de alta eficiencia utilizada de acuerdo con la invención puede utilizar combustibles gaseosos (por ejemplo, gas natural o gases derivados del carbón), líquidos (por ejemplo, hidrocarburos, alquitrán) y sólidos (por ejemplo, carbón, lignito, pet-coque). Incluso podrían utilizarse otros combustibles, como se describen de otra manera aquí.

55

En otros aspectos, los sistemas y métodos de la invención son particularmente útiles por que pueden exceder la mejor eficiencia de las estaciones actuales de energía de combustión de carbón que no proporcionan la captura de CO<sub>2</sub>. Tales estaciones de energía actuales pueden proporcionar, en el mejor de los casos, aproximadamente una eficiencia del 45 % (valor de calentamiento inferior, o "LHV" con presión del condensador de mercurio de 1,7 pulgadas utilizan do un carbón bituminoso. El presente sistema puede exceder tal eficiencia, suministrando al mismo tiempo también CO<sub>2</sub> para recolección o una evacuación a presiones requeridas.

60

Todavía en otros aspectos, la presente invención proporciona la capacidad de reducir el tamaño físico y el coste de capital de un sistema de generación de potencia comparado con tecnologías actuales utilizando un combustible similar. Por lo tanto, los métodos y sistemas de la presente invención pueden reducir en una medida significativa los

costes de construcción asociados con sistemas de producción de energía.

5 Todavía adicionalmente, los métodos y sistemas de la presente invención pueden proporcionar la recuperación virtualmente de 100 % del CO<sub>2</sub> utilizado y/o producido, especialmente CO<sub>2</sub> derivado de carbono presente en el combustible. Particularmente, el CO<sub>2</sub> puede ser proporcionado como un gas seco purificado a presión de tubería. Además, la invención proporciona la capacidad de recuperar separadamente otro combustible e impurezas derivadas de la combustión para otro uso y/o evacuación.

10 En un aspecto particular, la presente invención se refiere a un método de generación de energía que incorpora el uso de un fluido circulante, tal como CO<sub>2</sub>. En formas de realización específicas, el método de generación de energía de acuerdo con la invención puede comprender introducir un combustible que contiene carbono, O<sub>2</sub> y un fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en una cámara de combustión refrigerada por transpiración. Específicamente, el CO<sub>2</sub> puede ser introducido a una presión de al menos aproximadamente 8 MPa (con preferencia al menos aproximadamente 400 °C). El método puede comprender, además, la combustión del combustible para proporcionar una corriente de producto de combustión que comprende CO<sub>2</sub>. Particularmente, la corriente de producto de combustión puede tener una temperatura de al menos aproximadamente 800 °C. Además, el método puede comprender expandir la corriente de producto de combustión a través de una serie de turbinas para generar energía y liberar una corriente de descarga de la turbina que comprende CO<sub>2</sub>. Con preferencia, el producto de combustión es expandido a través de una relación de la presión de al menos aproximadamente 20. En formas de realización específicas. Puede ser deseable que el CO<sub>2</sub> sea introducido en la cámara de combustión a una presión de al menos aproximadamente 10 MPa, una presión de al menos aproximadamente 20 MPa, una temperatura de al menos aproximadamente 400 °C, o una temperatura de al menos aproximadamente 400 °C, o una temperatura de aproximadamente 700 °C. Se describen aquí incluso otros parámetros de procesamiento posibles.

25 En algunas formas de realización, el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> se puede introducir en la cámara de combustión refrigerada por transpiración como una mezcla con o ambos de O<sub>2</sub> y el combustible que contiene carbono. En otras formas de realización, el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> puede ser introducido en la cámara de combustión refrigerada por transpiración como todo o parte de un fluido de refrigeración por transpiración dirigido a través de uno o más pasos de suministro de fluido formados en la cámara de combustión refrigerada por transpiración. En formas de realización específicas, el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> puede ser introducido en la cámara de combustión sólo como el fluido de transpiración.

35 La combustión se puede caracterizar por la temperatura de la combustión actual. Por ejemplo, la combustión se puede realizar a una temperatura de aproximadamente al menos 1.500 °C. En otras formas de realización, la combustión se puede realizar a una temperatura de aproximadamente 1,600 °C a aproximadamente 3.300 °C.

40 La invención se puede caracterizar por la pureza de O<sub>2</sub> en la corriente de O<sub>2</sub>. Por ejemplo, en algunas formas de realización se puede utilizar aire ambiental. Sin embargo, en formas de realización específicas, puede ser beneficioso purificar el contenido de oxígeno. Por ejemplo, el O<sub>2</sub> puede ser proporcionado como una corriente, en la que la concentración molar del O<sub>2</sub> es al menos 85 %. Aquí se describen incluso concentraciones más específicas.

45 En formas de realización específicas, la corriente de producto de combustión puede tener una temperatura de al menos aproximadamente 1.000 °C. Además, la corriente de producto de combustión puede tener una presión de al menos aproximadamente 90 % de la presión del CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión y es al menos aproximadamente 95 % de la presión del CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión.

50 La invención se puede caracterizar por la relación de los materiales específicos introducidos en la cámara de combustión. Por ejemplo, la relación de CO<sub>2</sub> en el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> con respecto al carbono en el combustible introducido en la cámara de combustión, sobre una base molar, puede ser de aproximadamente 10 a aproximadamente 50 y puede ser de aproximadamente 10 a aproximadamente 30. Aquí se proporcionan incluso otras relaciones posibles.

55 La invención se puede caracterizar, además, por que al menos una porción del CO<sub>2</sub> c en la corriente de descarga de la turbina se puede reciclar y reintroducir en la cámara de combustión. Al menos una porción del CO<sub>2</sub> se puede descargar desde el sistema (tal como para recolección u otra evacuación), por ejemplo a través de una tubería.

En formas de realización específicas, el CO<sub>2</sub> en la corriente de descarga de la turbina puede estar en un estado gaseoso. Particularmente, la corriente de descarga de la turbina puede tener una presión inferior o igual a 7 MPa.

60 En otras formas de realización, los métodos de la invención pueden comprender, además, pasar la corriente de descarga de la turbina a través de al menos un intercambiador de calor que refrigera la corriente de descarga de la turbina y proporciona corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> que tiene una temperatura inferior a aproximadamente 200 °C. Esto puede ser útil para proporcionar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en condiciones que pueden facilitar la retirada de uno o más componentes secundarios (es decir, otros componentes

que CO<sub>2</sub>). En formas de realización específicas, esto puede comprender pasar la corriente de descarga de la turbina a través de una serie de al menos dos intercambiadores de calor. Más específicamente, el primer intercambiador de calor en la serie puede recibir la corriente de descarga de la turbina y reducir su temperatura, estando formado el primer intercambiador de calor de una aleación de alta temperatura que resiste una temperatura de al menos

5

Los métodos de la invención pueden comprender también realizar una o más etapas de separación sobre la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> para eliminar uno o más componentes secundarios, que están presentes en la corriente de fluido de circulación además de CO<sub>2</sub>, como se ha indicado más arriba. Específicamente, uno o más componentes secundarios pueden comprender agua.

10

Los métodos de la invención pueden comprender también presurizar una corriente de CO<sub>2</sub>. Por ejemplo, después de la expansión de la corriente de producto de combustión y de la refrigeración de la corriente de descarga de la turbina, puede ser beneficioso presurizar la corriente para reciclarla a la cámara de combustión. Específicamente, los métodos pueden comprender pasar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a través de uno o más compresores (por ejemplo, bombas) para presurizar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a una presión de al menos aproximadamente MPa. Esto puede comprender, además, pasar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a través de una serie de al menos dos compresores para presurizar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub>. En ciertas formas de realización, la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> puede ser presurizada a una presión de al menos aproximadamente 15 MPa. Pueden ser deseables todavía más intervalos de presión, como se describe aquí de otra manera. En otras formas de realización, la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizada puede ser proporcionada en un estado fluido supercrítico. En algunas formas de realización, al menos una porción del CO<sub>2</sub> en la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizada puede ser introducida en una tubería presurizada para recolección (u otra evacuación, como ya se ha indicado anteriormente).

15

20

25

Además de la presurización, los métodos de la invención pueden comprender también calentar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> previamente refrigerada para la introducción de nuevo a la cámara de combustión (es decir, reciclar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub>). En algunas formas de realización, esto puede comprender calentar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizada a una temperatura de al menos aproximadamente 200 °C, al menos aproximadamente 400 °C, o al menos aproximadamente 700 °C. En ciertas formas de realización, la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizada se puede calentar hasta una temperatura que es inferior a la temperatura de la corriente de descarga de la turbina no más de aproximadamente 50 °C. Aquí se proporcionan todavía otros intervalos de temperatura posibles. Específicamente, tal calentamiento puede comprender pasar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizada a través del (los) mismo(s) intercambiador(es) de calor utilizados para refrigerar la corriente de descarga de la turbina. Tal calentamiento puede comprender la entrada de calor desde una fuente externa (es decir, distinta del calor re-capturado desde los intercambiadores de calor). En formas de realización específicas, el calentamiento puede comprender el uso de calor extraído desde una unidad de separación de CO<sub>2</sub>. Con preferencia, este calor adicional es introducido en el extremo frío de la unidad de intercambio de calor (o, cuando se utiliza una serie de intercambiadores de calor, delante del intercambiador de calor en la serie que trabaja sobre el intervalo máximo de temperatura).

30

35

40

En ciertas formas de realización, la invención se puede caracterizar por la naturaleza de la corriente de producto de la combustión, que puede permitir la implementación de múltiples turbinas. Por ejemplo, en algunas formas de realización, la corriente de producto de la combustión puede ser un fluido reductor que comprende uno o más componentes combustibles (por ejemplo, componentes seleccionados del grupo que consta de H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, y sus combinaciones). Esto puede ser controlado por la relación de O<sub>2</sub> a combustible utilizada. En algunas formas de realización, la corriente de producto de la combustión puede contener componentes totalmente oxidados, tales como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, y SO<sub>2</sub>, así como los componentes reducidos listados anteriormente. La composición real conseguida puede depender de la relación de O<sub>2</sub> a combustible utilizado en la alimentación a la cámara de combustión de transpiración. Más específicamente, la turbina utilizada en tales formas de realización puede comprender dos o más unidades, cada una de las cuales tiene una entrada y una salida. En formas de realización específicas, las unidades de turbina pueden ser accionadas de tal manera que la temperatura operativa en la entrada de cada unidad es sustancialmente la misma. Esto puede comprender añadir una cantidad de O<sub>2</sub> a la corriente de fluido en la salida de la primera turbina (o la unidad de turbina precedente donde se utilizan tres o más unidades). La provisión de O<sub>2</sub> puede permitir la combustión de uno o más componentes combustibles descritos anteriormente, que eleva la temperatura de la corriente antes de entrar en la siguiente turbina en la serie. Esto da como resultado la capacidad de incrementar al máximo la energía producida a partir de los gases de la combustión en presencia del fluido de circulación.

45

50

55

En otras formas de realización, la corriente de descarga de la turbina puede ser un fluido oxidante. Por ejemplo, la corriente de descarga de la turbina puede comprender una cantidad excesiva de O<sub>2</sub>.

60

En algunas formas de realización, la invención se puede caracterizar por el estado de las varias corrientes. Por ejemplo, después de la etapa de expansión de la corriente de producto de la combustión a través de la serie de turbinas, la corriente de descarga de la turbina puede estar en un estado gaseoso. Este gas puede ser pasado a

través de de al menos un intercambiador de calor para refrigerar la corriente de descarga de la turbina gaseosa para la separación del O<sub>2</sub> de otros componentes secundarios. Luego al menos una porción del CO<sub>2</sub> separado puede ser presurizada y transformada en un estado de fluido supercrítico y puede ser pasada de nuevo a través del (los) mismo(s) intercambiador(es) de calor para calentar el CO<sub>2</sub> para reciclarlo a la cámara de combustión. En formas de realización específicas, la diferencia de temperatura entre la temperatura de la corriente de descarga de la turbina que entra en el intercambiador de calor (o el primer intercambiador de calor cuando se utiliza una serie) desde la etapa de expansión y la temperatura del CO<sub>2</sub> fluido supercrítico, presurizado caliente que sale del mismo intercambiador de calor para reciclaje a la cámara de combustión puede ser inferior a aproximadamente 50 °C.

Como se ha indicado anteriormente, la corriente de fluido que sale desde la cámara de combustión de combustible puede comprender el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> además de uno u otros más componentes, tales como productos de combustión. En algunas formas de realización, puede ser útil reciclar al menos una porción del CO<sub>2</sub> y reintroducirlo en la cámara de combustión de combustible. Por lo tanto, el fluido de circulación puede ser un fluido reciclado. Naturalmente, se podría utilizar CO<sub>2</sub> de una fuente externa como el fluido de circulación. El escape de la turbina puede ser refrigerado en un intercambiador de calor economizador y el calor extraído puede ser utilizado para calentar el CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión. El escape refrigerado de la turbina que abandona el extremo de baja temperatura del intercambiador de calor puede contener componentes derivados del combustible o del proceso de la combustión, tales como H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, Hg, y HCl. En otras formas de realización, estos componentes pueden ser retirados de la corriente utilizando métodos adecuados. Otros componentes en esta corriente pueden comprender impurezas gaseosas inertes derivadas del combustible u oxidante tales como N<sub>2</sub>, argón (Ar), y O<sub>2</sub> excesivo. Éstos pueden ser retirados por procesos adecuados separados. En otras formas de realización, el escape de la turbina puede estar a una presión que es inferior a la presión de condensación de CO<sub>2</sub> en el escape de la turbina a la temperatura de los medios de refrigeración disponibles, de manera que no se puede formar ninguna fase líquida de CO<sub>2</sub> cuando se refrigera el escape de la turbina, ya que esto permitirá la separación eficiente de agua como líquido desde el CO<sub>2</sub> gaseosos que contendrá la cantidad mínima de vapor de agua para permitir que el agua se condense. En otras formas de realización, el CO<sub>2</sub> purificado puede ser comprimido ahora para producir la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión con al menos una porción del CO<sub>2</sub> en el fluido que representa el carbono oxidado derivado de carbono en la alimentación de combustible a la cámara de combustión, que puede ser introducido en una tubería presurizada para recolección. La capacidad para transferir CO<sub>2</sub> directamente desde el proceso de la combustión a una tubería presurizada con tratamiento adicional o compresión mínimos debido a la alta presión de la corriente de escape de la turbina es una ventaja distintiva sobre los métodos convencionales, en los que el CO<sub>2</sub> es recuperado cerca de la presión atmosférica (es decir, aproximadamente 0,1 MPa) o es emite a la atmósfera. Además, el CO<sub>2</sub> para recolección de acuerdo con la presente invención puede ser transferido de una manera que es más eficiente y económica que la conocida hasta ahora.

El calor específico del fluido de CO<sub>2</sub> reciclado que entra en el intercambiador de calor, de manera ideal por encima de la presión crítica, es alto y se reduce a medida que se eleva la temperatura. Es particularmente beneficioso que al menos una porción del calor en los niveles más bajos de la temperatura se derive desde una fuente externa. Ésta podría ser, por ejemplo, un suministro de vapor a baja presión, que proporcionaría calor en condensación. En otras formas de realización, esta fuente de calor podría derivarse de la operación de los compresores de aire empleados en la planta criogénica de separación de aire que suministra oxidante a la cámara de combustión en el modo adiabático sin refrigeración intermedia y extracción del calor de compresión con una corriente de ciclo cerrado de fluido de transferencia de calor utilizada para proporcionar calor a la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado.

En una forma de realización, un método de generación de potencia de acuerdo con la presente invención puede comprender las siguientes etapas:

- introducir un combustible, O<sub>2</sub> y un fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en una cámara de combustión, siendo introducido el CO<sub>2</sub> a una presión de al menos aproximadamente 8 MPa y una temperatura de al menos aproximadamente 200 °C; quemar el combustible para proporcionar una corriente de producto de la combustión que comprende CO<sub>2</sub>, teniendo una corriente de producto de la combustión una temperatura de al menos aproximadamente 800 °C;
- expandir la corriente de producto de combustión a través de una serie de turbinas para generar energía, teniendo la serie de turbinas una entrada para recibir la corriente de producto y una salida para liberar una corriente de descarga de la turbina que comprende CO<sub>2</sub>, donde el producto de la combustión se expande a través de una relación de la presión de al menos 20;
- extraer calor desde la corriente de descarga de la turbina pasando la corriente de descarga de la turbina a través de una unidad de intercambio de calor para proporcionar una corriente de descarga de la turbina refrigerada;
- mover desde la corriente de descarga de la turbina refrigerada uno o más componentes secundarios que están presentes en la corriente de descarga de la turbina refrigerada además de CO<sub>2</sub> para proporcionar una corriente de descarga de la turbina refrigerada;
- comprimir la corriente de descarga de la turbina refrigerada purificada con un primer compresor a una presión por encima de la presión crítica del CO<sub>2</sub> para proporcionar una corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub>

supercrítico;

refrigerar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> supercrítico a una temperatura, en la que su densidad es al menos aproximadamente 200 kg/m<sup>3</sup>;

5 pasar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> supercrítico de alta densidad a través de un segundo compresor para presurizar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a la presión requerida para la entrada en la cámara de combustión; pasar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> supercrítico de alta presión, de alta densidad a través de la misma unidad de intercambio de calor, de tal manera que el calor extraído es utilizado para incrementar la temperatura del fluido de circulación de CO<sub>2</sub>;

10 suministrar la cantidad adicional de calor al fluido de circulación de CO<sub>2</sub> supercrítico de alta presión, de alta densidad para que la diferencia entre la temperatura del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> que sale desde la unidad de intercambio de calor para reciclado a la cámara de combustión y la temperatura de la corriente de descarga de la turbina sea inferior a aproximadamente 50 °C; y reciclar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> supercrítico de alta densidad a la cámara de combustión.

15 En formas de realización particulares, los métodos y sistemas pueden ser particularmente útiles para combinación con sistemas y métodos de energía existentes (por ejemplo, estaciones de energía quemadas con carbón de convención, reactores nucleares, y otros sistemas y métodos que pueden utilizar sistemas de calderas convencionales). Por lo tanto, en algunas formas de realización, entre la etapa de expansión y la etapa de extracción descritas anteriormente, los métodos de la invención pueden comprender pasar la corriente de descarga de la turbina a través a través de una segunda unidad de intercambio de calor. Tal segunda unidad de intercambio de calor puede utilizar calor de la corriente de descarga de la turbina para calentar una o más corrientes derivadas de un sistema de energía de vapor (por ejemplo, un sistema de caldera convencional, que incluye estaciones de energía quemadas con carbón y reactor nuclear). Las corrientes de vapor calentadas de esta manera pueden ser pasadas entonces a través de una o más turbinas para generar energía. Las corrientes que salen de las turbinas pueden ser procesadas mediante reciclado a través de los componentes del sistema de energía convencional (por ejemplo, la caldera).

En otras formas de realización, el método de la invención se puede caracterizar por uno o más de los siguientes:

30 refrigerar la corriente de descarga de la turbina a una temperatura por debajo de su punto de rocío del agua; además refrigerar la corriente de descarga de la turbina contra un medio de refrigeración a temperatura ambiente; condensar agua junto con uno o más componentes secundarios para formar una solución que comprende uno o más de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, HCl, y mercurio;

35 presurizar la corriente de descarga de la turbina refrigerada a una presión inferior a 15 MPa; extraer una corriente de producto de CO<sub>2</sub> a partir de la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> supercrítico de alta presión, de alta densidad antes de pasar a través de la unidad de intercambio de calor; utilizar como el combustible una corriente de productos de combustión parcial; quemar el combustible que contiene carbono con CO<sub>2</sub> en presencia de fluido de circulación de CO<sub>2</sub>, siendo proporcionados el combustible que contiene carbono, O<sub>2</sub>, y el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en relaciones tales que el combustible que contiene carbono se oxida sólo parcialmente para producir la corriente de producto de la combustión oxidado parcialmente que comprende un componente incombustible, CO<sub>2</sub> y uno o más de H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, y NH<sub>3</sub>;

40 proporcionar el combustible que contiene carbono, O<sub>2</sub>, y el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en relaciones tales que la temperatura de la corriente de producto de la combustión parcialmente oxidado es suficientemente baja para que todo el componente combustible en la corriente esté en la forma de partículas sólidas; pasar la corriente de producto de la combustión parcialmente oxidado a través de uno o más filtros; utilizar el filtro para reducir la cantidad residual de componente incombustible por debajo de 2 mg/m<sup>3</sup> del producto de la combustión parcialmente oxidado;

50 utilizar carbón, lignito, o coque de petróleo como el combustible; proporcionar un combustible en partículas como una suspensión con CO<sub>2</sub>.

En otras formas de realización, la invención se puede describir con relación a un método de generación de potencia, que comprende las siguientes etapas:

55 introducir combustible que contiene carbono, O<sub>2</sub>, y el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en una cámara de combustión refrigerada por transpiración, siendo introducido el CO<sub>2</sub> a una presión de al menos aproximadamente 8 MPa y a una temperatura de al menos aproximadamente 200 °C; quemar el combustible para proporcionar una corriente de producto de combustión que comprende CO<sub>2</sub>, teniendo la corriente de producto de combustión una temperatura de al menos aproximadamente 800 °C;

60 expandir la corriente de producto de la combustión a través de una serie de turbinas para generar energía, teniendo la serie de turbinas una entrada para recibir la corriente de producto de la combustión y una salida para liberar una corriente de descarga de la turbina que comprende CO<sub>2</sub>, en la que la corriente de producto de la combustión se expande a través de una relación de la presión de al menos aproximadamente 20;

pasar la corriente de descarga de la turbina a través de una serie de al menos dos intercambiadores de calor que extraen calor desde la corriente de descarga de la turbina y proporcionan la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub>;

5 retirar de la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> uno o más componentes secundarios que están presentes en la corriente de fluido de circulación además de CO<sub>2</sub>;

pasar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a través de una serie de al menos dos compresores que incrementa la presión del fluido de circulación de hasta al menos aproximadamente 8 MPa y transforma el CO<sub>2</sub> en el fluido de circulación desde un estado gaseoso hasta un estado de fluido supercrítico; y

10 pasar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a través de la misma serie de al menos dos intercambiadores de calor que utiliza el calor extraído para incrementar la temperatura del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> hasta al menos aproximadamente 200 °C (u, opcionalmente, hasta una temperatura que es inferior a la temperatura de la corriente de descarga de la turbina en no más de 50 °C). Esto específicamente puede comprender la introducción de calor adicional desde una fuente de calor externa (es decir, una fuente de calor no derivada directamente desde el paso de la corriente de descarga de la turbina a través de intercambiador(es) de calor.

15 En otras formas de realización, la invención se puede caracterizar por que se proporciona un método de alta eficiencia de generación de energía a partir de la combustión de un combustible que contiene carbono sin liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Específicamente, el método puede comprender las siguientes etapas:

20 introducir el combustible que contiene carbono, O<sub>2</sub> y fluido circulante de CO<sub>2</sub> reciclado a una cámara de combustión refrigerada por transpiración en una relación estequiométrica definida, siendo introducido el CO<sub>2</sub> a una presión de al menos aproximadamente 8 MPa y una temperatura de al menos aproximadamente 200 °C; quemar el combustible para proporcionar una corriente de producto de combustión que comprende CO<sub>2</sub>, teniendo la corriente de producto de combustión una temperatura de al menos aproximadamente 800 °C;

25 expandir la corriente de producto de combustión a través de una serie de turbinas para generar energía, teniendo la serie de turbinas una entrada para recibir la corriente de producto de combustión y una salida para liberar la corriente de producto de combustión que comprende CO<sub>2</sub>, en el que la corriente de producto de combustión se expande a través de una relación de la presión de al menos aproximadamente 20;

30 pasar la corriente de descarga de la turbina a través de una serie de al menos dos intercambiadores de calor que extraen calor desde la corriente de descarga de la turbina y proporcionan la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub>;

pasar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a través de una serie de al menos dos compresores que incrementa la presión del fluido de circulación de hasta al menos aproximadamente 8 MPa y transforma el CO<sub>2</sub> en el fluido de circulación desde un estado gaseoso hasta un estado de fluido supercrítico; y

35 pasar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a través de una unidad de separación, en la que la cantidad requerida estequiométricamente de CO<sub>2</sub> es reciclada y dirigida a la cámara de combustión y cualquier excede de CO<sub>2</sub> es extraído sin liberación a la atmósfera; y

40 pasar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado a través de la misma serie de al menos dos intercambiadores de calor que utiliza el calor extraído para incrementar la temperatura del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> hasta al menos aproximadamente 200 °C antes de la introducción en la cámara de combustión (u opcionalmente, hasta una temperatura que es inferior a la temperatura de la corriente de descarga de la turbina en no más de 50 °C);

45 en el que la eficiencia de la combustión es mayor que 50 %, siendo calculada dicha eficiencia como la relación de la energía neta generada en relación a la energía térmica de valor de calefacción total inferior para que el combustible que contiene carbono genera la energía.

50 En otro aspecto, la invención se puede describir en el sentido de que proporciona un sistema de generación de energía. Específicamente, un sistema de generación de energía de acuerdo con la invención puede comprender una cámara de combustión refrigerada por transpiración, una serie de turbinas de producción de energía, al menos un intercambiador de calor, y al menos un compresor.

55 En formas de realización específicas, la cámara de combustión refrigerada por transpiración puede tener al menos una entrada para recibir un combustible que contiene carbono, O<sub>2</sub> y una corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub>. La cámara de combustión puede tener, además, al menos una fase de combustión que quema el combustible en presencia de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> y proporciona una corriente de producto de combustión que comprende CO<sub>2</sub> a una presión definida (por ejemplo, al menos aproximadamente 8 MPa) y una temperatura (por ejemplo, al menos aproximadamente 800 °C).

60 La serie de turbinas de producción de energía puede estar en comunicación de fluido con la cámara de combustión y puede tener una entrada para recibir la corriente de producto de combustión y una salida para la liberación de una corriente de descarga de la turbina que comprende CO<sub>2</sub>. La serie de turbinas puede estar adaptada para expandir la corriente de producto de combustión a través de una relación de la presión de al menos aproximadamente 20.

El al menos un intercambiador de calor puede estar en comunicación de fluido con la turbina para recibir la corriente

de descarga de la turbina. El (los) intercambiador(es) de calor puede(n) transferir calor desde la corriente de descarga de la turbina hasta la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub>.

5 El al menos un compresor puede estar en comunicación de fluido con el al menos un intercambiador de calor. El (los) compresor(es) puede(n) estar adaptado(s) para presurizar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> hasta una presión deseada.

10 Además de lo anterior, el sistema de generación de energía de acuerdo con la invención puede comprender uno o más dispositivos de separación posicionados entre el al menos un intercambiador de calor y el al menos un compresor. Tal(es) dispositivo(s) de separación puede(n) ser útil(es) para la retirada de uno o más componentes secundarios presentes en el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> además de CO<sub>2</sub>.

15 Todavía adicionalmente, el sistema de generación de energía puede comprender una unidad de separación de O<sub>2</sub> que incluye uno o más componentes que generan calor. De esta manera, el sistema de generación de energía puede comprender uno o más componentes de transferencia de calor que transfieren calor desde la unidad de separación de O<sub>2</sub> al fluido de circulación de CO<sub>2</sub> curso arriba desde la cámara de combustión. Opcionalmente, el sistema de generación de energía puede comprender una fuente de calor externa. Éste podría ser, por ejemplo, un suministro de vapor a baja presión que podría proporcionar calor en condensación. El sistema de generación de energía podría incluir de esta manera uno o más componentes de transferencia de calor que transfieren calor desde el vapor hasta el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> curso arriba desde la cámara de combustión.

En otras formas de realización, un sistema de generación de energía puede incluir uno o más de los siguientes:

- 25 un primer compresor adaptado para comprimir la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> hasta una presión que está por encima de la presión crítica de CO<sub>2</sub>;
- un segundo compresor adaptado para comprimir la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> hasta una presión requerida para la entrada en la cámara de combustión;
- un dispositivo de refrigeración adaptado para refrigerar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> hasta una temperatura en la que su densidad es mayor que aproximadamente 200 kg/m<sup>3</sup>;
- 30 uno o más componentes de transferencia de calor que transfieren calor desde una fuente externa hasta la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> curso arriba desde la cámara de combustión y curso abajo desde la segunda cámara de combustión;
- una segunda cámara de combustión localizada curso arriba desde y en comunicación de fluido con la cámara de combustión refrigerada por transpiración;
- 35 uno o más filtros o dispositivos de separación localizados entre la segunda cámara de combustión y la cámara de combustión refrigerada por transpiración;
- un dispositivo de mezcla para formar una suspensión de un material combustible en partículas con un medio de fluidización;
- un dispositivo de trituración para la división en partículas de un combustible sólido.

40 En otras formas de realización, la presente invención puede proporcionar un sistema de generación de energía, que puede comprender lo siguiente: uno o más inyectores para proporcionar combustible, un fluido de circulación de CO<sub>2</sub>, y un oxidante; una cámara de combustión refrigerada por transpiración que tiene al menos una etapa de combustión que quema el combustible y proporciona una corriente de fluido de escape a una temperatura de al menos aproximadamente 800 °C y una presión de al menos aproximadamente 4 MPa (con preferencia a al menos aproximadamente 8 MPa); una serie de turbinas de producción de energía que tienen una entrada y una salida y en las que se produce energía a medida que la corriente de fluido de expande, estando diseñada la turbina para expandir la corriente de fluido a través de una relación de la presión de al menos aproximadamente 20; un intercambiador de calor para refrigerar la corriente de fluido que sale desde la salida de la turbina y para calentar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub>; y uno o más dispositivos para separar la corriente de fluido que sale desde el intercambiador de calor en CO<sub>2</sub> y uno u otros más componentes para recuperación o desecho.

55 En otras formas de realización, el sistema de generación de energía puede comprender también uno o más dispositivos para suministrar al menos una porción del CO<sub>2</sub> separado desde la corriente de fluido a una tubería presurizada.

60 En formas de realización específicas, un sistema de acuerdo con la invención puede comprender uno o más componentes como se describen aquí, reequipados con un sistema de producción de energía convencional, tal como una estación de energía quemada con carbón, un reactor nuclear, o similar. Por ejemplo, un sistema de energía podría comprender dos unidades de intercambio de calor (por ejemplo, una unidad primaria de intercambio de calor y una unidad secundaria de intercambio de calor). La unidad primaria de intercambio de calor podría ser sustancialmente una unidad como se ha descrito aquí de otra manera, y la unidad secundaria de intercambio de calor podría ser una unidad útil para transferir calor desde el sistema de descarga de la turbina hasta una o más corrientes de vapor (por ejemplo, desde una caldera asociada con el sistema de producción de energía

convencional) para sobrecalentar las corrientes de vapor. Por lo tanto, un sistema de generación de energía de acuerdo con la invención puede comprender una unidad secundaria de intercambio de calor localizada entre y en comunicación de fluido con la turbina y la unidad primaria de intercambio de calor. El sistema de generación de energía puede comprender de la misma manera una caldera en comunicación de fluido con la unidad secundaria de intercambio de calor a través de al menos una corriente de vapor. Todavía adicionalmente, el sistema de generación de energía puede comprender al menos otra turbina de producción de energía que tiene una entrada para recibir la al menos una corriente de vapor desde la unidad secundaria de intercambio de calor. De esta manera, el sistema se puede describir en el sentido de que comprende una turbina primaria de producción de energía y una turbina secundaria de producción de energía. La turbina primaria de producción de energía puede ser la turbina en comunicación de fluido con la cámara de combustión de la invención. La turbina secundaria de producción de energía puede ser la turbina en comunicación de fluido con calor de vapor, en particular una corriente de vapor sobrecalentado que es sobrecalentado con un calor desde la corriente de descarga desde la turbina primaria de producción de energía. Tal sistema reequipado con uno o más componentes de un sistema de producción de energía convencional se describe aquí, en particular con relación a la figura 12 y el ejemplo 2. El uso de los términos turbina primaria de producción de energía y turbina secundaria de producción de energía no debería considerarse como limitación del alcance de la invención y sólo se utilizan para proporcionar claridad en la descripción.

En otro aspecto de la invención, una corriente externa puede calentarse a una temperatura alta al final de intercambiador de calor por transferencia de calor desde la corriente de escape de la turbina de refrigeración y, como resultado, la corriente de reciclaje de alta presión abandonará el intercambiador de calor y entrará en la cámara de combustión a una temperatura más baja. En este caso, la cantidad de combustible quemado en la cámara de combustión se puede incrementar, de manera que se mantiene la temperatura de entrada de la turbina. El valor de calefacción del combustible extra quemado es equivalente a la carga térmica extra impuesta sobre el intercambiador de calor.

En algunas formas de realización, la invención se puede caracterizar por que proporciona una planta de proceso que produce potencia de extracción a partir de la circulación de un fluido de circulación predominantemente de CO<sub>2</sub>. En otras formas de realización, la invención proporciona procesos, en los que se pueden cumplir ciertas condiciones. En formas de realización específicas, la invención se puede caracterizar, además, por una o más de las siguientes acciones o dispositivos útiles para realizar tales acciones:

- comprimir el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> hasta una presión en exceso de la presión crítica de CO<sub>2</sub>;
- quemar directamente un combustible hidrocarburo sólido, líquido o gaseoso en O<sub>2</sub> sustancialmente puro con provisión para mezclar un fluido de reciclaje supercrítico rico en CO<sub>2</sub> para conseguir una temperatura de entrada de la turbina de potencia requerida – por ejemplo, mayor que aproximadamente 500 °C (u otro intervalo de temperatura como se describe aquí);
- expandir una corriente supercrítica formada de productos de la combustión y de fluido rico en CO<sub>2</sub> reciclado en una serie de turbinas con producción de potencia de extracción, en particular expansión hasta una presión que está por encima de aproximadamente 2 MPa y por debajo a la que aparece una fase líquida de CO<sub>2</sub> cuando el fluido es refrigerado a una temperatura consistente con el uso de medios de refrigeración a temperatura ambiente (por ejemplo, aproximadamente 7,3 - 74 MPa);
- introducir un escape de turbina en un intercambiador de calor, en el que el escape de turbina está refrigerado, y el calor es transferido a un fluido supercrítico rico en CO<sub>2</sub> reciclado;
- refrigerar una corriente que contiene CO<sub>2</sub> que abandona un intercambiador de calor contra un medio de refrigeración a temperatura ambiente y separar una fase líquida de agua que contiene al menos concentraciones menores de CO<sub>2</sub> y fase de CO<sub>2</sub> gaseosa que contiene al menos una concentración menor de vapor de agua;
- realizar una separación de agua de tal manera que permita un tiempo de residencia deseado (por ejemplo, hasta 10 segundos) con contacto íntimo entre CO<sub>2</sub> gaseoso y agua líquida o una fase ácida débil, de tal manera que puedan tener lugar reacciones que implican SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, y/o Hg dando como resultado la conversión de más del 98 % de azufre presente en una corriente en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y la conversión de más del 90 % de óxidos de nitrógeno presentes en una corriente en HNO<sub>3</sub>, y para la conversión de más del 80 % de mercurio en una corriente en compuestos de mercurio soluble;
- separar componentes no condensables (tales como N<sub>2</sub>, Ar, y O<sub>2</sub>) a partir de una fase de CO<sub>2</sub> gaseoso por refrigeración a una temperatura próxima al punto de congelación de CO<sub>2</sub> con una separación de fase de gas/líquido que deja los N<sub>2</sub>, Ar, y O<sub>2</sub> predominantemente en la fase de gas;
- comprimir una corriente de CO<sub>2</sub> gaseoso purificado en un compresor de gas a una presión, a la que medios de refrigeración a temperatura ambiente proporcionarán un fluido de CO<sub>2</sub> de alta densidad (por ejemplo, con una densidad de al menos aproximadamente 200 kg/m<sup>3</sup>, con preferencia de al menos aproximadamente 300 kg/m<sup>3</sup>, o más preferido al menos aproximadamente 400 kg/m<sup>3</sup>);
- refrigerar CO<sub>2</sub> comprimido con medios de refrigeración a temperatura ambiente para formar un fluido supercrítico de CO<sub>2</sub> de alta densidad (por ejemplo, con una densidad de al menos aproximadamente 200 kg/m<sup>3</sup>, con preferencia de al menos aproximadamente 300 kg/m<sup>3</sup>, o más preferido al menos aproximadamente 400 kg/m<sup>3</sup>);

comprimir un fluido de CO<sub>2</sub> de alta densidad en un compresor a una presión por encima de la presión crítica de CO<sub>2</sub>;

separar una corriente de CO<sub>2</sub> a alta presión en dos corrientes separadas – una que entra en el extremo frío de un intercambiador de calor y una segunda que se calienta utilizando una fuente de calefacción externa disponible a una temperatura por debajo de aproximadamente 250 °C;

facilitar la transferencia de calor eficiente (incluyendo el uso de una fuente de calor externa opcional), de tal manera que la diferencia entre la temperatura de una corriente de descarga de la turbina que entra en el extremo caliente de un intercambiador de calor y la temperatura de un fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado que abandona el extremo caliente del mismo intercambiador de calor es inferior a aproximadamente 50 °C (u otro umbral de temperatura, como se describe aquí);

comprimir un fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a una presión de aproximadamente 8 MPa a aproximadamente 50 MPa (u otro intervalo de presión, como se describe aquí);

mezclar una corriente de O<sub>2</sub> con al menos una porción de una corriente de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado y una corriente de combustible que contiene carbono para formar una corriente de fluido individual (o una suspensión si se utiliza un combustible sólido en polvo), que está por debajo de la temperatura de auto-ignición del combustible, y cuyas proporciones se ajustan para dar una temperatura de la llama adiabática de aproximadamente 1.200 °C a 3.500 °C (u otro intervalo de temperatura como se describe aquí);

mezclar al menos una porción de un fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado con productos de la combustión para formar una corriente de fluido mixta a una temperatura en el intervalo de aproximadamente 500 °C a 1.600 °C u otro intervalo de temperatura como se describe aquí);

producir una corriente de descarga de la turbina que tiene una presión de aproximadamente 2 MPa a aproximadamente 7,3 MPa (u otro intervalo de temperatura como se describe aquí);

calentar externamente una porción de una corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a alta presión utilizando calor de compresión derivado de la operación de uno o más compresores de aire de una planta de O<sub>2</sub> criogénico (particularmente en un modo adiabático) y/o un compresor de CO<sub>2</sub> (particularmente en el modo adiabático), siendo transferido el calor por circulación de un fluido de transferencia de calor adecuado (incluyendo el propio fluido de CO<sub>2</sub>);

calentar una o más corrientes de fluido externas en un intercambiador de calor con combustible extra equivalente quemado en un quemador, en el que una o más de las corrientes de fluido externas pueden comprender vapor, que puede estar supercalentado en el intercambiador de calor;

utilizar calor suministrado por vapor de condensación proporcionado a partir de una fuente externa para calentar externamente una porción de una corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado;

refrigerar en un intercambiador de calor una corriente que contiene CO<sub>2</sub> (que abandona el extremo frío del intercambiador de calor) para proporcionar calor para calentar una corriente de fluido proporcionada externamente;

proporcionar una corriente de alimentación de CO<sub>2</sub>, en la que la concentración molar del O<sub>2</sub> es al menos aproximadamente 85 % (u otro intervalo de concentración como se describe aquí);

accionar una cámara de combustión de tal manera que la concentración de CO<sub>2</sub> en una corriente de gas total que abandona una cámara de combustión (es decir, una corriente de producto de combustión) y que entra en una turbina es mayor que aproximadamente 0,1 % molar;

realizar un proceso de producción de potencia, de tal manera que se utiliza sólo una cámara de combustión para quemar completamente el combustible que contiene carbono en la cámara de combustión;

accionar una cámara de combustión, de tal manera que la cantidad de O<sub>2</sub> en la corriente de O<sub>2</sub> que entra en la cámara de combustión está por debajo de la cantidad requerida para la combustión estequiométrica de la corriente de combustible que entra en la cámara de combustión y de esta manera causar la producción de uno o de ambos O<sub>2</sub> y monóxido de carbono (CO) en la corriente de producto de la combustión;

y realizar un proceso utilizando dos o más turbinas, cada una de las cuales tiene una presión de salida definida, en el que uno o ambos de H<sub>2</sub> y CO están presentes en la corriente de descarga que abandona la primera turbina (y las turbinas siguientes, si es aplicable, con la excepción de la turbina final en la serie de turbinas) y parte o todos de los H<sub>2</sub> y CO se queman por la adición de una corriente de O<sub>2</sub> delante de la entrada de la segunda y siguientes turbinas para elevar la temperatura de funcionamiento de cada una de la segunda o más turbinas hasta un valor más alto que da como resultado un exceso de O<sub>2</sub> en la corriente de salida desde la última turbina, siendo tal exceso mayor que aproximadamente 0,1 % molar.

En otras formas de realización, la presente invención puede proporcionar uno o más de los siguientes:

calentar un fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en un sistema de intercambio de calor contra la corriente de escape de refrigeración de la turbina, de tal manera que la corriente de escape de la turbina se refrigera a una temperatura por debajo de su punto de rocío del agua;

refrigerar la corriente de escape de la turbina contra un medio de refrigeración a temperatura ambiente y condensar agua junto combustible y perezas derivadas de la combustión que comprenden H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, HCl, y otras impurezas tales como Hg y otros metales en forma de compuestos iónicos en solución;

comprimir el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> purificado a una presión por encima de su presión crítica, pero por debajo de 10 MPa en un primer compresor;

refrigerar el fluido de circulación hasta un punto en el que su densidad es mayor que  $600 \text{ kg/m}^3$ ;  
 comprimir el fluido de circulación de  $\text{CO}_2$  de alta densidad en un compresor a la presión requerida para superar la caída de la presión en el sistema y alimentar el fluido de  $\text{CO}_2$  en circulación a la cámara de combustión;

5 remover la corriente de producto de  $\text{CO}_2$  que contiene sustancialmente todo el  $\text{CO}_2$  formado por combustión de carbono en la corriente de fluido, siendo tomada la corriente de fluido o bien desde el flujo de descarga del primer compresor o del segundo compresor;

10 suministrar una cantidad adicional de calor al fluido de circulación de  $\text{CO}_2$  a un nivel de temperatura que está por encima del punto de rocío del agua de la corriente de escape de la turbina de refrigeración o bien directamente al intercambiador de calor o por calentamiento de una corriente secundaria que comprende parte del fluido de circulación de  $\text{CO}_2$ , de manera que la diferencia de temperatura entre el fluido de circulación de  $\text{CO}_2$  y el escape de la turbina en el extremo caliente del intercambiador de calor es inferior a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

15 utilizar un fluido que comprende un combustible que contiene carbono que tiene un residuo incombustible que se oxida parcialmente con  $\text{O}_2$  en una cámara de combustión refrigerada por transpiración para producir una corriente que comprende  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$  y residuo incombustible, siendo alimentada la cámara de combustión con parte del fluido de  $\text{CO}_2$  en circulación para refrigerar los productos de la combustión parcialmente oxidados a una temperatura de  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , donde la ceniza está presente como partículas sólidas que se pueden retirar completamente desde la corriente de fluido de salida por un sistema de filtración;

20 proporcionar una diferencia de temperatura entre la corriente de escape de la turbina de refrigeración y la corriente de fluido de  $\text{CO}_2$  en circulación de calefacción en el punto en el que el flujo de corriente secundaria se remezcla con el fluido de  $\text{CO}_2$  en circulación calentado por separado que está entre  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

25 proporcionar una presión de la corriente de escape de la turbina que abandona el extremo frío del intercambiador de calor, de tal manera que no se forma ningún  $\text{CO}_2$  líquido cuando esta corriente es refrigerada antes de la separación de agua e impureza;

utilizar al menos parte de la corriente de escape de la turbina para sobrecalentar múltiples corrientes de vapor derivadas de sistemas de potencia de vapor asociados con sistemas de calderas convencionales y reactores nucleares;

30 proporcionar calor de bajo nivel adicional a la corriente de  $\text{CO}_2$  en circulación como vapor a uno o más niveles de la presión tomada desde una fuente de vapor externa, tal como una estación de energía;

utilizar una corriente de escape del dispositivo de expansión que abandona el extremo frío del sistema de intercambio de calor para proporcionar calefacción para al menos parte del condensador que abandona el condensador de vapor del sistema de generación de potencia de vapor;

35 proporcionar calor de bajo nivel adicional para la corriente de  $\text{CO}_2$  en circulación desde el escape caliente hasta una turbina de gas de ciclo abierto;

pasar un gas derivado de carbón parcialmente oxidado más  $\text{CO}_2$  como combustible a una segunda cámara de combustión para combustión completa;

40 accionar una cámara de combustión individual con una relación de  $\text{O}_2$  a combustible, de tal manera que parte del combustible se oxida en productos de oxidación que comprenden  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , y  $\text{SO}_2$  y el resto del combustible se oxida en componentes que comprenden  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ , y  $\text{H}_2\text{S}$ ;

45 accionar dos turbinas que superan la relación de presión total requerida con  $\text{O}_2$  inyectado en el flujo de descarga de la primera turbina para quemar los componentes reducidos para recalentar el flujo de presión inmediato a una temperatura más alta antes de que se expanda a través de la segunda turbina.

Además de las formas de realización anteriores, la presente invención es particularmente útil por que los elementos y las etapas de los sistemas y métodos inventivos descritos aquí se pueden utilizar en una variedad de combinaciones que pueden proporcionar incrementos sorprendentes en eficiencia (por ejemplo, medida sobre una base de valor de calentamiento más bajo (LHV)) y por que se pueden reducir de una manera beneficiosa los costes de capital asociados con sistemas conocidos utilizando fluido de trabajo de  $\text{CO}_2$ , así como proporcionar producción de energía a un coste significativamente reducido por unidad de energía producida. Ciertamente, ejemplos no limitativos de sistemas y métodos de acuerdo con la presente invención que pueden proporcionar tales ventajas incluyen los siguientes.

55 Se utiliza particularmente una pluralidad de turbinas. En un ejemplo de realización específico de las mismas, se pueden utilizar dos turbinas y el sistema se puede adaptar para combustión de combustible oxigenado de un hidrocarburo o combustible carbonoso entre las dos turbinas. Tales formas de realización de turbinas múltiples se pueden utilizar para incrementar la temperatura de entrada de la turbina curso abajo de la cámara de combustión interpuesta. En formas de realización de turbinas múltiples que comprenden dos o más turbinas, se pueden incluir dos o más cámaras de combustión interpuestas. Además, en ciertas formas de realización, el número de turbinas y de cámaras de combustión en un sistema de turbinas múltiples puede ser igual, de tal manera que la combustión se realiza antes de cada expansión de la turbina (por ejemplo, dos etapas de combustión, cada una de las cuales va seguida por la expansión de la turbina). A continuación se describen otras ventajas de las formas de realización de turbinas múltiples con relación a una forma de realización ejemplar de dos turbinas, y se entiende que tal descripción

se puede extender a formas de realización de turbinas múltiples que comprenden tres, cuatro o incluso más turbinas que pueden funcionar en serie o en paralelo y que comprenden sólo combustión interpuesta así como combustión antes de cada expansión de la turbina. En otras formas de realización, se puede utilizar una matriz de turbinas radiales.

5 En algunas formas de realización, la segunda turbina en un sistema de turbinas de dos fases puede tener una presión de descarga próxima a la presión atmosférica. Tal presión de descarga puede proporcionar un producto de CO<sub>2</sub> neto que está probablemente próximo a presión atmosférica. Tal presión de descarga puede ser beneficiosa, por lo tanto, para incrementar al máximo la salida de potencia para un flujo fijo de CO<sub>2</sub> reciclado en el sistema. En particular, esto puede incrementar al máximo la relación de la presión de todo el sistema de turbinas.

10 En algunas formas de realización, la entrada de la segunda turbina se puede definir por el flujo total que tiene la primera turbina. En otras formas de realización, la entrada de la segunda turbina se puede definir al menos en parte por una porción del flujo de des carga de la primera turbina. Como una forma de realización ejemplar, un flujo en la segunda turbina puede contener el producto de CO<sub>2</sub> neto derivado de la combustión del combustible total utilizado en uno o más cámaras de combustión.

15 En algunas formas de realización, la primera turbina puede ser una turbina de alta presión. Como tal, puede ser útil para permitir que la temperatura de la entrada de la turbina a alta presión sea fijada en el valor más alto posible para incrementar al máximo la salida de potencia de la turbina de alta presión, manteniendo al mismo tiempo la temperatura de salida de la segunda turbina a una temperatura constante. Por ejemplo, la temperatura constante se puede fijar por la temperatura operativa máxima de un intercambiador de calor de recuperación a su presión de diseño, y esta presión se puede fijar por una o ambas de la presión de la cámara de combustión de CO<sub>2</sub> reciclado y la presión de entrada de la primera turbina.

20 En algunas formas de realización, la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado se puede calentar hasta una temperatura alta y se puede pasar a través de la primera turbina sin pasar primero a través de una cámara de combustión. El escape desde la primera turbina puede ser entonces la entrada para la cámara de combustión que forma un escape que debe ser la entrada para la segunda cámara de combustión. En particular, la temperatura de entrada para la primera turbina puede tener un límite más bajo que es igual a la temperatura de salida de la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado desde la primera turbina.

25 En algunas formas de realización, el calor excesivo en el flujo de descarga de la segunda turbina por encima del requerido para calentar la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado de alta presión se puede utilizar para precalentar las corrientes de oxígeno y de gas combustible que entran en las cámaras de combustión de primera y segunda fases (o que entran en una sola cámara de combustión en formas de realización en las que una sola cámara de combustión está interpuesta en una turbina de dos fases).

30 En algunas formas de realización, una corriente de oxígeno desde la planta de producción de oxígeno a una presión de 1 bar (0,1 MPa) o más alta se puede mezclar con CO<sub>2</sub> para formar un oxidante diluido para combustión del combustible. En particular, esta corriente de oxidante se puede comprimir y precalentar contra todo o parte del escape desde una o desde ambas de la primera y segunda turbinas y se puede derivar para formar al menos parte del oxidante requerido en la cámara de combustión de primera o segunda fase.

35 En algunas formas de realización, el CO<sub>2</sub> reciclado próximo a presión atmosférica después de la separación del agua líquida puede ser comprimido a una presión por encima de la presión de solidificación de CO<sub>2</sub> en el intervalo desde aproximadamente 6 bares (0,6 MPa) hasta aproximadamente 10 bares (1 MPa) y se puede licuar el CO<sub>2</sub> que puede ser bombeado entonces a la alta presión del sistema de CO<sub>2</sub> reciclado, reduciendo de esta manera el requerimiento de potencia de la bomba del compresor de reciclado. El agente para proporcionar la refrigeración para licuación del CO<sub>2</sub> puede ser, por ejemplo, gas natural licuado (LNG). En particular, LNG que ha sido bombeado a una presión alta para suministro a un sistema de tuberías y se puede calentar desde una temperatura baja hasta una temperatura próxima a temperatura ambiente simultáneamente con refrigeración del CO<sub>2</sub>. Opcionalmente, la segunda turbina puede descargar a una presión de aproximadamente 6 bares (0,6 MPa) hasta aproximadamente 8 bares (0,8 MPa) y de esta manera evitar la necesidad de una cámara de combustión de reciclado de CO<sub>2</sub>.

40 Otras formas de realización están comprendidas por la presente invención como se describe con relación a varias figuras y/o como se describe en la descripción siguiente de la invención proporcionada aquí.

#### BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

45 Habiendo descrito de esta manera la invención en términos generales, ahora se hará referencia a los dibujos que se acompañan, que no están trazados necesariamente a escala y en los que:

La figura 1 es una ilustración esquemática de un aparato de cámara de combustión refrigerada por transpiración.

La figura 2 es una ilustración esquemática de una sección transversal ejemplar de una pared de un miembro de transpiración de un aparato de cámara de combustión.

La figura 3A y la figura 3B ilustran de forma esquemática un proceso de ajuste en caliente para un conjunto de miembro de transpiración de un aparato de cámara de combustión.

5 La figura 4 ilustra de forma esquemática un aparato de eliminación de producto contaminante de la combustión.

La figura 5 es un diagrama de flujo que ilustra un ciclo de potencia.

La figura 6 es un diagrama de flujo que ilustra el flujo de un fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a través de una unidad de separación.

10 La figura 7 muestra un diagrama de flujo que ilustra la presurización utilizando una serie de dos o más compresores o bombas en una unidad de presurización.

La figura 8 es un diagrama de flujo que ilustra una unidad de intercambio de calor, en la que se utilizan tres intercambiadores de calor individuales en serie.

15 La figura 9 es un diagrama de flujo que ilustra una unidad de turbina que utiliza dos turbinas accionadas en serie en un modo de reducción.

La figura 10 es un diagrama de flujo que ilustra un sistema y método para la producción de energía utilizando dos cámaras de combustión.

La figura 11 es un diagrama de flujo que ilustra un sistema y método para la producción de energía.

20 La figura 12 es un diagrama de flujo que ilustra un sistema y método para la producción de energía que incorpora una caldera quemada con carbón convencional; y

La figura 13 es un diagrama de flujo que ilustra un sistema y método para la producción de energía que incluye dos turbinas que funcionan en serie con dos cámaras de combustión.

#### DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

25 La presente invención se refiere a métodos de generación de energía. Tales métodos pueden comprender; expandir una corriente de CO<sub>2</sub> reciclado comprimido a una presión de al menos aproximadamente 12 MPa a través de una serie de una primera turbina y una última turbina sobre una relación de la presión de al menos aproximadamente 20 para emitir desde la última turbina una corriente de descarga de la última turbina que está opcionalmente a una presión inferior a 0,15 MPa; calentar una corriente de descarga desde la primera turbina antes de pasar a la última turbina en una cámara de combustión mediante la combustión de un hidrocarburo o combustible carbonoso en presencia de un oxidante y la corriente de descarga de la primera turbina para formar una corriente de escape de la cámara de combustión en un intercambiador de calor de recuperador; aislar al menos una porción del CO<sub>2</sub> desde la corriente de descarga de la turbina refrigerada para formar la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado; comprimir la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado; y pasar la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado a la serie de turbinas. La presente descripción se refiere también a sistemas de generación de energía. Tales sistemas pueden comprender: una primera turbina y una segunda turbina en serie que están adaptadas para expandir una corriente de CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión entre una presión alta de aproximadamente 10 MPa hasta aproximadamente 60 MPa sobre una relación de presión que es mayor que 20; una cámara de combustión en una disposición de trabajo con una salida de la primera turbina y una entrada de la segunda turbina y adaptada para calentar la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión; un intercambiador de calor de recuperación en una disposición de trabajo con una salida de la segunda turbina y adaptada para transferir calor entre una corriente de descarga desde la salida de la segunda turbina y la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión; y al menos un compresor en una disposición de trabajo con el intercambiador de calor de recuperación y adaptado para presurizar la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado a una presión de al menos aproximadamente 10 MPa; en el que el intercambiador de calor de recuperador está en una disposición de trabajo con la primera turbina, de tal manera que la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado comprimido caliente pasa a la primera turbina.

50 La invención se describe con más detalle a continuación con referencia a varias formas de realización. Estas formas de realización están previstas para que esta descripción sea minuciosa y completa, y transferirá todo el alcance de la invención a los expertos en la técnica; no obstante, se entiende que las formas de realización que no incluyen una pluralidad de turbinas y/ no expanden una corriente que comprende CO<sub>2</sub> reciclado a través de la relación de la presión de al menos aproximadamente 20 no forman parte de la presente invención, sino que representan técnica anterior que es útil para la comprensión de la invención. Cuando se utiliza en la memoria descriptiva y en las reivindicaciones anexas, las formas singulares "uno", "una", "el", incluyen referentes plurales, a no ser que el contexto dicte claramente otra cosa.

55 La presente invención proporciona sistemas y métodos para producir energía a través del uso de una cámara de combustión de combustible de alta eficiencia (tal como una cámara de combustión refrigerada por transpiración y un fluido de circulación asociado (tal como un fluido de circulación de CO<sub>2</sub>). El fluido de circulación está previsto en la cámara de combustión junto con un combustible apropiado, cualquier oxidante necesario, y cualquiera de los materiales asociados que pueden ser útiles para combustión eficiente. En formas de realización específicas, los métodos se pueden realizar utilizando una cámara de combustión que opera a temperaturas muy altas (por ejemplo, en el intervalo desde aproximadamente 1.600 °C hasta aproximadamente 3.300 °C u otros intervalos de temperaturas, como se describen aquí), y la presencia del fluido circulante puede funcionar para moderar la temperatura de una corriente de fluido que sale desde la cámara de combustión, de manera que la corriente de

fluido se puede utilizar en transferencia de energía para la producción de potencia. Específicamente, una corriente de producto de la combustión se puede expandir a través de una serie de turbinas para generar potencia. La corriente de gas expandido se puede refrigerar para eliminar varios componentes de la corriente, tal como agua, y el calor extraído desde la corriente de gas expandido se puede utilizar para calentar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub>. La corriente de fluido de circulación purificado se puede presurizar entonces y calentar para reciclaje a través de la cámara de combustión. Si se desea, parte del CO<sub>2</sub> de la corriente de producto de la combustión (es decir, que procede del CO<sub>2</sub> formado por combustión de combustible que contiene carbono en presencia de oxígeno) se puede extraer para retención u otra disposición, tal como transferencia a una tubería de CO<sub>2</sub>. El sistema y métodos pueden hacer uso de parámetros y componentes específicos del proceso para incrementar al máximo la eficiencia del sistema y método, particularmente evitando al mismo tiempo la liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Como se describe aquí en particular, el fluido circulante está ejemplificado por el uso de CO<sub>2</sub> como el fluido circulante. Aunque el uso de un fluido circulante de CO<sub>2</sub> es una forma de realización ventajosa de acuerdo con la invención, tal descripción no debería interpretarse como limitación necesaria del alcance del fluido circulante que se puede utilizar en la invención, si no se indica otra cosa.

En ciertas formas de realización, un sistema de generación de potencia de acuerdo con la invención puede utilizar un fluido circulante que comprende en una medida predominante CO<sub>2</sub>. En otras palabras, la naturaleza química del fluido circulante inmediatamente antes de la entrada en la cámara de combustión es tal que el fluido circulante comprende predominantemente CO<sub>2</sub>. En este sentido, la palabra "predominantemente" puede significar que el fluido comprende al menos aproximadamente 90 % en concentración molar, al menos aproximadamente 91 % en concentración molar, al menos aproximadamente 92 % en concentración molar, al menos aproximadamente 93 % en concentración molar, al menos aproximadamente 94 % en concentración molar, al menos aproximadamente 95 % en concentración molar, al menos aproximadamente 96 % en concentración molar, al menos aproximadamente 97 % en concentración molar, al menos aproximadamente 98 % en concentración molar, al menos aproximadamente 99 % en concentración molar de CO<sub>2</sub>. El fluido en circulación inmediatamente antes de entrar en la cámara de combustión comprende con preferencia sustancialmente sólo CO<sub>2</sub>. En este sentido, la frase "sustancialmente sólo" puede significar al menos aproximadamente 99,1 % en concentración molar, al menos aproximadamente 99,5 % en concentración molar, al menos aproximadamente 99,75 % en concentración molar, al menos aproximadamente 99,80 % en concentración molar, al menos aproximadamente 99,9 % en concentración molar de CO<sub>2</sub>. En la cámara de combustión, el CO<sub>2</sub> puede mezclarse con uno o más componentes adicionales, que se pueden derivar del combustible, cualquier oxidante, y cualquier derivado de la combustión del combustible. Por lo tanto, el fluido circulante que sale desde la cámara de combustión, que se puede describir aquí como una corriente de producto de la combustión, puede comprender CO<sub>2</sub> junto con cantidades menores de otros materiales, tales como H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, HCl, Hg, y trazas de otros componentes que se pueden derivar del proceso de la combustión (por ejemplo, material en partículas, tal como ceniza o ceniza licuada), incluyendo otros combustibles. Como se describe con más detalle a continuación, el proceso de la combustión se puede controlar de tal manera que la naturaleza de la corriente de fluido o bien se puede reducir u oxida, lo que puede proporcionar beneficios descritos en particular.

Los sistemas y métodos de la invención pueden incorporar una o más cámaras de combustión útiles para la combustión de un combustible adecuado, como se describe aquí. Con preferencia, al menos una cámara de combustión utilizada de acuerdo con la presente invención es una cámara de combustión de alta eficiencia capaz de proporcionar combustión sustancialmente completa de un combustible a una temperatura de combustión relativamente alta. La combustión a alta temperatura puede ser particularmente útil para combustión sustancialmente completa del combustible y, por lo tanto, para incrementar al máximo la eficiencia. En varias formas de realización, combustión a alta temperatura puede significar combustión a una temperatura de al menos aproximadamente 1.200 °C, al menos aproximadamente 1.300 °C, al menos aproximadamente 1.400 °C, al menos aproximadamente 1.500 °C, al menos aproximadamente 1.600 °C, al menos aproximadamente 1.750 °C, al menos aproximadamente 2.000 °C, al menos aproximadamente 2.500 °C, o al menos aproximadamente 3.000 °C. En otras formas de realización, combustión a alta temperatura puede significar combustión a una temperatura de aproximadamente 1.200 °C a aproximadamente 5.000 °C, de aproximadamente 1.500 °C a aproximadamente 4.000 °C, de aproximadamente 1.600 °C a aproximadamente 3.500 °C, de aproximadamente 1.700 °C a aproximadamente 3.200 °C, de aproximadamente 1.800 °C a aproximadamente 3.100 °C, de aproximadamente 1.900 °C a aproximadamente 3.000 °C, o de aproximadamente 2.000 °C a aproximadamente 3.000 °C.

Se pueden utilizar varias cámaras de combustión de acuerdo con la presente invención. En algunas formas de realización, se puede utilizar sólo una cámara de combustión individual en los presentes sistemas y métodos. En algunas formas de realización, se puede utilizar una pluralidad de cámaras de combustión y pueden funcionar en serie o en paralelo en combinación con una pluralidad de turbinas de expansión. Las ventajas de las formas de realización multi-turbinas que utilizan una cámara de combustión o una pluralidad de cámaras de combustión se describen, además, aquí en relación con formas de realización ejemplares de tales sistemas y métodos. Debido a la flexibilidad, las cámaras de combustión que se pueden utilizar de acuerdo con la presente invención incluyen cualquier cámara de combustión adaptada para funcionar en las condiciones variables de temperatura y presión de acuerdo con las varias formas de realización comprendidas por la presente invención. Cámaras de combustión útiles

de acuerdo con la presente invención pueden incluir cualquier cámara de combustión adaptada para combustión a las temperaturas y presiones descritas aquí, incluyendo combustión a alta temperatura. Como un ejemplo no-limitativo, una cámara de combustión útil puede ser cualquier cámara de combustión que comprende un revestimiento que está adaptado para refrigeración con un medio de refrigeración (por ejemplo una corriente de CO<sub>2</sub> reciclado en algunas formas de realización de la presente invención). Medios de refrigeración ejemplares pueden incluir el paso de un medio de refrigeración a través de una o más ranuras, taladros, refrigeración desde el lado trasero, y pasadas.

En ciertas formas de realización, se pueden utilizar cámaras de combustión refrigeradas por transpiración. Un ejemplo de una cámara de combustión refrigerada por transpiración, que se puede utilizar en la invención, se describe en la solicitud de patente de los EE.UU. N° 12/714.074., presentada el 26 de Febrero de 2010. En algunas formas de realización, una cámara de combustión refrigerada por transpiración útil de acuerdo con la invención puede incluir una o más zonas de intercambio de calor, uno o más fluidos de refrigeración y uno o más fluidos de transpiración. La refrigeración por transpiración puede ser útil para prevenir la corrosión, la putrefacción y la erosión en la cámara de combustión y puede ser particularmente deseable cuando existen tales condiciones de combustión.

En un aspecto particular, una cámara de combustión refrigerada por transpiración de acuerdo con la invención puede incluir una cámara de combustión definida parcialmente por un miembro de transpiración, en la que el miembro de transpiración está rodeado a menos parcialmente por un miembro de contención de la presión. La cámara de combustión puede tener una porción de entrada y una porción de salida opuesta. La porción de entrada de la cámara de combustión puede estar configurada para recibir el combustible que contiene carbono que debe quemarse dentro de la cámara de combustión a una temperatura de combustión para formar un producto de combustión. La cámara de combustión puede estar configurada, además, para dirigir el producto de la combustión hacia la porción de salida. El miembro de transpiración puede estar configurado para dirigir una sustancia de transpiración a través de mismo hacia la cámara de combustión para interacción amortiguadora entre el producto de la combustión y el miembro de transpiración. Además, la sustancia de transpiración puede ser introducida en la cámara de combustión para conseguir una temperatura de salida deseada del producto de la combustión. En formas de realización particulares, la sustancia de transpiración puede comprender al menos parcialmente el fluido circulante. Las paredes de la cámara de combustión pueden estar revestidas de material poroso a través del cual se dirige y fluye la sustancia de transpiración, tal como CO<sub>2</sub> y/o H<sub>2</sub>O.

Todavía en otros aspectos, el miembro de transpiración 2332 se puede extender desde la porción de entrada 222A hasta la porción de salida 222B del miembro de transpiración 230. En algunos casos, la estructura perforada/porosa del miembro de transpiración interior 2332 se puede extender sustancialmente completamente (axialmente) desde la porción de entrada 222A hasta la porción de salida 222B, de tal manera que el fluido de transpiración 210 se dirige sustancialmente dentro de toda la longitud de la cámara de combustión 222. Es decir, que sustancialmente la totalidad del miembro de transpiración interior 2332 puede estar configurada con una estructura perforada/porosa, de tal manera que toda la longitud de la cámara de combustión 222 está refrigerada por transpiración. Más particularmente, en algunos aspectos, el área acumulativa de perforación/porosa puede ser sustancialmente igual al área de la superficie del miembro de transpiración interior 2332. Todavía en otros aspectos, las perforaciones/poros pueden estar espaciados aparta en una densidad apropiada, de tal manera que se consigue una distribución sustancialmente uniforme de la sustancia de transpiración desde el miembro de transpiración interior 2332 hasta la cámara de combustión 222 (es decir, que no existen "puntos muertos", donde falte el flujo o la presencia de la sustancia de transpiración 210). En un ejemplo, una pulgada cuadrada del miembro de transpiración 2332 puede incluir una matriz de perforaciones/poros del orden de 250 x 250 por pulgada cuadrada, para proporcionar aproximadamente 62.500 poros / pulgada cuadrada, estando espaciadas tales perforaciones/poros aproximadamente 0,004 pulgadas (aproximadamente 0,1 mm). La relación entre el área de poros y el área total de la pared (% de porosidad) puede ser, por ejemplo, aproximadamente 50 %. La matriz de poros se puede variar sobre un amplio intervalo para adaptarse a otros parámetros de diseño del sistema, tales como la caída de la presión deseada frente al caudal de flujo a través del miembro de transpiración. Se pueden utilizar tamaños de matrices desde aproximadamente 10 x 10 hasta aproximadamente 10.000 x 10.000 por pulgada con porcentajes de porosidad desde aproximadamente 10 % hasta aproximadamente 80 % en algunos ejemplos.

El flujo de la sustancia de transpiración a través de esta capa de transpiración porosa y opcionalmente a través de provisiones adicionales se puede configurar para conseguir una temperatura deseada de la salida de la corriente de fluido de salida total desde la cámara de combustión. En algunas formas de realización, como se describen aquí, además, tal temperatura puede estar en el intervalo de aproximadamente 500 °C a aproximadamente 2.000 °C. Este flujo puede servir también para refrigerar el miembro de transpiración a una temperatura por debajo de la temperatura operativa máxima admisible del material que forma el miembro de transpiración. La sustancia de transpiración puede servir también para prevenir la incidencia de cualquier material de ceniza líquida o sólida u otros contaminantes en el combustible que pueden corroer, pudrir o dañar de otra manera las paredes. En tales casos, puede ser deseable utilizar un material para el miembro de transpiración con una conductividad térmica razonable para que el calor radiante incidente se pueda introducir radialmente hacia fuera a través del miembro de transpiración poroso y entonces pueda ser interceptado por transferencia de calor por convección desde las

superficies de la estructura de capa porosa hasta el fluido que pasa radialmente hacia dentro a través de la capa de transpiración. Tal configuración puede permitir que la parte siguiente de la corriente dirigida a través del miembro de transpiración sea calentada a una temperatura en un intervalo deseable, tal como de aproximadamente 500 °C a aproximadamente 1000 °C, manteniendo simultáneamente la temperatura del miembro de transpiración poroso dentro del intervalo de diseño del material utilizado para ello. Materiales para el miembro de transpiración poroso pueden incluir, por ejemplo, cerámica porosa, esteras de fibras metálicas refractarias, secciones cilíndricas perforadas y/o capas de metal sinterizado o polvos de metal sinterizado. Una segunda función del miembro de transpiración puede ser asegurar un flujo radialmente interior sustancialmente uniforme del fluido de transpiración así como longitudinalmente a lo largo de la cámara de combustión para conseguir buena mezcla entre la corriente de fluido de transpiración y el producto de la combustión, promocionando al mismo tiempo un flujo axial uniforme a lo largo de la longitud de la cámara de combustión. Una tercera función del miembro de transpiración puede ser conseguir una velocidad de fluido diluyente radialmente hacia dentro para proporcionar una amortiguación o para interceptar de otra manera que partículas sólidas y/o líquidas de ceniza u otros contaminantes dentro de los productos de combustión impacten en la superficie de la capa de transpiración y causen bloqueo u otro daño. Tal factor puede ser importante, por ejemplo, cuando se quema un combustible, tal como carbón, que tiene un residuo no-combustible inerte residual. La pared interior de la caldera de presión de la cámara de combustión que rodea el miembro de transpiración se puede aislar también para aislar la corriente de fluido de transpiración a alta temperatura dentro de la cámara de combustión.

Una forma de realización de un aparato de cámara de combustión apto para uso de acuerdo con la presente invención se ilustra de forma esquemática en la figura 1, siendo indicado el aparato de cámara de combustión, en general, por el número 220. En este ejemplo, el aparato de cámara de combustión 220 puede estar configurado para quemar un sólido en partículas, tal como carbón, para formar un producto de combustión, aunque se puede utilizar cualquier otro material que contiene carbono combustible adecuado, como se describe aquí, como un combustible. La cámara de combustión 222 puede estar definida por un miembro de transpiración 230, que está configurado para dirigir un fluido de transpiración a través del mismo hasta la cámara de combustión 222 (es decir, para facilitar la refrigeración de transpiración y/o para amortiguar la interacción entre el producto de combustión y el miembro de transpiración 230). Un experto en la técnica apreciará que el miembro de transpiración 230 puede ser sustancialmente cilíndrico para definir una cámara de combustión 222 sustancialmente cilíndrica, que tiene una porción de entrada 222A y una porción de salida 222B opuesta. El miembro de transpiración 230 puede estar rodeado al menos parcialmente por un miembro de contención de la presión 2338. La porción de entrada 222A de la cámara de combustión 222 puede estar configurada para recibir una mezcla de combustible desde una disposición de mezcla, indicada, en general, por el número 250. En otras formas de realización, tal disposición de mezcla puede estar ausente y uno o más de los materiales introducidos en la cámara de combustión se pueden añadir por separado a través de entradas independientes. De acuerdo con formas de realización particulares, la mezcla de combustible se puede quemar dentro de la cámara de combustión 222 a una temperatura particular de la combustión para formar un producto de la combustión, en donde la cámara de combustión 222 está configurada, además, para dirigir el producto de la combustión hacia la porción de salida 222B. Un dispositivo de eliminación de calor 2350 (ver, por ejemplo, la figura 2) puede estar asociado con el miembro de contención de presión 2338 y configurado para controlar su temperatura. En casos particulares, el dispositivo de eliminación de calor 2350 puede comprender una camisa de transferencia de calor definida al menos parcialmente por una pared 2336 opuesta al miembro de contención de la presión 2338, en donde un líquido puede ser circulado en camisas de circulación de agua 2337 definidas entre ellas. En una forma de realización, el líquido circulado puede ser agua.

En un aspecto particular, el miembro de transpiración interior poroso 2332 está configurado de esta manera para dirigir el fluido de transpiración dentro de la cámara de combustión 222, de tal manera que la sustancia de transpiración 210 entra en la cámara de combustión 222 en un ángulo sustancialmente recto (90°) con respecto a la superficie interior del miembro de transpiración interior 2332. Entre otras ventajas, la introducción de la sustancia de transpiración 210 en el ángulo sustancialmente recto con respecto al miembro de transpiración interior 2332 puede facilitar o mejorar de otra manera el efecto de dirigir gotitas líquidas o sólidas de escoria u otros contaminantes o vórtices de fluido de la combustión fuera de la superficie interior del miembro de transpiración interior 2332. La falta de contacto entre las gotitas líquidas o sólidas de escoria puede prevenir la coalescencia de dichas gotitas en gotitas o masas grandes, que se conoce en la técnica anterior que ocurren después del contacto entre gotitas o partículas y paredes sólidas. La introducción de la sustancia de transpiración 210 en el ángulo sustancialmente recto con respecto al miembro de transpiración interior 2332 puede facilitar o mejorar de otra manera el efecto de prevenir la formación de vórtices de fluido de la combustión con velocidad suficiente perpendicularmente a y en la proximidad del miembro de transpiración interior que puede incidir sobre y dañar el miembro de transpiración interior. En tales casos, el miembro de transpiración exterior 2331, el miembro de contención de la presión 2338, la camisa de transferencia de calor 2336 y/o la capa de aislamiento 2339 pueden estar configurados, o bien individualmente o en combinación, para proporcionar un efecto "colector" (es decir, para proporcionar un suministro distribuido sustancialmente uniforme) con respecto al suministro de la sustancia de transpiración / fluido 210 a y a través del miembro de transpiración interior 2332 y dentro de la cámara de combustión 222. Es decir, que se puede conseguir un suministro sustancialmente uniforme (en términos de caudal de flujo, presión, o cualquier otra medida adecuada y apropiada) de la sustancia de transpiración 210 dentro de la cámara de combustión 222 configurando el miembro de

transpiración exterior 2331, el miembro de contención de la presión 2338, la camisa de transferencia de calor 2336 y/o la capa de aislamiento 2339 para proporcionar un suministro uniforme de la sustancia de transpiración 210 al miembro de transpiración interior 2332, o el suministro de la sustancia de transpiración 210 alrededor de la superficie exterior del miembro de transpiración interior 2332 puede adaptarse y configurarse particularmente, de tal manera que se consigue una distribución sustancialmente uniforme de la sustancia de transpiración 210 dentro de la cámara de combustión 222. Tal distribución sustancialmente uniforme puede prevenir la formación de vórtices de fluido de combustión caliente, que se pueden formar de otra manera por interacción de flujo de transpiración no-uniforme con el flujo de fluido de la combustión y cuyos vórtices pueden incidir en y dañar el miembro de transpiración interior.

La disposición de mezcla 250 (cuando está presente) puede estar configurada para mezclar un combustible carbonoso 254 con oxígeno enriquecido 242 y un fluido circulante 236 para formar una mezcla de combustible 200. El combustible carbonoso 254 puede ser proporcionado en forma de un combustible carbonoso sólido, un combustible carbonoso líquido y/o un combustible carbonoso gaseoso. El oxígeno enriquecido 242 puede ser oxígeno que tiene una pureza molar mayor que aproximadamente 85 %. El oxígeno enriquecido 242 puede ser suministrado, por ejemplo, por cualquier sistema/técnica de separación conocidos en la técnica, tal como, por ejemplo, un proceso de separación de aire criogénico, o podría implementarse un proceso de separación de oxígeno de membrana de transporte de iones de alta temperatura (desde aire). El fluido circulante 236 puede ser dióxido de carbono, como se describe aquí. En casos donde el fluido carbonoso 254 es un sólido en partículas, tal como carbón en polvo 254A, la disposición de mezcla 250 puede estar configurada, además, para mezclar el combustible carbonoso sólido en partículas 254A con una sustancia de fluidización 255. De acuerdo con un aspecto, el combustible carbonoso sólido en partículas 254A puede tener un tamaño medio de las partículas de entre aproximadamente 50 micras y aproximadamente 200 micras. De acuerdo con todavía otro aspecto, la sustancia de fluidización 255 puede comprender agua y/o CO<sub>2</sub> líquido, que tiene una densidad de entre aproximadamente 450 kg/m<sup>3</sup> y aproximadamente 1100 kg/m<sup>3</sup>. Más particularmente, la sustancia de fluidización 255 puede cooperar con el combustible carbonoso sólido en partículas 254A para formar una suspensión 250A que tiene, por ejemplo, entre aproximadamente 25 % en peso y aproximadamente 55 % en peso del combustible carbonoso sólido en partículas 254A. Aunque el oxígeno se muestra en la figura 1 mezclado con el combustible 254 y el fluido circulante 236 antes de la introducción en la cámara de combustión 222, en algunos casos, el oxígeno 242 se puede introducir de forma separada en la cámara de combustión 222, como sea necesario o deseado.

La disposición de mezcla 250, en algunos aspectos, puede comprender, por ejemplo, una matriz de toberas de inyección espaciadas aparte (no mostradas) dispuestas alrededor de una pared extrema 223 del miembro de transpiración 230 asociado con la porción de entrada 222A de la cámara de combustión cilíndrica 222. La inyección de combustible / mezcla de combustible en la cámara de combustión 222 de esta manera puede proporcionar, por ejemplo, un área de superficie grande de corriente de entrada de mezcla de combustible inyectado por radiación. La temperatura de la mezcla de combustible inyectado se puede incrementar de esta manera rápidamente hasta la temperatura de ignición del combustible y puede dar como resultado una combustión compacta. La velocidad de inyección de la mezcla de combustible puede estar en el intervalo, por ejemplo, de entre aproximadamente 10 m/seg., aunque estos valores pueden depender de muchos factores, tales como la configuración de las toberas de inyección particulares. Tal disposición de inyección puede adoptar muchas formas diferentes. Por ejemplo, la disposición de inyección puede comprender una matriz de taladros, por ejemplo, en el intervalo de entre aproximadamente 0,5 mm y aproximadamente 3 mm de diámetro, en donde el combustible inyectado sería inyectado a través de ellos a una velocidad de entre aproximadamente 10 m/s y aproximadamente 40 m/s.

Como se muestra más particularmente en la figura 2, la cámara de combustión 222 puede ser definida por el miembro de transpiración 230, que puede estar rodeado al menos parcialmente por un miembro de contención de la presión 2338. En algunos casos, el miembro de contención de la presión 2339 puede estar rodeado, además, al menos parcialmente, por una camisa de transferencia de calor 2336, en donde la camisa de transferencia de calor 2336 puede cooperar con el miembro de contención de presión 2338 para definir uno o más canales 2337 entre ellos, a través de los cuales puede circular una corriente de agua de baja presión. Por medio de un mecanismo de evaporación, el agua circulada puede ser utilizada, por lo tanto, para controlar y/o mantener una temperatura seleccionada del miembro de contención de la presión 2338, por ejemplo en un intervalo de aproximadamente 100°C a aproximadamente 250 °C. En algunos aspectos, una capa de aislamiento 2339 puede estar dispuesta entre el miembro de transpiración 230 y el miembro de contención de la presión 2338.

En algunos casos, el miembro de transpiración 230 puede comprender, por ejemplo, otro miembro de transpiración 2332, que está dispuesto opuesto al miembro de transpiración exterior 2331 desde el miembro de contención de la presión 2338, y que define la cámara de combustión 222. El miembro de transpiración exterior 2331 puede estar comprendido por cualquier material adecuado resistente a la temperatura, tal como por ejemplo acero y aleaciones de acero, incluyendo acero inoxidable y aleaciones de níquel. En algunos casos, el miembro de transpiración exterior 2331 puede estar configurado para definir primeros pasos de suministro de fluido de transpiración 2333A que se extienden a través de ellos desde su superficie adyacente a la capa de aislamiento 2339 hasta su superficie adyacente al miembro de transpiración interior 2332. Los primeros pasos de suministro de fluido de transpiración 2333A pueden corresponder, en algunos casos a los pasos de suministro de fluido de transpiración 2333B definidos

por el miembro de contención de la presión 2338, la camisa de transferencia de calor 2336 y/o la capa de aislamiento 2339. Los primeros y segundos pasos de suministro de fluido de transpiración 2333A, 2333B pueden estar configurados, por lo tanto, para cooperar para dirigir un fluido de transpiración a través de ellos hasta el miembro de transpiración interior 2332. En algunos casos, como se muestra, por ejemplo, en la figura 1, el fluido de transpiración 210 puede comprender el fluido circulante 236 y se puede obtener a partir de la misma fuente asociada con ellos. Los primeros y segundos pasos de suministro de fluido de transpiración 2333A, 2333B pueden estar aislados, cuando sea necesario, para suministrar el fluido de transpiración 210 (es decir, CO<sub>2</sub>) en suministro suficiente y a una presión suficiente, de tal manera que el fluido de transpiración 210 se dirige a través del miembro de transpiración interior 2332 y dentro de la cámara de combustión 222. Tales medidas, que implican al miembro de transpiración 230 y al fluido de transpiración 210 asociado, como se describe aquí, pueden permitir al aparato de la cámara de combustión 220 operar a las presiones relativamente altas y a las temperaturas relativamente altas descritas de otra manera aquí.

A este respecto, el miembro de transpiración interior 2332 puede estar comprendido, por ejemplo, de un material cerámico poroso, una material perforado, un material laminado, una estera porosa comprendida de fibras orientadas de forma aleatoria en dos dimensiones y ordenadas en la tercera dimensión, o cualquier otro material adecuado o combinaciones de ellos que exhiben las características requeridas de los mismos como se describen aquí, a saber, múltiples pasos o poros de flujo u otros orificios 2335 adecuados para recibir y dirigir el fluido de transpiración a través del miembro de transpiración interior 2332. Ejemplos no limitativos de material poroso cerámico u otros materiales adecuados para tales sistemas de refrigeración por transpiración incluyen óxido de aluminio, óxido de circonio, circonio endurecido por transformación, cobre, molibdeno, volframio, volframio infiltrado con cobre, molibdeno revestido con volframio, cobre revestido con volframio, varias aleaciones de níquel a alta temperatura, y materiales con funda o revestidos con renio. Las fuentes de tales materiales incluyen, por ejemplo, CoorsTek, Inc., (Golden, CO) (circonio); UltraMet Advanced Materials Solutions (Pacoima, CA) (revestimientos de metales refractarios); Orsam Sylvania (Danvers, MA) (volframio/cobre); y MarkeTech International, Inc. (Port Townsend, WA) (volframio). Ejemplos de materiales perforados adecuados para tales sistemas de refrigeración por transpiración incluyen todos los materiales y proveedores anteriores (donde las estructuras finales perforadas se pueden obtener, por ejemplo, perforando una estructura inicialmente no porosa utilizando métodos conocidos en la técnica de fabricación). Ejemplos de materiales laminados adecuados incluyen todos los materiales y proveedores anteriores (donde las estructuras finales laminadas se pueden obtener, por ejemplo, laminando estructuras no porosas o parcialmente porosas, de tal manera que se pueda conseguir la porosidad final deseada utilizando métodos conocidos en la técnica de fabricación).

Las figuras 3A y 3B ilustran que, en un aspecto de un aparato de cámara de combustión 220, la estructura que define la cámara de combustión 222 puede estar formada a través de ajuste de interferencia en "caliente" entre el miembro de transpiración 230 y la estructura circundante, tal como el miembro de contención de la presión 2338 o la capa de aislamiento 2339 dispuesta entre el miembro de transpiración 230 y el miembro de contención de la presión 2338. Por ejemplo, cuando está relativamente "frío", el miembro de transpiración 230 puede estar dimensionado más pequeño, radial y/o axialmente, con respecto al miembro de contención de la presión 2338 circundante. Como tal, cuando se inserta en el miembro de contención de la presión 2338, un intersticio radial y/o axial puede estar presente en medio (ver, por ejemplo, la figura 3A). Naturalmente, tales diferencias dimensionales pueden facilitar la inserción del miembro de transpiración 230 en el miembro de contención de la presión 2338. Si embargo, cuando se calienta, por ejemplo hacia la temperatura operativa, el miembro de transpiración 230 puede estar configurado para expandirse radial y/o axialmente para reducir o eliminar los intersticios observados (ver, por ejemplo, la figura B). Actuando de esta manera, se puede formar un ajuste de interferencia axial y/o radial entre el miembro de transpiración 230 y el miembro de contención de la presión 2338. En caso que implican a un miembro de transpiración 230 con un miembro de transpiración exterior 2331 y un miembro de transpiración interior 2332, tal ajuste de interferencia puede tener colocar el miembro de transpiración interior 2332 bajo compresión. Materiales frágiles resistentes a alta temperatura adecuados, tales como una cerámica porosa, pueden utilizarse para el miembro de transpiración interior 2332.

Con el miembro de transpiración interior 2332 configurado de esta manera, la sustancia de transpiración 210 puede comprender, por ejemplo, dióxido de carbono (es decir, desde la misma fuente que el fluido de circulación 236) dirigido a través del miembro de transpiración interior 2332, de tal manera que la sustancia de transpiración 210 forma una capa de amortiguación 231 (es decir, un "pared de vapor") inmediatamente adyacente al miembro de transpiración interior 2332 dentro de la cámara de combustión 222, en donde la capa de amortiguación 231 puede estar configurada para amortiguar la interacción entre el miembro de transpiración interior 2332 y los elementos incombustibles licuados y calor asociado con el producto de la combustión. Es decir que, en algunos casos, el fluido de transpiración 210 puede suministrarse a través del miembro de transpiración interior 2332, por ejemplo al menos a la presión dentro de la cámara de combustión 222, en donde el caudal de flujo del fluido de transpiración 210 (es decir, vapor de CO<sub>2</sub>) dentro de la cámara de combustión 222 es suficiente para que el fluido de transpiración 210 se mezcle con y refrigere los productos de la combustión para formar una mezcla de fluido de salida a una temperatura suficiente con respecto al requerimiento de entrada del proceso curso abajo siguiente (es decir, que una turbina puede requerir una temperatura de entrada, por ejemplo, de aproximadamente 1.225 °C), pero en donde la mezcla

de fluido de salida permanece suficientemente alta para mantener gotitas de escoria u otros contaminantes en el combustible en un estado fluido o líquido. El estado líquido de los elementos de combustible puede facilitar, por ejemplo, la separación de tales contaminantes desde el producto de la combustión en forma líquida, con preferencia en una forma de flujo libre de baja viscosidad, que será menos probable que obstruya o dañe de otra manera cualquier sistema de eliminación implementado para tal separación. En la práctica, tales requerimientos pueden depender de varios factores tales como el tipo de combustible carbonoso sólido (es decir, carbón) empleado y las características particulares de la escoria formada en el proceso de la combustión. Es decir, que la temperatura de la combustión dentro de la cámara de combustión 222 puede ser tal que cualquier elemento combustible en el combustible carbonoso se licua dentro del producto de la combustión.

En aspectos particulares, el miembro de transpiración interior poroso 2332 está configurado de esta manera para dirigir el fluido de transpiración y dentro de la cámara de combustión 222 de una manera radialmente hacia dentro para formar una pared de barrera al fluido o capa de amortiguación 231 alrededor de la superficie del miembro de transpiración 2332 que define la cámara de combustión 222 (ver, por ejemplo, la figura 2). La superficie del miembro de transpiración interior 2332 es calentado también por producto de combustión. Como tal, el miembro de transpiración interior poroso 2332 puede estar configurado para tener una conductividad térmica adecuada, de tal manera que se calienta el fluido de transpiración 210 que pasa a través del miembro de transpiración interior 2332, mientras el miembro de transpiración interior poroso 2332 es refrigerado al mismo tiempo, resultando que la temperatura de la superficie del miembro de transpiración interior 2332 que define la cámara de combustión 222 es, por ejemplo, aproximadamente 1000 °C en la región de la temperatura máxima de la combustión. La pared de barrera al fluido o capa de amortiguación 231 formada por el fluido de transpiración 210 en cooperación con el miembro de transpiración 2332 amortigua de esta manera la interacción entre el miembro de transpiración interior 2332 y los productos de la combustión a alta temperatura y la escoria u otras partículas contaminantes y, como tal, amortigua el miembro de transpiración interior 2332 de contacto, putrefacción u otro daño. Además, el fluido de transpiración 210 puede ser introducido en la cámara de combustión 222 a través del miembro de transpiración interior 2332 de tal manera que regula una mezcla de salida del fluido de transpiración 210 y el producto de la combustión alrededor de la porción de salida 222B de la cámara de combustión a una temperatura deseada (por ejemplo, aproximadamente 500 °C a aproximadamente 2000 °C).

En formas de realización específicas, el aparato de la cámara de combustión 220 puede estar configurado de esta manera como un aparato de cámara de combustión de alta eficiente, refrigerado por transpiración capaz de proporcionar combustión relativamente completa de un combustible 254 a una temperatura operativa relativamente alta, como se describe aquí. Tal aparato de cámara de combustión 220 puede implementar, en algunos casos, uno o más fluidos de refrigeración y/o uno o más fluidos de transpiración 210. En asociación con el aparato de cámara de combustión 220 se pueden implementar también componentes adicionales. Por ejemplo, se puede prever una unidad de separación de aire para separar N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, y se puede prever un dispositivo inyector de combustible para recibir O<sub>2</sub> desde la unidad de separación de aire y combinar el O<sub>2</sub> con un fluido circulante de CO<sub>2</sub>, y una corriente de combustible que comprende un gas, un líquido, un fluido supercrítico, o un combustible en partículas sólidas en suspensión en un fluido de CO<sub>2</sub> de alta densidad.

En otro aspecto, el aparato de cámara de combustión 220 refrigerado por transpiración puede incluir un inyector de combustible para inyectar una corriente de fluido presurizado en la cámara de combustión 222 del aparato de cámara de combustión 220, en donde la corriente de fluido puede comprender un combustible carbonoso 254 procesado, un medio de fluidización 255 (que puede comprender el fluido circulante 236, como se describe aquí), y oxígeno 242. El oxígeno (enriquecido) 242 y el fluido circulante de CO<sub>2</sub> 236 pueden combinarse como una mezcla supercrítica homogénea. La cantidad de oxígeno presenta puede ser suficiente para quemar el combustible y producir productos de la combustión que tienen una composición deseada. El aparato de cámara de combustión 220 puede incluir también una cámara de combustión 222, configurada como un volumen de combustión a alta temperatura, a alta presión, para recibir la corriente de combustible, así como un fluido de transpiración 210 que entra en el volumen de combustión a través de las paredes de un miembro de transpiración poroso 230 que define la cámara de combustión 222. El caudal de alimentación del fluido de transpiración 210 puede ser utilizado para controlar la temperatura de la porción de salida del aparato de cámara de combustión / temperatura de la porción de entrada de la turbina a un valor deseado y/o para refrigerar el miembro de transpiración 230 a una temperatura compatible con el material que forma el miembro de transpiración 230. El fluido de transpiración 210 dirigido a través del miembro de transpiración 230 proporciona una capa de fluido / amortiguación en la superficie del miembro de transpiración 230 que define la cámara de combustión 222, en donde la capa de fluido / amortiguación puede prevenir que partículas de ceniza o escoria líquida que resultan de cierta combustión de combustible interactúen con las paredes expuestas del miembro de transpiración 230.

La cámara de combustión 222 puede estar configurada, además, de tal manera que la corriente de combustible (y el fluido circulante 236) pueden inyectarse o introducirse de otra manera en la cámara de combustión 222 a una presión mayor que la presión a la que ocurre la combustión. El aparato de cámara de combustión 220 puede incluir un miembro de contención de la presión 2338 que rodea al menos parcialmente el miembro de transpiración 230 que define la cámara de combustión 230, en donde un miembro aislante 2339 puede disponerse entre el miembro de

contención de la presión 2338 y el miembro de transpiración 230. En algunos casos, un dispositivo de eliminación de calor 2350, tal como un sistema de refrigeración con camisa de agua que define camisas de circulación de agua 2337, puede acoplarse con el miembro de contención de la presión 2338 (es decir, en el exterior del miembro de contención de la presión 2338 que forma la "cáscara" del aparato de cámara de combustión 220). El fluido de transpiración 210 implementado en conexión con el miembro de transpiración 230 del aparato de cámara de combustión 220 puede ser, por ejemplo, CO<sub>2</sub> mezclado con cantidades menores de H<sub>2</sub>O y/o un gas inerte, tal como N<sub>2</sub> o argón. El miembro de transpiración 230 puede comprender, por ejemplo, un metal poroso, una cerámica, una matriz compuesta, un colector de capas, cualquier otra estructura adecuada, o combinaciones de ellos. En algunos aspectos, la combustión dentro de la cámara de combustión 222 puede producir una presión alta, corriente de producto de combustión de alta temperatura, que se puede dirigir posteriormente a un aparato de producción de potencia, tal como una serie de turbinas, para expansión al mismo, como se describe más completamente aquí.

Las presiones relativamente altas implementadas por formas de realización de un aparato de cámara de combustión como se describen aquí, pueden funcionar para concentrar la energía producida de esta manera a una intensidad relativamente alta en un volumen mínimo, resultando esencialmente una densidad de energía relativamente alta. La densidad de energía relativamente alta permite realizar el procesamiento curso abajo de de esta energía de una manera más eficiente que a presiones más bajas, y de esta manera proporciona un factor de viabilidad para la tecnología. Aspectos de la presente invención pueden proporcionar de esta manera una densidad de energía en órdenes de magnitud mayores que las centrales de energía existentes (por ejemplo, en 10-100 veces). La densidad de energía más alta incrementa la eficiencia del proceso, pero también reduce el coste del equipo necesario para implementar la transformación de energía desde energía térmica a electricidad, reduciendo el tamaño y la masa del equipo, por lo tanto el coste del equipo.

Como se describe aquí de otra manera, el aparato de cámara de combustión utilizando en los métodos y sistemas inventivos pueden ser útiles para la combustión de una variedad de diferentes fuentes que contienen carbono. En formas de realización específicas, el combustible que contiene carbono se puede quemar de manera sustancialmente completa, de tal modo que no se incluyen materiales incombustibles líquidos o sólidos en la corriente de producto de la combustión. En algunas formas de realización, sin embargo, un combustible que contiene carbono sólido (por ejemplo, carbón), que se puede utilizar en la invención, puede resultar en la presencia de materiales incombustibles. En formas de realización específicas, el aparato de cámara de combustión puede incluir la capacidad de conseguir una temperatura de la combustión que causa que los elementos incombustibles en el combustible que contiene carbono se licuen durante el proceso de la combustión. En tales casos, se pueden aplicar provisiones para eliminar los elementos incombustibles licuados. La retirada se puede realizar, por ejemplo, utilizando separadores de ciclón, separadores de impacto, o lechos de filtros granulares refractarios graduados dispuestos en una configuración anular, o combinaciones de ellos. En formas de realización particulares, las gotitas pueden eliminarse de la corriente de fluido circulante a alta temperatura por una serie de separadores de ciclón, tales como, por ejemplo, un aparato separador 2340 como se muestra en la figura 4. En general, aspectos de tal separador ciclónico implementado por la presente invención pueden comprender una pluralidad de dispositivos separadores centrífugos 100 dispuestos en serie, que incluyen un dispositivo separador centrífugo de entrada 100A configurado para recibir el producto de la combustión / corriente de fluido de salida y los elementos incombustibles licuados asociados con ellos, y un dispositivo separador centrífugo de salida 100B configurado para el escape del producto de la combustión / corriente de fluido de salida que tiene los elementos incombustibles licuados sustancialmente eliminados de ellos. Cada dispositivo separador centrífugo 100 incluye una pluralidad de elementos separadores centrífugos o ciclones 11 dispuestos operativamente en paralelo alrededor de un tubo colector central 2, en donde cada elemento de separación centrífugo o ciclón 1 está configurado para eliminar al menos una porción de los elementos incombustibles licuados desde el producto de la combustión / corriente de fluido de salida, y para dirigir la porción retirada de los elementos incombustibles licuados hasta un sumidero 20. Tal aparato separador 2340 puede estar configurado para operar a una presión elevada y, como tal, puede comprender una carcasa 125 que contiene presión configurada para alojar los dispositivos separadores centrífugos y el sumidero. De acuerdo con tales aspectos, la carcasa 125 que contiene presión puede ser una extensión del miembro de contención de la presión 2338 que rodea también el aparato de cámara de combustión 220, o la carcasa 125 que contiene presión puede ser un miembro separado capaz de acoplarse con el miembro de contención de la presión 2338 asociado con el aparato de cámara de combustión 220. En cualquier caso, debido a la temperatura elevada experimentada por el aparato separador 2340 a través de la corriente de fluido de salida, la carcasa 125 que contiene presión puede incluir también un sistema de dispersión de calor, tal como una camisa de transferencia de calor que tiene un líquido circulado allí (no mostrado), acoplado operativamente con él para eliminar calor desde allí. En algunos aspectos, un dispositivo de recuperación de calor (no mostrado) puede acoplarse operativamente con la camisa de transferencia de calor, en donde el dispositivo de recuperación de calor puede estar configurado para recibir el líquido circulado en la camisa de transferencia de calor y para recuperar energía térmica desde ese líquido.

En formas de realización particulares, el aparato separador (de eliminación de escoria) 2340, mostrado en la figura 4, puede estar configurado para estar dispuesto en serie con el aparato de cámara de combustión 220 alrededor de la porción de salida 222B del mismo para recibir la corriente de fluido de salida / productos de la combustión desde allí. La corriente de fluido de salida refrigerada por transpiración desde el aparato de cámara de combustión 220, con

las gotitas de escoria líquida (elementos incombustibles) allí, se puede dirigir para entrar en una provisión de colector central 2A del dispositivo separador centrífugo de entrada 100A a través de un reductor cónico 10. En un aspecto, el aparato separador 2340 puede incluir tres dispositivos separadores centrífugos 100A, 100B, 100C (aunque un experto en la técnica apreciará que tal aparato separador puede incluir uno, dos, tres o más dispositivos separadores centrífugos, como es necesario o deseado). En este caso, los tres dispositivos separadores centrífugos 100A, 100B, 100C dispuestos operativamente en serie proporcionan una unidad de separación ciclónica de 3 fases. Cada dispositivo separador centrífugo incluye, por ejemplo, una pluralidad de elementos separadores centrífugos (ciclones 1) dispuestos alrededor de la circunferencia del tubo colector central 2 correspondiente. Cada una de las provisiones de colector central 2A y los tubos de colector central 2 del dispositivo separador centrífugo de entrada 100A, y el dispositivo separador centrífugo medio 100C están sellados en su extremo de salida. En esos casos, la corriente de fluido de salida se dirige a canales de ramificación 11 que corresponden a cada uno de los elementos separadores centrífugos (ciclones 1) del dispositivo separador centrífugo 100 respectivo. Los canales de ramificación 11 están configurados para acoplarse con el extremo de entrada del ciclón 1 respectivo para formar una entrada tangencial allí (que causa, por ejemplo, que la corriente de fluido de salida que entra en el ciclón 1 interactúe con la pared del ciclón 1 en un flujo en espiral). El canal de salida 3 desde cada ciclón 1 es conducido entonces a la porción de entrada del tubo colector central 2 del dispositivo separador centrífugo 100 respectivo. En el dispositivo separador centrífugo de salida 100B, la corriente de fluido de salida (que tiene los elementos incombustibles sustancialmente separados de ella) se dirige desde el tubo colector central del dispositivo separador centrífugo de salida 100B y a través de un tubo colector 12 y una tobera de salida 5, de tal manera que la corriente de fluido de salida "limpia" puede ser dirigida entonces a un proceso siguiente, tal como el asociado con el aparato de transformación. La disposición de separación ciclónica ejemplar de tres fases permite la retirada de escoria, por ejemplo, hasta por debajo de 5 ppm en masa en la corriente de fluido de salida.

En cada fase del aparato separador 2340, la escoria líquida separada es dirigida desde cada uno de los ciclones 1 a través de tubos de salida 4 que se extienden hacia un sumidero 20. La escoria líquida separada es dirigida entonces a una tobera o tubo de salida 14 que se extiende desde el sumidero 20 y la carcasa 125 que contiene presión para eliminar y/o recuperar los componentes de la misma. En la realización de la retirada de la escoria, la escoria líquida puede dirigirse a través de una sección 6 refrigerada con agua o de otra manera a través de una sección que tiene una presión alta, conexión de agua fría, en donde la interacción con el agua causa que la escoria líquida se solidifique y/o granule. La mezcla de escoria solidificada y agua se puede separar entonces en un recipiente (provisión de colección) 7 en una mezcla fluida de escoria y agua, que puede eliminarse, particularmente después de la reducción de la presión, a través de una válvula 9 adecuada, mientras cualquier gas residual puede ser eliminado a través de una línea separada 8. Una pareja de recipientes con sistemas asociados que funcionan en secuencia puede permitir el funcionamiento continuo del sistema en algunas formas de realización.

Puesto que el aparato separador 2340 puede ser implementado en combinación con la corriente de producto de la combustión a temperatura relativamente alta (es decir, a una temperatura suficiente para mantener los elementos incombustibles en forma líquida con una viscosidad relativamente baja) puede ser deseable, en algunos casos, que superficies del aparato separador 2340 expuestas a uno de entre la corriente de producto de combustión / fluido de salida y los elementos incombustibles licuados asociados con ello esté compuesto por un material configurado para tener al menos una de entre una resistencia a alta temperatura, una resistencia a alto corrosión y una conductividad térmica baja. Ejemplos de tales materiales pueden incluir óxido de circonio y óxido de aluminio, aunque tales ejemplos no están destinados para ser limitativos de ninguna manera. Como tal, en ciertos aspectos, el aparato separador 2340 puede estar configurado para remover sustancialmente los elementos incombustibles licuados a partir de la corriente de producto de la combustión / fluido de salida y para mantener los elementos incombustibles en una forma líquida de baja viscosidad al menos hasta se retirada desde el sumidero 20. Naturalmente, en formas de realización en las que se utiliza un combustible no-sólido y no se incluyen materiales incombustibles en la corriente de producto de combustión, puede ser innecesaria la adición del separador de escoria.

En algunas formas de realización, el aparato separador 2340 puede utilizarse para separar residuo de ceniza sólida en partículas desde la combustión de cualquier combustible que produce un residuo sólido incombustible, tal como carbón. Por ejemplo, el carbón podría triturarse hasta un tamaño deseado (por ejemplo, un tamaño tal que menos del 1% en peso del material en partículas o carbón en polvo comprende partículas mayores que 100  $\mu\text{m}$  de tamaño) y suspenderse con  $\text{CO}_2$  líquido. En formas de realización específicas, el  $\text{CO}_2$  líquido podría estar a una temperatura de aproximadamente  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  a aproximadamente  $-18\text{ }^\circ\text{C}$ . La suspensión podría comprender de aproximadamente 40% a aproximadamente 60% en peso de carbón. La suspensión puede presurizarse entonces hasta la presión de combustión requerida. Con referencia a la figura 1, la corriente de reciclado 236 podría dividirse en relación al modo de entrada en la cámara de combustión 220. Una primera porción (corrientes 236a) podría introducirse en la cámara de combustión 220 a través de la disposición de mezcla 250, y una segunda porción (corriente 236b) podría introducirse en la cámara de combustión 220 pasándola a través de la capa de refrigeración por transpiración 230. Como se ha descrito anteriormente, es posible accionar el quemador 220 con una relación de  $\text{O}_2$  a combustible que da como resultado la formación de una mezcla de gas reductor (por ejemplo, que comprende  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , y/o  $\text{NH}_3$ ). La porción de corriente 236 que entra en la cámara de combustión a través de la capa de refrigeración por

transpiración 230 puede utilizarse para refrigerar la mezcla de los gases de la combustión y el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a una temperatura sustancialmente por debajo de la temperatura de solidificación de la ceniza (por ejemplo, en el intervalo de aproximadamente 500 °C a 900 °C. La corriente total de gas 5 desde el aparato separador 2340 puede pasarse a través de una unidad de filtración, que reduce el nivel de la ceniza en partículas sólidas residuales hasta un valor muy bajo (por ejemplo, por debajo de aproximadamente 2 mg/m<sup>3</sup> de gas que pasa a través del filtro). Este gas limpio puede ser quemado entonces en una segunda cámara de combustión, donde puede ser diluido con otra porción de la corriente de fluido de reciclado 236. En tales formas de realización, la corriente de fluido reciclado 236 podría distribuirse entre las dos cámaras de combustión, cuando sea necesario.

Cualquier material que contiene carbono puede utilizarse como combustible de acuerdo con la presente invención. En particular, debido a las altas presiones y a las altas temperaturas mantenidas por el aparato de cámara de combustión quemada con oxígeno utilizado en los métodos y sistemas de la invención, combustibles útiles incluyen, pero no están limitados a varios grados y tipos de carbón, madera, aceite, fueloil, gas natural, gas combustible basado de carbón, alquitrán a partir de arenas bituminosas, bitumen, biomasa, algas, basuras de desecho sólidas combustibles graduadas, asfalto, neumáticos usados, diesel, gasolina, queroseno (JP-5, JP-4), gases derivados de la gasificación o pirolisis de material hidrocarbonoso, etanol, biocombustibles sólidos y líquidos. Esto se puede considerar una diferencia importante con respecto a los sistemas y métodos de la técnica anterior. Por ejemplo, sistemas conocidos en la técnica para combustión de combustibles sólidos, tales como carbón, requieren diseños considerablemente diferentes de los sistemas para combustión de combustibles no-sólidos, tales como gas natural.

Los combustibles pueden ser procesados de manera adecuada para permitir la inyección en el aparato de combustión en caudales suficientes y a presiones por encima de la presión dentro de la cámara de combustión. Tales combustibles pueden estar en forma líquida, en suspensión, gel o pasta con fluidez y viscosidad apropiadas a temperaturas ambiente o a temperaturas elevadas. Por ejemplo, el combustible puede proporcionarse a una temperatura de aproximadamente 30 °C a aproximadamente 500 °C, de aproximadamente 40 °C a aproximadamente 450 °C, de aproximadamente 50 °C a aproximadamente 425°C, o de aproximadamente 75 °C a aproximadamente 400 °C. Cualquier material combustible sólido puede triturarse o molerse o procesarse de otra manera para reducir los tamaños de las partículas, como sea apropiado. Se puede añadir un medio de fluidización o de suspensión, como sea necesario, para conseguir una forma adecuada y cumplir los requerimientos de flujo para bombeo a alta presión. Naturalmente, un medio de fluidización puede no ser necesario dependiendo de la forma del combustible (es decir, líquido o gas). De la misma manera, el fluido circulante circulado puede utilizarse como el medio de fluidización, en algunas formas de realización.

Fluidos de transpiración adecuados en una cámara de combustión útiles de acuerdo con la invención pueden incluir cualquier fluido capaz de fluir en una cantidad y presión suficientes a través del revestimiento interior para formar la pared de vapor. En la presente forma de realización, CO<sub>2</sub> puede ser un fluido de transpiración ideal por que la pared de vapor formada tiene buenas propiedades de aislamiento térmico así como propiedades de absorción de luz visible y UV. CO<sub>2</sub> puede utilizarse como un fluido supercrítico. Otros ejemplos de fluidos de transpiración incluyen H<sub>2</sub>O, gases de producto de la combustión refrigerados reciclados desde la corriente descendente, oxígeno, hidrógeno, gas natural, metano, y otros hidrocarburos ligeros. Los combustibles pueden utilizarse especialmente como fluidos de transpiración durante el arranque de la cámara de combustión para conseguir temperaturas y presiones operativas apropiadas en la cámara de combustión antes de la inyección de la fuente de combustible principal. También se pueden utilizar combustibles como fluidos de transpiración para ajustar la temperatura y la presión operativas de la cámara de combustión durante la conmutación entre fuentes principales de combustible, tales como cuando se conmuta de carbón a biomasa como el combustible principal. En algunas formas de realización, pueden utilizarse dos o más fluidos de transpiración. Además, se pueden utilizar diferentes fluidos de transpiración en diferentes posiciones a lo largo de la cámara de combustión. Por ejemplo, puede utilizarse un primer fluido de transpiración en una zona de intercambio de calor a alta temperatura y puede utilizarse un segundo fluido de transpiración en una zona de intercambio de calor a baja temperatura. El fluido de transpiración puede optimizarse para las condiciones de temperatura y presión de la cámara de combustión donde el fluido de transpiración forma la pared de vapor. En el presente ejemplo, el fluido de transpiración es CO<sub>2</sub> reciclado precalentado.

En un aspecto, la presente invención proporciona métodos de generación de potencia. Específicamente, los métodos puede hacer uso también de cámaras de combustión de alta eficiencia, como se describe aquí. Los métodos inventivos hacen uso también de cámaras de combustión de alta eficiencia, como un ejemplo no-limitativo, una cámara de combustión refrigerada por transpiración. Asimismo se pueden utilizar otras cámaras de combustión. En particular, la invención está destinada a comprender cualquier tipo de cámara de combustión que pueda ser reconocida como útil a la luz de la presente invención. En ciertas formas de realización, los métodos pueden describirse, en general, en relación al diagrama de flujo mostrado en la figura 5. Como se ve allí, está prevista una cámara de combustión 220 y allí están previstas varias entradas. Un combustible que contiene carbono 254 y O<sub>2</sub> 242 (cuando sea necesario) pueden introducirse en la cámara de combustión 220 junto con un fluido circulante 236 (CO<sub>2</sub> en la presente forma de realización). Una disposición de mezcla 250 ilustrada por una línea de trazos indica que este componente está presente opcionalmente. Específicamente, cualquier combinación de dos o de todos los tres

materiales (combustible, O<sub>2</sub> y fluido de circulación de CO<sub>2</sub>) puede combinarse en la disposición de mezcla 250 antes de la introducción en la cámara de combustión 220. Aunque se ilustra una cámara de combustión individual en la figura 5, se entiende que se puede utilizar una pluralidad de cámaras de combustión en sistemas y métodos de acuerdo con la presente invención, como se ejemplifica, además, aquí. Por lo tanto, aunque la siguiente descripción puede hacerse en referencia a una cámara de combustión individual, se entiende que las condiciones de trabajo descritas pueden aplicarse de manera independiente a dos o más cámaras de combustión en el mismo ciclo.

En varias formas de realización, puede ser deseable que los materiales que entran en la cámara de combustión exhiban características físicas específicas que pueden facilitar la operación eficiente deseable del método de generación de potencia. Por ejemplo, en ciertas formas de realización, puede ser deseable que el CO<sub>2</sub> en el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> sea introducido en la cámara de combustión a una presión y/o temperatura definidas. Específicamente, puede ser beneficioso que el CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión tenga una presión de al menos aproximadamente 8 MPa. En otras formas de realización, el CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión puede estar a una presión de al menos aproximadamente 10 MPa, al menos aproximadamente 12 MPa, al menos aproximadamente 14 MPa, al menos aproximadamente 15 MPa, al menos aproximadamente 16 MPa, al menos aproximadamente 18 MPa, al menos aproximadamente 20 MPa, al menos aproximadamente 22 MPa, al menos aproximadamente 24 MPa, o al menos aproximadamente 25 MPa. En otras formas de realización, la presión puede ser de aproximadamente 8 MPa a aproximadamente 50 MPa, de aproximadamente 12 MPa a aproximadamente 50 MPa, de aproximadamente 15 MPa a aproximadamente 50 MPa, de aproximadamente 20 MPa a aproximadamente 50 MPa, de aproximadamente 22 MPa a aproximadamente 50 MPa, de aproximadamente 22 MPa a aproximadamente 45 MPa, de aproximadamente 22 MPa a aproximadamente 40 MPa, de aproximadamente 25 MPa a aproximadamente 40 MPa, o de aproximadamente 25 MPa a aproximadamente 35 MPa. Además, puede ser beneficioso que el CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión pueda estar a una temperatura de al menos aproximadamente 250 °C, al menos aproximadamente 300 °C, al menos aproximadamente 350 °C, al menos aproximadamente 400 °C, al menos aproximadamente 450 °C, al menos aproximadamente 500 °C, al menos aproximadamente 550 °C, al menos aproximadamente 600 °C, al menos aproximadamente 650 °C, al menos aproximadamente 700 °C, al menos aproximadamente 750 °C, al menos aproximadamente 800 °C, al menos aproximadamente 850 °C, o al menos aproximadamente 900 °C.

En algunas formas de realización, puede ser deseable que el combustible introducido en la cámara de combustión sea proporcionado en condiciones específicas. Por ejemplo, en ciertas formas de realización, puede ser deseable que el combustible que contiene carbono sea introducido en la cámara de combustión a una presión y/o temperatura definidas. En algunas formas de realización, el combustible que contiene carbono puede ser introducido en la cámara de combustión en condiciones que son idénticas o sustancialmente similares al fluido de circulación de CO<sub>2</sub>. La frase "condiciones sustancialmente similares" puede significar un parámetro de condición que está dentro de 5 %, dentro de 4 %, dentro de 3 %, dentro de 2 % o dentro de 1 % del parámetro de condición referenciado descrito aquí (por ejemplo, el parámetro de condición para el fluido de circulación de CO<sub>2</sub>). En ciertas formas de realización, el combustible que contiene carbono puede mezclarse con el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> antes de la introducción en la cámara de combustión. En tales formas de realización sería esperado que el combustible que contiene carbono y el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> estuvieran en condiciones idénticas o sustancialmente similares (que específicamente pueden comprender las condiciones descritas en relación al fluido de circulación de CO<sub>2</sub>). En otras formas de realización, el combustible que contiene carbono puede introducirse en la cámara de combustión separadamente del fluido de circulación de CO<sub>2</sub>. En tales casos, el combustible que contiene carbono puede ser introducido todavía a una presión como se describe en relación al fluido de circulación de CO<sub>2</sub>. En algunas formas de realización, puede ser útil mantener el combustible que contiene carbono a una temperatura que es diferente de la temperatura del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> antes de la introducción en la cámara de combustión. Por ejemplo, el combustible que contiene carbono puede introducirse en la cámara de combustión a una temperatura de aproximadamente 30 °C a aproximadamente 800 °C, de aproximadamente 35 °C a aproximadamente 700 °C, de aproximadamente 40 °C a aproximadamente 600 °C, de aproximadamente 45 °C a aproximadamente 500 °C, de aproximadamente 50 °C a aproximadamente 400 °C, de aproximadamente 55 °C a aproximadamente 300 °C, de aproximadamente 60 °C a aproximadamente 200 °C, de aproximadamente 65 °C a aproximadamente 175 °C, o de aproximadamente 70 °C a aproximadamente 150 °C.

En otras formas de realización, puede ser deseable que el O<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión sea proporcionado en condiciones específicas. Tales condiciones pueden ser incidentes en el método de proporcionar el O<sub>2</sub>. Por ejemplo, puede ser deseable proporcionar el O<sub>2</sub> a una presión específica. Puede ser beneficioso que el O<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión tenga una presión de al menos aproximadamente 8 MPa. En otras formas de realización, el O<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión puede estar a una presión de al menos aproximadamente 10 MPa, al menos aproximadamente 12 MPa, al menos aproximadamente 14 MPa, al menos aproximadamente 15 MPa, al menos aproximadamente 16 MPa, al menos aproximadamente 18 MPa, al menos aproximadamente 20 MPa, al menos aproximadamente 22 MPa, al menos aproximadamente 24 MPa, al menos aproximadamente 25 MPa, al menos aproximadamente 30 MPa, al menos aproximadamente 35 MPa, al menos aproximadamente 40 MPa, al menos aproximadamente 45 MPa, o al menos aproximadamente 50 MPa. La provisión del O<sub>2</sub> puede comprender el uso de un separador de aire (o separador de oxígeno), tal como un concentrador de O<sub>2</sub>

criogénico, un separador de transporte de O<sub>2</sub>, o cualquier aparato similar, tal como un separador de transporte de iones de O<sub>2</sub> para separar O<sub>2</sub> del aire ambiental. De forma separada, o en combinación con ella, la provisión de O<sub>2</sub> puede incluir presurizar el O<sub>2</sub> para conseguir la presión deseada, como se ha descrito anteriormente. Tal acción puede causar calentamiento del O<sub>2</sub>. En algunas formas de realización, puede ser deseable que el O<sub>2</sub> esté a una temperatura deseada que es diferente de la temperatura conseguida inherentemente por presurización del gas. Por ejemplo, puede ser deseable que el O<sub>2</sub> sea proporcionado a la cámara de combustión a una temperatura de 30 °C a aproximadamente 900 °C, de aproximadamente 35 °C a aproximadamente 800 °C, de aproximadamente 40 °C a aproximadamente 700 °C, de aproximadamente 45 °C a aproximadamente 600 °C, de aproximadamente 50 °C a aproximadamente 500 °C, de aproximadamente 55 °C a aproximadamente 400 °C, de aproximadamente 60 °C a aproximadamente 300 °C, de aproximadamente 65 °C a aproximadamente 250 °C, o de aproximadamente 70 °C a aproximadamente 200 °C. En algunas formas de realización, el O<sub>2</sub> puede introducirse en la cámara de combustión en condiciones idénticas o sustancialmente similares a las condiciones del fluido circulante de CO<sub>2</sub> y/o el combustible que contiene carbono. Éste puede resultar de la mezcla de componentes antes de la introducción en la cámara de combustión o puede resultar a partir de métodos específicos de preparación del O<sub>2</sub> para introducción en la cámara de combustión. En formas de realización particulares, el O<sub>2</sub> puede combinarse con una cantidad de O<sub>2</sub> en una proporción molar definida, de manera que el O<sub>2</sub> puede proporcionarse a la misma temperatura de la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub>. Por ejemplo, la combinación podría realizarse a una temperatura por debajo de 100 °C, mientras el CO<sub>2</sub> está a una presión supercrítica. Esto elimina el peligro de combustión asociada con calentamiento de O<sub>2</sub> puro sólo debido al efecto de dilución del CO<sub>2</sub>. Tal mezcla podría estar en una relación CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> de aproximadamente 1:2 a aproximadamente 5:1, de aproximadamente 1:1 a aproximadamente 4:1, o de aproximadamente 1:1 a aproximadamente 3:1.

En algunas formas de realización, puede ser útil que el O<sub>2</sub> suministrado a la cámara de combustión esté sustancialmente purificado (es decir, mejorado en términos del contenido molar de O<sub>2</sub> en relación a otros componentes naturalmente presentes en el aire). En ciertas formas de realización, el O<sub>2</sub> puede tener una pureza mayor que aproximadamente 50 % molar, mayor que aproximadamente 60 % molar, mayor que aproximadamente 70 % molar, mayor que aproximadamente 80 % molar, mayor que aproximadamente 85 % molar, mayor que aproximadamente 90 % molar, mayor que aproximadamente 95 % molar, mayor que aproximadamente 96 % molar, mayor que aproximadamente 97 % molar, mayor que aproximadamente 98 % molar, mayor que aproximadamente 99 % molar, o mayor que aproximadamente 99,5 % molar. En otras formas de realización, el O<sub>2</sub> puede tener una pureza molar de aproximadamente 85 % a aproximadamente 99,6 % molar, de aproximadamente 85 % a aproximadamente 99 % molar, aproximadamente 90 % a aproximadamente 99 % molar, de aproximadamente 90 % a aproximadamente 98 % molar, o de aproximadamente 90 % a aproximadamente 97 % molar. La recuperación general de CO<sub>2</sub> a partir del carbono en el combustible favorece el uso de purezas más altas en el intervalo de al menos 99,5 % molar.

El fluido de circulación de CO<sub>2</sub> puede introducirse en la cámara de combustión en la entrada de la cámara de combustión junto con el CO<sub>2</sub> y el combustible que contiene carbono. Como se ha descrito anteriormente en relación a una cámara de combustión refrigerada por transpiración, sin embargo, el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> puede ser introducido también a la cámara de combustión refrigerada por transpiración como todo o parte del fluido de refrigeración por transpiración dirigido al miembro de transpiración a través de uno o más pasos de suministro de fluido de transpiración formados en la cámara de combustión refrigerada por transpiración. En algunas formas de realización, el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> puede introducirse en la cámara de combustión en la entrada de la cámara de combustión (es decir, junto con el O<sub>2</sub> y el combustible), y el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> puede introducirse también en la cámara de combustión a través del miembro de combustión como todo o parte del fluido de refrigeración por transpiración. En otras formas de realización, el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> puede ser introducido en la cámara de combustión sólo a través del miembro de transpiración como todo o parte del fluido de refrigeración por transpiración (es decir, que no se introduce CO<sub>2</sub> en la entrada de la cámara de combustión con el O<sub>2</sub> y el combustible).

En algunas formas de realización, la invención se puede caracterizar con respecto a la relación de los varios componentes introducidos en la cámara de combustión. Con el fin de conseguir eficiencia máxima de combustión, puede ser útil quemar el combustible que contiene carbono a alta temperatura. La temperatura de combustión y la temperatura de la corriente de producto de combustión que abandona la cámara de combustión, sin embargo, puede ser necesario controlarlas dentro de parámetros definidos. Con esta finalidad, puede ser útil proporcionar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a una relación específica con el combustible para que la temperatura de combustión y/o la temperatura de entrada de la turbina se puedan controlar dentro del intervalo deseado, incrementando al mismo tiempo también la cantidad de energía que se puede convertir en potencia. En formas de realización específicas, esto se puede conseguir ajustando la relación de la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> al carbono en el combustible. La relación deseada puede ser influenciada por la temperatura de entrada deseada de la turbina así como por la diferencia de temperatura entre las corrientes de entrada y de salida en el extremo caliente del intercambiador de calor, como se describe más completamente aquí. La relación se puede describir específicamente como la relación molar del CO<sub>2</sub> en el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> al carbono presente en el combustible que contiene carbono. Para determinar la cantidad molar del CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión, en algunas

formas de realización, todo el contenido de CO<sub>2</sub> proporcionado a la cámara de combustión (es decir, introducido en la entrada con el combustible y el O<sub>2</sub>, así como cualquier CO<sub>2</sub> utilizado como un fluido de refrigeración por transpiración) se incluye en el cálculo. En formas de realización específicas, sin embargo, el cálculo se puede basar solamente en la cantidad molar de CO<sub>2</sub> introducido en la entrada de la cámara de combustión (es decir, excluyendo cualquier CO<sub>2</sub> utilizado como un fluido de refrigeración por transpiración). En formas de realización, en las que se introduce el CO<sub>2</sub> en la cámara de combustión sólo como un fluido de refrigeración por transpiración, el cálculo se basa en el contenido de CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión como el fluido de refrigeración por transpiración. Por lo tanto, la relación puede describirse como el contenido molar de la entrada de CO<sub>2</sub> en la entrada de la cámara de combustión en relación al carbono en la entrada de combustible a la cámara de combustión. Alternativamente, la relación puede describirse como el contenido molar de CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión a través del fluido de refrigeración por transpiración en relación al cambio en el combustible introducido en la cámara de combustión.

En ciertas formas de realización, la relación de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a carbono en el combustible introducido en la cámara de combustión, sobre una base molar, puede ser de aproximadamente 10 a aproximadamente 50 (es decir, de aproximadamente 10 moles de CO<sub>2</sub> por 1 mol de carbono en el combustible a aproximadamente 50 moles de CO<sub>2</sub> por 1 mol de carbono en el combustible). En otras formas de realización, la relación de CO<sub>2</sub> en el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a carbono en el combustible puede ser de aproximadamente 15 a aproximadamente 50, de aproximadamente 20 a aproximadamente 50, de aproximadamente 25 a aproximadamente 50, de aproximadamente 30 a aproximadamente 50, de aproximadamente 15 a aproximadamente 45, de aproximadamente 20 a aproximadamente 45, de aproximadamente 25 a aproximadamente 45, de aproximadamente 30 a aproximadamente 45, de aproximadamente 15 a aproximadamente 40, de aproximadamente 20 a aproximadamente 40, de aproximadamente 25 a aproximadamente 40, o de aproximadamente 30 a aproximadamente 40. En otras formas de realización, la relación de CO<sub>2</sub> en el fluido circulante a carbono en el combustible puede ser al menos aproximadamente 5, al menos aproximadamente 10, al menos aproximadamente 15, al menos aproximadamente 20, al menos aproximadamente 25, o al menos aproximadamente 30.

La relación molar de CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión a carbono presente en el combustible que contiene carbono puede tener un impacto importante sobre la eficiencia térmica del sistema general. Este impacto sobre la eficiencia puede ser impactado también por el diseño y la función de otros componentes del sistema, incluyendo el intercambiador de calor, el separador de agua y la unidad de presurización. La combinación de los varios elementos del sistema y método descritos aquí conduce aquí a la capacidad para conseguir alta eficiencia térmica en las relaciones específicas CO<sub>2</sub>/C. Sistemas y métodos anteriormente conocidos que no incluyen los varios elementos descritos aquí requerirían típicamente una relación molar de CO<sub>2</sub>/C que es significativamente menor que la utilizada en la presente invención para conseguir eficiencias que se aproximan a las conseguidas aquí. Sin embargo, las presente invención ha identificado sistemas y métodos altamente efectivos que exceden a los que se puede utilizar en la técnica conocida. El uso de relaciones molares CO<sub>2</sub>/C de acuerdo con la presente invención es, además, ventajoso para diluir impurezas en la corriente de combustión. Los efectos corrosivos o erosivos de impurezas (por ejemplo, cloruros y azufre) sobre los componentes del sistema se disminuyen de esta manera grandemente. Actualmente no se puede utilizar con alto contenido de cloruro y/o alto contenido de azufre en sistemas conocidos debido a que los productos de combustión de tal carbón (que incluye HCL y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) son demasiado corrosivos y erosivos para que resistan los componentes de la planta de potencia. Muchas otras impurezas (por ejemplo, partículas de ceniza sólidas y materiales que contienen elementos tales como plomo, yodo, antimonio y mercurio) pueden causar también daño interno grave en los componentes de la planta de potencia a altas temperaturas. El efecto diluyente del CO<sub>2</sub> reciclado puede aliviar grandemente o eliminar los efectos perjudiciales de tales impurezas sobre componentes de la planta de potencia. La selección de relaciones molares CO<sub>2</sub>/C puede implicar entonces una consideración compleja de efectos sobre la eficiencia y la erosión y corrosión de los componentes de la planta y del diseño de los componentes del sistema de reciclado de CO<sub>2</sub> y, por lo tanto, las relaciones molares CO<sub>2</sub>/C incrementadas con una alta eficiencia térmica que podría no haber sido prevista por la técnica conocida. Las relaciones molares CO<sub>2</sub>/C altas proporcionan, por lo tanto, al menos las ventajas mencionadas anteriormente.

De manera similar, puede ser útil controlar el contenido de O<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión. Esto puede depender particularmente de la naturaleza de la operación de la cámara de combustión, Como se describe aquí más completamente, los métodos y sistemas de la invención pueden permitir la operación en un modo totalmente oxidante, un modo totalmente reductor, o variaciones a ambos. En un modo totalmente oxidante, la cantidad de O<sub>2</sub> proporcionada a la cámara de combustión sería con preferencia al menos una cantidad estequiométrica necesaria para conseguir la oxidación completa del combustible que contiene carbono. En ciertas formas de realización, la cantidad de O<sub>2</sub> proporcionada estaría en exceso de la cantidad estequiométrica indicada en y al menos aproximadamente 0,1 % molar, al menos aproximadamente 0,25 % molar, al menos aproximadamente 0,5 % molar, al menos aproximadamente 1 % molar, al menos aproximadamente 2 % molar, al menos aproximadamente 3 % molar, al menos aproximadamente 4 % molar, o al menos aproximadamente 5 % molar. En otras formas de realización, estaría en exceso de la cantidad estequiométrica indicada en aproximadamente 0.1 % a aproximadamente 5 % molar, de aproximadamente 0,25 % a aproximadamente 4 % molar, o de aproximadamente

0,5 % a aproximadamente 3 % molar. En el modo totalmente reductor, la cantidad de O<sub>2</sub> proporcionada a la cámara de combustión sería con preferencia una cantidad estequiométrica necesaria para convertir el combustible que contiene carbono a los componentes H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, y NH<sub>3</sub> más un exceso de al menos aproximadamente 0,1 % molar, al menos aproximadamente 0,25 % molar, al menos aproximadamente 0,5 % molar, al menos aproximadamente 1 % molar, al menos aproximadamente 2 % molar, al menos aproximadamente 3 % molar, al menos aproximadamente 4 % molar, o al menos aproximadamente 5 % molar. En otras formas de realización, la cantidad de O<sub>2</sub> proporcionada estaría en exceso de la cantidad estequiométrica indicada en aproximadamente 0,1 % a aproximadamente 5 % molar, de aproximadamente 0,25 % a aproximadamente 4 % molar, o de aproximadamente 0,5 % a aproximadamente 3 % molar.

Los métodos de la invención se pueden caracterizar, en algunas formas de realización en relación al estado físico del CO<sub>2</sub> a través de las varias etapas en el proceso. Se reconoce el CO<sub>2</sub> como existente en varios estados dependiendo de las condiciones físicas del material. El CO<sub>2</sub> tiene un punto triple en 0,518 MPa y -56.6 °C, pero el CO<sub>2</sub> tiene también una presión y temperatura críticas de 7,38 MPa y 31,1 °C. Más allá de este punto crítico, el CO<sub>2</sub> existe como un fluido supercrítico, y la presente invención se ha dado cuenta de la capacidad para incrementar al máximo la eficiencia de generación de potencia manteniendo el CO<sub>2</sub> en un estado específico en puntos específicos en el ciclo. En formas de realización específicas, el CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión está con preferencia en forma de un fluido supercrítico.

Se entiende que la eficiencia de un sistema o método de generación de potencia describe la relación de salida de energía por el sistema o método a la entrada de energía en el sistema o método. En el caso de un sistema o método de producción de potencia, la eficiencia se describe a menudo como la relación de la salida de electricidad o potencia (por ejemplo, en megavatios o Mw) a la rejilla del consumidor a la energía térmica total de menor valor calefactor del combustible quemado para generar la electricidad (o potencia). Esta relación se puede referir entonces como la eficiencia neta del sistema o método (sobre una base LHV). Esta eficiencia puede tener en cuenta toda la energía requerida para procesos internos del sistema o método, incluyendo la producción de oxígeno purificado (por ejemplo, a través de una unidad de separación de aire), presurización de CO<sub>2</sub> para transporte a una tubería presurizada y otras condiciones del sistema o del método que requieran la entrada de energía.

En varias formas de realización, los sistemas y métodos de la presente invención pueden hacer uso de manera predominante de CO<sub>2</sub> como un fluido de trabajo en un ciclo, en el que se quema combustible que contiene carbono (es decir, en una cámara de combustión) en O<sub>2</sub> sustancialmente puro a una presión en exceso de la presión crítica de O<sub>2</sub> para producir una corriente de producto de la combustión. Esta corriente se expande a través de una serie de turbinas y entonces se pasa a través de un intercambiador de calor de recuperador. En el intercambiador de calor, el escape de la turbina precalienta un fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado en un estado supercrítico. El fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado es introducido en la cámara de combustión donde se mezcla con los productos de la combustión del combustible que contiene carbono para dar un flujo total a una temperatura de entrada máxima definida de la turbina. La invención proporciona eficiencia excelente al menos en parte debido al reconocimiento de los beneficios de reducir al mínimo la diferencia de temperatura en el extremo caliente del intercambiador de calor del recuperador. Esta reducción al mínimo se puede conseguir utilizando una fuente de calor de nivel de baja temperatura para calentar una porción del CO<sub>2</sub> reciclado antes de la introducción en la cámara de combustión. A estos niveles inferiores de temperatura, el calor específico y la densidad del CO<sub>2</sub> supercrítico son muy altos, y este calentamiento extra puede permitir que el flujo de escape de la turbina precaliente el CO<sub>2</sub> hasta una temperatura mucho más alta, y esto puede reducir significativamente la diferencia de temperatura en el extremo caliente del intercambiador de calor de recuperador. Fuentes de calor a baja de temperatura útiles en formas de realización específicas son los compresores de aire utilizando en la planta de separación de aire criogénico accionado adiabáticamente o el flujo de escape caliente desde una turbina de gas convencional. En formas de realización específicas de la presente invención, la diferencia de la temperatura en el extremo caliente del intercambiador de calor de recuperador es inferior a aproximadamente 50 °C, y con preferencia está en el intervalo de aproximadamente 10 °C a aproximadamente 30 °C. El uso de una relación de baja presión (por ejemplo, por debajo de aproximadamente 12) es otro factor que puede incrementar la eficiencia. El uso de CO<sub>2</sub> como un fluido de trabajo acoplado con la relación de baja presión (por ejemplo, aproximadamente 12) es otro factor que puede incrementar la eficiencia. El uso de CO<sub>2</sub> como un fluido de trabajo acoplado con la relación de baja presión reduce la pérdida de energía al elevar la presión del escape refrigerado de la turbina a la presión de reciclado. Otra ventaja es la capacidad para producir la cantidad de carbono en el combustible convertido a CO<sub>2</sub> como un fluido de alta presión por encima de la presión supercrítica de CO<sub>2</sub> a la presión de la tubería (típicamente de aproximadamente 10 MPa a aproximadamente 20 MPa) con consumo muy pequeño de potencia parásita adicional próximo al 100 % de la captura de carbono desde el combustible. Tales parámetros del sistema y método se describen, además, aquí todavía con más detalle. Además, se pueden identificar varias combinaciones de cámaras de combustión, turbinas, e intercambio de calor para proporcionar eficiencias y reducciones de costes todavía más que un ejemplo básico de los sistemas y métodos descritos actualmente. Ciertas formas de realización de tales combinaciones se describen aquí; no obstante, la invención se describe primero a continuación en relación a elementos básicos de los sistemas y métodos para proporcionar una descripción completa de la naturaleza de la invención y, en particular, sus varios componentes que pueden impartir ventajas distintivas sobre la técnica conocida. Posteriormente, todavía más

ventajas de los sistemas y métodos descritos actualmente que pueden conocerse a través de combinaciones adecuadas de elementos y condiciones de trabajo del sistema que resultan de la presente invención se ejemplifican en formas de realización adicionales.

5 Volviendo a la figura 5, el combustible que contiene carbono 254 introducido en la cámara de combustión 220 junto con el O<sub>2</sub> 242 y el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> 236 es quemado para proporcionar una corriente de producto de la combustión 40. En formas de realización específicas, la cámara de combustión 220 puede ser una cámara de combustión refrigerada por transpiración, o cualquier otra cámara de combustión adecuada, tales como las ya descritas anteriormente. La temperatura de la combustión puede variar dependiendo de los parámetros específicos del proceso - por ejemplo, el tipo de combustible que contiene carbono utilizado, la relación molar de CO<sub>2</sub> a O<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión. En formas de realización específicas, la temperatura de la combustión es una temperatura como se ha descrito anteriormente en relación a la descripción de la cámara de combustión refrigerada por transpiración. En formas de realización particularmente preferidas, pueden ser ventajosas temperaturas de la combustión en exceso de aproximadamente 1.300 °C, como se describe aquí.

15 También puede ser útil controlar la temperatura de la combustión de tal manera que la corriente de producto de la combustión que abandona la cámara de combustión tiene una temperatura deseada. Por ejemplo, puede ser útil que la corriente de producto de la combustión que sale de la cámara de combustión tenga una temperatura de al menos aproximadamente 700 °C, al menos aproximadamente 750 °C, al menos aproximadamente 800 °C, al menos aproximadamente 850 °C, al menos aproximadamente 900 °C, al menos aproximadamente 950 °C, al menos aproximadamente 1000 °C, al menos aproximadamente 1.050 °C, al menos aproximadamente 1.100 °C, al menos aproximadamente 1.200 °C, al menos aproximadamente 1.300 °C, al menos aproximadamente 1.400 °C, al menos aproximadamente 1.500 °C, o al menos aproximadamente 1.600 °C. En algunas formas de realización, la corriente de producto de la combustión puede tener una temperatura de aproximadamente 700 °C a aproximadamente 1.600 °C, de aproximadamente 800 °C a aproximadamente 1.600 °C, de aproximadamente 850 °C a aproximadamente 1.500 °C, de aproximadamente 900 °C a aproximadamente 1.400 °C, de aproximadamente 950 °C a aproximadamente 1,350 °C, o de aproximadamente 1,000 °C a aproximadamente 1.300 °C.

30 Como se ha descrito anteriormente, la presión del CO<sub>2</sub> a través del ciclo de producción de potencia puede ser un parámetro crítico para incrementar al máximo la eficiencia del ciclo. Aunque puede ser importante que los materiales introducidos en la cámara de combustión tengan una presión definida específicamente, asimismo puede ser importante que la corriente de producto de la combustión tenga una presión definida. Específicamente, la presión de la corriente de producto de la combustión puede estar relacionada con la presión del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> que se introduce en la cámara de combustión. En formas de realización específicas, la presión de la corriente de producto de la combustión puede ser al menos aproximadamente 90 % de la presión de CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión - es decir, en el fluido en circulación. En otras formas de realización, la presión de la corriente de producto de la combustión puede ser al menos aproximadamente 91 %, al menos aproximadamente 92 %, al menos aproximadamente 93 %, al menos aproximadamente 94 %, al menos aproximadamente 95 %, al menos aproximadamente 96 %, al menos aproximadamente 97 %, al menos aproximadamente 98 %, o al menos aproximadamente 99 % de la presión del CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión.

45 La composición química de la corriente de producto de la combustión que sale desde la cámara de combustión puede variar dependiendo del tipo de combustible que contiene carbono utilizado. De manera importante, la corriente de producto de la combustión comprenderá CO<sub>2</sub> que será reciclado y reintroducido en la cámara de combustión o en otros ciclos, como se describe más completamente a continuación. Además, el CO<sub>2</sub> en exceso (incluyendo el CO<sub>2</sub> producido por combustión del combustible) puede ser extraído desde el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> (particularmente a una presión adecuada para transferencia directa a una tubería de CO<sub>2</sub>) para recogida u otra disposición que no incluye la liberación a la atmósfera. En otras formas de realización, la corriente de producto de la combustión puede comprender uno o más de vapor de agua SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, HCl, NO, NO<sub>2</sub>, Hg, exceso de O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar, y posiblemente otros contaminantes que se puede preajustar en el combustible que es quemado. Estos materiales presentes en la corriente de producto de la combustión pueden persistir en la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub>, si no se retiran, tal como por procesos descritos aquí. Tales materiales presentes, además del CO<sub>2</sub>, pueden referirse aquí como "componentes secundarios".

55 Como se ve en la figura 5, la corriente de producto de la combustión 40 se puede dirigir a una turbina 3420 (que representa una serie de turbinas), en donde la corriente de producto de la combustión 40 se expande para generar potencia por ejemplo, a través de un generador para producir electricidad, que no se muestra en la ilustración). Las turbinas 320 pueden tener una entrada para recibir la corriente de producto de la combustión 40 y una salida para liberación de una corriente de descarga de la turbina 50 que comprende CO<sub>2</sub>. Aunque se muestra una sola turbina 320 en la figura 5, se entiende que la invención comprende el uso de una serie de turbinas, estando las turbinas múltiples opcionalmente separadas por uno o más componentes, tales como otro componente de la combustión, un componente de compresión, un componente de separador o similar. Además de la descripción adicional proporcionada de otra manera aquí, las ventajas asociadas con tales formas de realización de turbinas múltiples se pueden reconocer particularmente a la luz de la forma de realización ejemplar descrita en el Ejemplo 3.

De nuevo, los parámetros del proceso pueden controlarse estrechamente en esta etapa para incrementar al máximo la eficiencia del ciclo. La eficiencia de la planta de potencia de gas natural existente es críticamente dependiente de las temperaturas de entrada de la turbina. Por ejemplo, se ha realizado trabajo extensivo como gran coste para conseguir tecnología de la turbina que permite temperaturas de entrada tan altas como aproximadamente 1.350 °C. Cuanto más alta es la temperatura de entrada de la turbina, más alta es la eficiencia de la planta, pero también es más costosa la turbina y potencialmente, más corto es el tiempo de vida útil. Algunos servicios públicos se resisten a pagar los precios más altos y tienen también el riesgo de vida más corta. Aunque la presente invención puede hacer uso de tales turbinas para incrementar todavía más la eficiencia en algunas formas de realización, esto no se requiere. En formas de realización específicas, los presentes sistemas y métodos pueden conseguir la eficiencia deseada, utilizando al mismo tiempo temperatura de entrada de la turbina en un intervalo mucho más bajo, como se ha descrito anteriormente. Por lo tanto, la invención puede caracterizarse en términos de conseguir una eficiencia específica, como se describe aquí, proporcionando al mismo tiempo una corriente de producto de la combustión a una entrada de la turbina a una temperatura definida, como se describe aquí, que puede ser significativamente menor que las temperaturas reconocidas en la técnica como necesarias para conseguir la misma eficiencia con el mismo combustible.

Como se ha indicado anteriormente, la corriente de producto de la combustión 40 que abandona la cámara de combustión 220 tiene con preferencia una presión que está estrechamente alineada a la presión de la presión del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> que entra en la cámara de combustión 220. En formas de realización específicas, la corriente de producto de la combustión 40 está, por lo tanto, a una temperatura y presión tales que el CO<sub>2</sub> presente en la corriente está en un estado fluido supercrítico. Cuando las corrientes de producto de la combustión 40 se expande a través de las turbinas 320, se reduce la presión de la corriente. Con preferencia, esta caída de la presión es controlada de tal manera que la corriente de producto de la combustión 40 está en una relación definida con la presión de la corriente de descarga de la turbina 50. En ciertas formas de realización, la relación de la presión de la corriente de producto de la combustión en la entrada de las turbinas comparada con la corriente de descarga de la turbina en la salida de las turbinas es al menos aproximadamente 20. Ésta se puede definir como la relación de la presión de entrada ( $P_p$ ); a la presión de salida ( $O_p$ ) (es decir,  $(P_p/O_p)$ ).

En formas de realización específicas, puede ser deseable que la corriente de descarga de la turbina esté en condiciones tales que el CO<sub>2</sub> en la corriente no está ya en un estado supercrítico, sino que está más bien en un estado gaseoso. Por ejemplo, proporcionar el CO<sub>2</sub> en un estado gaseoso puede facilitar la eliminación de cualquier componente secundario. En algunas formas de realización, la corriente de descarga de la turbina tiene una presión que está por debajo de la presión donde el CO<sub>2</sub> estaría en un estado supercrítico. Con preferencia, la corriente de descarga de la turbina tiene una presión que es menor que aproximadamente 7,3 MPa, es menor que o igual a aproximadamente 7 MPa, menor que o igual a aproximadamente 6,5 MPa, menor que o igual a aproximadamente 6 MPa, menor que o igual a aproximadamente 5,5 MPa, menor que o igual a aproximadamente 5 MPa, menor que o igual a aproximadamente 4,5 MPa, menor que o igual a aproximadamente 4 MPa, menor que o igual a aproximadamente 3,5 MPa, menor que o igual a aproximadamente 3 MPa, menor que o igual a aproximadamente 2,5 MPa, menor que o igual a aproximadamente 2 MPa, o menor que o igual a aproximadamente 1,5 MPa. En otras formas de realización, la presión de la corriente de descarga de la turbina puede ser de aproximadamente 1,5 MPa a aproximadamente 7 MPa, de aproximadamente 3 MPa a aproximadamente 7 MPa, o de aproximadamente 4 MPa a aproximadamente 7 MPa. Con preferencia, la presión de la corriente de descarga de la turbina es menor que la presión de condensación de CO<sub>2</sub> a las temperaturas de refrigeración que se encuentran por la corriente (por ejemplo, refrigeración ambiente). Por lo tanto, es preferible de acuerdo con la invención que el CO<sub>2</sub> curso abajo de las turbinas 320 (y con preferencia curso arriba desde la unidad de presurización 620) se mantenga en un estado gaseoso y no se permita que alcance condiciones en las que se puede formar CO<sub>2</sub> líquido.

Además de las ventajas que resultan de la utilización de las relaciones de presión diferencial descritas anteriormente, se pueden proporcionar otras ventajas cuando se utilizan múltiples turbinas en los sistemas y métodos de la invención. En particular, las relaciones de la presión anteriores se pueden aplicar sólo a una turbina individual en la serie. Una u otras más turbinas en la serie pueden adaptarse para proporcionar una descarga en un extremo bajo de los intervalos de la presión descritos anteriormente. Por ejemplo, en formas de realización donde una turbina proporciona una descarga a una presión menor que o igual a la presión supercrítica de CO<sub>2</sub> o incluso menor que o igual a 1,5 MPa, la turbina o turbinas pueden adaptarse para descargar corrientes a presiones que están próximas o a presión ambiente.

Aunque el paso de la corriente de producto de la combustión a través de las turbinas puede conducir a una cierta cantidad de reducción de la temperatura, la corriente de descarga de la turbina tendrá típicamente una temperatura que podría impedir la retirada de eventuales componentes secundarios presentes en la corriente de producto de la combustión. Por ejemplo, la corriente de descarga de la turbina puede tener una temperatura de aproximadamente 500 °C a aproximadamente 1.000 °C, de aproximadamente 600 °C a aproximadamente 1000 °C, de aproximadamente 700 °C a aproximadamente 1.000 °C, o de aproximadamente 800 °C a aproximadamente 1000 °C. Debido a la temperatura relativamente alta de la corriente de producto de la combustión, puede ser beneficioso

que la turbina esté formada de materiales capaces de resistir tales temperaturas. También puede ser útil que las turbinas comprenden un material que proporciona buena resistencia química al tipo de materiales secundarios que pueden estar presentes en la corriente de producto de la combustión.

5 En algunas formas de realización, por lo tanto, puede ser útil pasar la corriente de descarga de la turbina 50 a través de al menos un intercambiador de calor 420 que refrigera la corriente de descarga de la turbina 50 y proporciona una corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> que tiene una temperatura en un intervalo definido. En formas de realización específicas el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> 60 que abandona el intercambiador de calor 420 (o el intercambiador de calor final en la serie cuando se utilizan dos o más intercambiadores de calor) tiene una  
10 temperatura de menos de aproximadamente 200 °C, de menos de aproximadamente 150 °C, de menos de aproximadamente 125 °C, de menos de aproximadamente 100 °C, de menos de aproximadamente 95 °C, de menos de aproximadamente 90 °C, de menos de aproximadamente 85 °C, de menos de aproximadamente 80 °C, de menos de aproximadamente 75 °C, de menos de aproximadamente 70 °C, de menos de aproximadamente 65 °C, de menos de aproximadamente 60 °C, de menos de aproximadamente 55 °C, de menos de aproximadamente 50 °C, de menos de aproximadamente 45 °C, o de menos de aproximadamente 40 °C.

Como se ha indicado anteriormente, puede ser beneficioso que la presión de la descarga de la turbina tenga una presión en una relación específica con la presión de la corriente de producto de la combustión. En formas de realización específicas, la corriente de descarga de la turbina pasará directamente a través de uno o más intercambiadores de calor descritos aquí sin pasar a través de cualquier otro componente del sistema. Por lo tanto, la relación de la presión se puede describir en relación con la relación de la presión de la corriente de producto de la combustión cuando sale desde la cámara de combustión comparada con la presión de la corriente que entra en el extremo caliente del intercambiador de calor (o el primer intercambiador de calor cuando se utiliza una serie de intercambiadores de calor). De nuevo esta relación de la presión es inferior a aproximadamente 12, En otras formas de realización, la relación de la presión de la corriente de producto de la combustión a la presión que entra en el intercambiador de calor puede ser inferior a aproximadamente 11, inferior a aproximadamente 10, inferior a aproximadamente 9, inferior a aproximadamente 8, o inferior a aproximadamente 7. En otras formas de realización, esta relación de la presión puede ser de aproximadamente 1,5 a aproximadamente 10, de aproximadamente 2 a aproximadamente 9, de aproximadamente 2 a aproximadamente 8, de aproximadamente 3 a aproximadamente 8, o de aproximadamente 4 a aproximadamente 8.

Una corriente de descarga de la turbina (o una porción de ella) pasa directamente a una cámara de combustión y entonces a una o más turbinas adicionales (y, opcionalmente, a una u otras más cámaras de combustión) antes de pasar a través de un intercambiador de calor. Además, se entiende que una corriente de descarga de una turbina en serie como se describe aquí puede estar a una temperatura más baja que la corriente de entrada de la turbina.

Aunque el uso de una cámara de combustión refrigerada por transpiración permite combustión a alto calor, los sistemas y métodos de la presente invención se pueden caracterizar por la capacidad de proporcionar también una corriente de descarga de la turbina a un intercambiador de calor (o serie de intercambiadores de calor) a una temperatura que es suficientemente baja para reducir los costes asociados con el sistema. Incrementar el periodo de vida útil del (los) intercambiador(es) de calor y mejorar el rendimiento y la fiabilidad del sistema. En formas de realización específicas, la temperatura de trabajo más alta para un intercambiador de calor en un sistema o método de acuerdo con la presente invención es inferior a aproximadamente 1.100 °C, inferior a aproximadamente 1000 °C, inferior a aproximadamente 975 °C, inferior a aproximadamente 950 °C, inferior a aproximadamente 925 °C o inferior a aproximadamente 900 °C.

En ciertas formas de realización, puede ser particularmente útil que el intercambiador de calor 420 comprende al menos dos intercambiadores de calor en serie para recibir la corriente de descarga de la turbina 50 y refrigerarla hasta una temperatura deseada. El tipo de intercambiador de calor utilizado puede variar dependiendo de las condiciones de la corriente que entra en el intercambiador de calor. Por ejemplo, la corriente de descarga de la turbina 50 puede estar a una temperatura relativamente alta, como se ha descrito anteriormente, y por lo tanto, puede ser útil que el intercambiador de calor que recibe directamente la corriente de descarga de la turbina 50 esté formado de materiales de alto rendimiento diseñados para resistir condiciones extremas. Por ejemplo, el primer intercambiador de calor en la serie de intercambiadores de calor puede comprender un aleación de INCONEL® o material similar. Con preferencia, el primer intercambiador de calor en la serie comprende un material capaz de resistir una temperatura de trabajo consistente de al menos aproximadamente 700 °C, al menos aproximadamente 750 °C, al menos aproximadamente 800 °C, al menos aproximadamente 850 °C, al menos aproximadamente 900 °C, al menos aproximadamente 950 °C, al menos aproximadamente 1000 °C, al menos aproximadamente 1.100 °C, o al menos aproximadamente 1.200 °C. También puede ser útil que uno o más de los intercambiadores de calor comprenden un material que proporciona buena resistencia química al tipo de materiales secundarios que pueden estar presentan en la corriente de producto de la combustión. Las aleaciones de INCONEL® están disponibles de Special Metals Corporation, y algunas formas de realización pueden incluir aleaciones basadas en níquel-croo austenítico. Ejemplos de aleaciones que pueden ser útiles incluyen INCONEL® 600, INCONEL® 601, INCONEL® 601GC, INCONEL® 603XL, INCONEL® 617, INCONEL® 625, INCONEL® 625LCF, INCONEL® 686, INCONEL®

690, INCONEL® 693, INCONEL® 706, INCONEL® 718, INCONEL® 718SPF™, INCONEL® 722, INCONEL® 725, INCONEL® 740, INCONEL® X-750, INCONEL® 751, INCONEL® MA754, INCONEL® MA758, INCONEL® 783, INCONEL® 903, INCONEL® N06230, INCONEL® C-276, INCONEL® G-3, INCONEL® HX, INCONEL® 22. Un ejemplo de un diseño de intercambiador de calor favorable es un intercambiador de calor de placa compacta adherida por difusión con aletas fresadas químicamente en las placas fabricadas en un material a alta temperatura, tal como una de las aleaciones descritas aquí. Intercambiadores de calor adecuados pueden incluir aquéllos disponibles bajo la marca HEATRIC® (disponible de Meggitt USA, Houston, TX).

El primer intercambiador de calor en la serie puede transferir suficientemente calor desde la corriente de descarga de la turbina, de tal manera que uno o más intercambiadores de calor presentes en la serie pueden estar formados de materiales más convencionales - por ejemplo acero inoxidable. En formas de realización específicas, al menos dos intercambiadores de calor o al menos tres intercambiadores de calor se utilizan en una serie para refrigerar la corriente de descarga de la turbina a la temperatura deseada. La utilidad de usar intercambiadores de calor múltiples en una serie puede verse particularmente en la descripción siguiente con respecto a la transferencia de calor desde la corriente de descarga de la turbina al fluido de circulación de CO<sub>2</sub> para re-calentar el fluido de circulación antes de la introducción en la cámara de combustión.

En algunas formas de realización, los métodos y sistemas pueden caracterizarse por que son un método o sistema de combustión de una fase. Esto se puede conseguir a través del uso de una cámara de combustión de alta eficiencia, tal como una cámara de combustión refrigerada por transpiración descrita anteriormente. Esencialmente, el combustible puede quemarse sustancialmente completamente en la cámara de combustión individual, de tal manera que es innecesario proporcionar una serie de cámaras de combustión para quemar completamente el combustible. De acuerdo con ello, en algunas formas de realización, los métodos y sistemas de la invención se pueden describir de tal manera que la cámara de combustión refrigerada por transpiración es la única cámara de combustión. En otras formas de realización, los métodos y sistemas se pueden describir de tal forma que la combustión ocurre sólo en la cámara de combustión refrigerada por transpiración individual antes de pasar la corriente de descarga al intercambiador de calor. Todavía en otras formas de realización, los métodos y sistemas se pueden describir de tal manera que la corriente de descarga se pasa directamente al intercambiador de calor sin pasar a través de otra cámara de combustión.

Después de la refrigeración, la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> que sale desde el al menos un intercambiador de calor se puede someter a otro procesamiento para separar eventuales componentes secundarios que permanecen en la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> desde la combustión del combustible. Como se muestra en la figura 5, la corriente de fluido de circulación puede ser dirigida hacia una o más unidades de separación. Como se describe con más detalle a continuación, la presente invención se puede caracterizar particularmente por la capacidad para proporcionar un método de alta eficiencia de generación de potencia a partir de la combustión de combustible que contiene carbono sin liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Esto se puede conseguir, al menos en parte, utilizando el CO<sub>2</sub> formado en combustión del combustible que contiene carbono como el fluido circulante en el ciclo de producción de potencia. En algunas formas de realización, sin embargo, la combustión continua y el reciclado de CO<sub>2</sub> como el fluido circulante puede causar una acumulación de CO<sub>2</sub> en el sistema. En tales casos, puede ser útil extraer al menos una porción del CO<sub>2</sub> desde el fluido circulante (por ejemplo, una cantidad aproximadamente equivalente a la cantidad de CO<sub>2</sub> derivado de la combustión del combustible que contiene carbono). Tal extracción de CO<sub>2</sub> se puede desechar por cualquier método adecuado. En formas de realización específicas, el CO<sub>2</sub> se puede dirigir a una tubería para recogida o disposición por medios adecuados, como se describe más adelante.

Puede ser un requerimiento de una especificación del sistema de tubería de CO<sub>2</sub> que el CO<sub>2</sub> que entre en la tubería esté sustancialmente libre de agua para prevenir la corrosión del acero utilizado para la tubería. Aunque se podría introducir CO<sub>2</sub> "húmedo" directamente en una tubería de acero inoxidable de CO<sub>2</sub>, esto no siempre es posible y, de hecho, puede ser más deseable utilizar una tubería de acero al carbono debido a cuestiones de costes. De acuerdo con ello, en ciertas formas de realización, el agua presente en el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> (por ejemplo, agua formada durante la combustión del combustible que contiene carbono y que persiste en la corriente de producto de la combustión, la corriente de descarga de la turbina, y la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub>) se puede eliminar en su mayor parte como una fase líquida desde la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> refrigerada. En formas de realización específicas, esto se puede conseguir proporcionando el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> (por ejemplo, en un estado gaseoso) a una presión que es inferior al punto en el que el CO<sub>2</sub> presente en la mezcla de gas se licua cuando se refrigera la mezcla de gas a la temperatura mínima alcanzada con medios de refrigeración a temperatura ambiente. Por ejemplo, el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> particularmente puede ser proporcionado a una presión inferior a 7,38 MPa durante la separación de componentes secundarios desde allí. Se puede requerir una temperatura todavía más baja si se utilizan medios de refrigeración a una temperatura en el intervalo de temperatura ambiente o sustancialmente inferior a la temperatura ambiente. Esto permite la separación de agua como un líquido y también reduce al mínimo la contaminación de la corriente de circulación de CO<sub>2</sub> purificado que abandona la unidad de separación. Esto puede limitar también la presión de descarga de la turbina a un valor que es inferior a la presión crítica del gas de escape de la turbina. La presión real puede depender de la temperatura de los medios de

refrigeración ambiente disponible. Por ejemplo, si la separación de agua tiene lugar a 30 °C, entonces una presión de 7 MPa permite un margen de 0,38 MPa a la presión de condensación de CO<sub>2</sub>. El fluido de circulación de CO<sub>2</sub> que abandona el intercambiador de calor y entra en la unidad de separación puede proporcionarse a una presión que es sustancialmente la misma que la presión en la salida de la serie de turbinas.

En formas de realización específicas, la corriente de circulación de CO<sub>2</sub> purificado 65 después de la separación de agua no comprende vapor de agua o sustancialmente ningún vapor de agua. En algunas formas de realización, la corriente de circulación de CO<sub>2</sub> purificado se puede caracterizar por que comprende vapor de agua en una cantidad de sólo de menos de 1,5 % sobre una base molar, de menos de 1,25 % sobre una base molar, de menos de 1 % sobre una base molar, de menos de 0,9 % sobre una base molar, o de menos de 0,8 % sobre una base molar, de menos de 0,7 % sobre una base molar, de menos de 0,6 % sobre una base molar, de menos de 0,5 % sobre una base molar, de menos de 0,4 % sobre una base molar, de menos de 0,3 % sobre una base molar, de menos de 0,2 % sobre una base molar, o de menos de 0,1 % sobre una base molar. En algunas formas de realización, la corriente de circulación de CO<sub>2</sub> purificado puede comprender vapor de agua sólo en una cantidad de aproximadamente 0,01 % a aproximadamente 1,5 % sobre una base molar, de aproximadamente 0,01 % a aproximadamente 1 % sobre una base molar, de aproximadamente 0,01 % a aproximadamente 0,75 % sobre una base molar, de aproximadamente 0,01 % a aproximadamente 0,5 % sobre una base molar, de aproximadamente 0,01 % a aproximadamente 0,25 % sobre una base molar, de aproximadamente 0,05 % a aproximadamente 0,5 % sobre una base molar, o de aproximadamente 0,05 % a aproximadamente 0,25 % sobre una base molar.

Puede ser altamente ventajoso proporcionar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en las condiciones de temperatura y de presión definidas anteriormente para facilitar la separación de componentes secundarios, tales como agua. En otras palabras, la presente invención puede preverse particularmente para mantener el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en condiciones deseadas, de tal manera que el CO<sub>2</sub> y el agua en el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> antes de la separación están en estados deseados que facilitan la separación. Proporcionando el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a una presión como se ha descrito anteriormente, se puede reducir la temperatura de la corriente de fluido hasta un punto donde el agua en la corriente estará en un estado líquido y, por lo tanto, será más fácil de separar desde el CO<sub>2</sub> gaseoso.

En ciertas formas de realización, puede ser deseable proporcionar otras condiciones de secado para que el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> purificado esté completamente o sustancialmente libre de agua. Como se ha indicado anteriormente, la separación de agua desde el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en base a diferencias de fase en los materiales puede dejar una porción menor (es decir, baja concentración) de agua permaneciendo en el fluido de circulación de CO<sub>2</sub>. En algunas formas de realización, puede ser aceptable continuar con el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> que tiene la porción de agua permaneciendo allí. En otras formas de realización, puede ser útil someter el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a otro tratamiento para facilitar la retirada de todo o parte del agua remanente. Por ejemplo, una baja concentración de agua se puede retirar por medio de secadores desecantes u otros medios que fueran adecuados a la luz de la presente descripción.

Proporcionar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a las unidades de separación a la presión definida puede ser particularmente beneficioso para incrementar al máximo de nuevo la eficiencia del ciclo de potencia. Específicamente, proporcionar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en el intervalo de presión definido puede permitir que el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> purificado en la fase de gas sea comprimido a una presión alta con consumo mínimo de potencia total. Como se describe a continuación, tal presurización puede requerirse para que parte del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> purificado pueda ser reciclado a la cámara de combustión y parte pueda ser suministrado a una presión requerida en la tubería (por ejemplo, de aproximadamente 10 MPa a aproximadamente 20 MPa). Esto ilustra, además, los beneficios de reducir al mínimo la relación de la presión de entrada a salida de las turbinas de expansión, como se ha descrito anteriormente. Esto funciona para incrementar la eficiencia general del ciclo y también para permitir que la presión de descarga desde las turbinas esté en el intervalo deseable descrito anteriormente para la separación de agua y otros componentes secundarios desde el fluido de circulación de CO<sub>2</sub>.

Una forma de realización del flujo del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a través de una unidad de separación 520 se ilustra en la figura 6. Como se ve aquí, la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> desde el intercambiador de calor se puede pasar a través de un intercambiador de calor de agua fría 530 que utiliza agua para retirar adicionalmente calor desde el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> 60 (o cualquier dispositivo que funciona de forma similar) y descargar un fluido de circulación de CO<sub>2</sub> de fase mixta 61, en donde el CO<sub>2</sub> permanece como un gas y el agua en el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> se convierte en una fase líquida. Por ejemplo, el paso del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> 60 a través del intercambiador de calor de agua fría 530 puede enfriar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a una temperatura inferior a aproximadamente 50 °C, inferior a aproximadamente 55 °C, inferior a aproximadamente 40 °C, inferior a aproximadamente 45 °C, inferior a aproximadamente 40 °C, o inferior a aproximadamente 30 °C. Con preferencia, la presión del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> es sustancialmente inalterada por el paso a través del intercambiador de calor de agua fría 530. El fluido de circulación de CO<sub>2</sub> de fase mixta 51 es dirigida a una unidad de separación de agua 540, en donde se descarga una corriente de agua líquida 62a desde el separador 520. Asimismo, la salida de la unidad de separación de agua 540 es la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> enriquecida 62d. Esta corriente enriquecida puede salir directamente desde el separador 520 como la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub>

enriquecida 65. En formas de realización alternativas (como se ilustra por las corrientes y componente representados por líneas de trazos), la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> enriquecida 62d puede ser dirigida a una o más unidades de separación 550 adicionales para retirada de otros componentes secundarios, como se describe más completamente a continuación. En formas de realización específicas, cualquier componente secundario adicional del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> puede ser retirado después de la eliminación del agua. El fluido de circulación de CO<sub>2</sub> sale entonces de las una o más unidades de separación adicionales como el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> purificado 65. En algunas formas de realización, sin embargo, el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> de fase mixta 61 puede ser dirigido primero para retirada de uno o más componentes secundarios antes de la retirada de agua, y la corriente parcialmente purificada puede ser dirigida entonces a la unidad de separación de agua 540. Un experto en la técnica provisto con esta descripción puede concebir las varias combinaciones de separadores que pueden ser deseables, y todas estas combinaciones están destinadas a ser incorporadas por la presente invención.

Como se ha indicado anteriormente, además de agua, el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> puede contener otros componentes secundarios, tales como impurezas derivadas del combustible, derivadas de la combustión, y derivadas del oxígeno. Tales componentes secundarios se pueden retirar también del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> gaseoso refrigerado en y aproximadamente al mismo tiempo que la separación de agua. Por ejemplo, además del vapor de agua, se pueden eliminar componentes secundarios tales como as SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, HCl, NO, NO<sub>2</sub>, Hg, y en exceso O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y Ar. Estos componentes secundarios del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> (reconocidos a menudo como impurezas o contaminantes) se pueden retirar todos desde el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> refrigerado utilizando métodos apropiados (por ejemplo, métodos definidos en la Publicación de Solicitud de Patente de los EE.UU. N° 2008/0226515 y las Solicitudes de Patentes Europeas Nos. EP1952874 y EP1953486). SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub> pueden convertirse 100 % a ácido sulfúrico, mientras que >95 % del NO y NO<sub>2</sub> se pueden convertir en ácido nítrico. Cualquier exceso de O<sub>2</sub> presente en el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> puede separarse como una corriente enriquecida para reciclaje opcional a la cámara de combustión. Los gases inertes presentes (por ejemplo, N<sub>2</sub> y Ar) se pueden ventilar a baja presión a la atmósfera. En ciertas formas de realización, el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> puede ser purificado, por lo tanto, de tal manera que el CO<sub>2</sub> derivado del carbono en el combustible que es quemado puede suministrarse finalmente como una corriente pura de alta densidad. En formas de realización específicas, el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> purificado puede comprender CO<sub>2</sub> en una concentración de al menos 98,5 % molar, al menos 99 % molar, al menos 99,5 % molar, o al menos 98,8 % molar. Además, el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> puede proporcionarse a una presión deseada para entrada directa en una tubería de CO<sub>2</sub> - por ejemplo, al menos aproximadamente 10 MPa, al menos aproximadamente 15 MPa, o al menos aproximadamente 20 MPa.

Para resumir lo anterior, en una forma de realización, la combustión del combustible que contiene carbono 254 en la presencia de O<sub>2</sub> 242 y un fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en una cámara de combustión adecuada puede formar una corriente de producto de combustión 40 que tiene una temperatura y presión relativamente altas. Esta corriente de producto de la combustión 40 que comprende una cantidad relativamente grande de CO<sub>2</sub> se puede pasar a través de las turbinas 320 para expandir la corriente de producto de la combustión 40, reduciendo de esta manera la presión de la corriente y la generación de potencia. La corriente de descarga de la turbina 50 que abandona la salida de las turbinas 320 está a una presión reducida, pero retiene todavía una temperatura relativamente alta. Debido a los contaminantes e impurezas en la corriente de producto de la combustión, es beneficioso separar tales contaminantes e impurezas para reciclar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> de retorno al sistema. Para conseguir esta separación, la corriente de descarga de la turbina 50 es refrigera por el paso a través de uno o más intercambiadores de calor 420. La separación de los productos secundarios (por ejemplo, agua y otros contaminantes e impurezas) se puede conseguir como se ha descrito anteriormente. Para reciclar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> de retorno a la cámara de combustión, es necesario recalentar y represarizar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub>. En ciertas formas de realización, la presente invención se puede caracterizar por la implementación de etapas específicas del proceso para incrementar al máximo la eficiencia del ciclo de generación de potencia, previniendo al mismo tiempo la descarga de contaminantes (por ejemplo, CO<sub>2</sub>) a la atmósfera. Esta particularidad se puede ver en relación al recalentamiento y represarización del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> purificado que sale de la unidad de separación.

Como se ilustra en la figura 5, el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> purificado 65 que abandona la una o más unidades de separación 520 puede pasarse a través de una o más unidades de presurización 620 (por ejemplo, bombas, compresores o similares) para incrementar la presión del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> purificado 65. En ciertas formas de realización, el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> purificado 65 puede ser comprimido a una presión de al menos aproximadamente 7,5 MPa o al menos aproximadamente 8 MPa. En algunas formas de realización, se puede utilizar una unidad de presurización individual para incrementar la presión del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> purificado hasta la presión deseada descrita aquí para la introducción en la cámara de combustión 220.

En formas de realización específicas, se puede realizar la presurización utilizando una serie de dos o más compresores (por ejemplo, bombas) en la unidad de presurización 620. Tal forma de realización se muestra en la figura 7, en la que el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> 65 presurizado se pasa a través de un primer compresor 630 para comprimir el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> 65 hasta una primera presión (que está con preferencia por encima de la presión crítica del CO<sub>2</sub>) y de esta manera formar la corriente 66. La corriente 66 se puede dirigir a un intercambiador de calor de agua caliente 640 que extrae calor (por ejemplo, calor formado por la acción de presurización del primer compresor) y forma vapor 67, que está con preferencia a una temperatura que está próxima a ambiente. La corriente

67 se puede dirigir a un segundo compresor 650 que se utiliza para presurizar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a una segunda presión que es mayor que la primera presión. Como se describe a continuación, la segunda presión puede ser sustancialmente similar a la presión deseada para el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> cuando entra (o recicla) a la cámara de combustión.

5 En formas de realización específicas, el primer compresor 630 puede utilizarse para incrementar la presión del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> purificado de tal manera que el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> purificado se transforma desde un estado gaseoso a un estado fluido supercrítico. En formas de realización específicas, el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> purificado puede ser presurizado en el primer compresor 630 a una presión de aproximadamente 7,5 MPa a aproximadamente 20 MPa, de aproximadamente 7,5 MPa a aproximadamente 15 MPa, de aproximadamente 7,5 MPa a aproximadamente 12 MPa, de aproximadamente 7,5 MPa a aproximadamente 10 MPa, o de aproximadamente 8 MPa a aproximadamente 10 MPa. La corriente 66 que sale desde el primer compresor 630 (que está en un estado fluido supercrítico) se pasa entonces a través del intercambiador de calor 640 de agua fría (o cualquier dispositivo que funciona de forma similar) que puede refrigerar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a una temperatura suficiente para formar un fluido de alta densidad, que se puede bombear de manera más eficiente a una presión todavía mayor. Esto puede ser significativo a la luz del volumen grande de CO<sub>2</sub> que se está reciclando para uso como el fluido de circulación. El bombeo de un volumen grande de CO<sub>2</sub> en el estado fluido supercrítico puede ser un drenaje de energía significativo en el sistema. No obstante, la presente invención tiene en cuenta el incremento beneficioso de la eficiencia que puede ser proporcionada densificando el CO<sub>2</sub> y reduciendo de esta manera el volumen total de CO<sub>2</sub> supercrítico que es bombeado de retorno a la cámara de combustión para reciclaje. En formas de realización específicas, el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> puede proporcionarse a una densidad de al menos aproximadamente 200 kg/m<sup>3</sup>, al menos aproximadamente 250 kg/m<sup>3</sup>, al menos aproximadamente 300 kg/m<sup>3</sup>, al menos aproximadamente 350 kg/m<sup>3</sup>, al menos aproximadamente 400 kg/m<sup>3</sup>, al menos aproximadamente 450 kg/m<sup>3</sup>, al menos aproximadamente 500 kg/m<sup>3</sup>, al menos aproximadamente 550 kg/m<sup>3</sup>, al menos aproximadamente 600 kg/m<sup>3</sup>, al menos aproximadamente 650 kg/m<sup>3</sup>, al menos aproximadamente 700 kg/m<sup>3</sup>, al menos aproximadamente 750 kg/m<sup>3</sup>, al menos aproximadamente 800 kg/m<sup>3</sup>, al menos aproximadamente 850 kg/m<sup>3</sup>, al menos aproximadamente 900 kg/m<sup>3</sup>, al menos aproximadamente 950 kg/m<sup>3</sup>, o al menos aproximadamente 1000 kg/m<sup>3</sup> después de la descarga desde el intercambiador de calor de agua fría 640 (o antes del paso a través de la unidad de intercambio de calor 420 para calentamiento). En otras formas de realización, la densidad puede ser de aproximadamente 150 kg/m<sup>3</sup> a aproximadamente 1.100 kg/m<sup>3</sup>, de aproximadamente 200 kg/m<sup>3</sup> a aproximadamente 1000 kg/m<sup>3</sup>, de aproximadamente 400 kg/m<sup>3</sup> a aproximadamente 950 kg/m<sup>3</sup>, de aproximadamente 500 kg/m<sup>3</sup> a aproximadamente 900 kg/m<sup>3</sup>, o de aproximadamente 500 kg/m<sup>3</sup> a aproximadamente 800 kg/m<sup>3</sup>.

35 En formas de realización específicas, el paso de la corriente 66 a través del intercambiador de calor de agua fría 649 puede enfriar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a una temperatura inferior a aproximadamente 60 °C, inferior a aproximadamente 50 °C, inferior a aproximadamente 40 °C, o inferior a aproximadamente 30 °C. En otras formas de realización, la temperatura del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> que abandona el intercambiador de calor de agua fría 640 como corriente 67 puede ser de aproximadamente 15 °C a aproximadamente 50 °C, de aproximadamente 20 °C a aproximadamente 45 °C, o de aproximadamente 20 °C a aproximadamente 40 °C. El fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en la corriente 67 que entra en el segundo compresor está con preferencia en condiciones que facilitan el bombeo eficiente de energía de la corriente hasta una presión deseada como se describe aquí para introducción del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en la cámara de combustión. Por ejemplo, la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> supercrítico presurizado 70 se puede presurizar adicionalmente hasta una presión de al menos aproximadamente 12 MPa, al menos aproximadamente 15 MPa, al menos aproximadamente 16 MPa, al menos aproximadamente 18 MPa, al menos aproximadamente 20 MPa, o al menos aproximadamente 25 MPa. En algunas formas de realización, la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> supercrítico presurizado 70 se puede presurizar adicionalmente hasta una presión de aproximadamente 15 MPa a aproximadamente 50 MPa, de aproximadamente 20 MPa a aproximadamente 45 MPa, o de aproximadamente 25 MPa a aproximadamente 40 MPa. Se puede utilizar cualquier tipo de compresor capaz de trabajar a las temperaturas indicadas, y capaz de conseguir las presiones descritas, tal como una bomba de fases múltiples a alta presión.

55 La corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> supercrítico 70 que abandona una o más unidades de presurización 620 se puede dirigir de retorno a los intercambiadores de calor utilizados anteriormente para refrigerar la corriente de descarga de la turbina 50. Como se muestra en la figura 5, la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado 70 se puede pasar primero a través de un divisor de la corriente 720 que forma la corriente de fluido de tubería de CO<sub>2</sub> 80 y la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> 85 (que será sustancialmente idéntica a la corriente de circulación de fluido de CO<sub>2</sub> 70, excepto la cantidad real de CO<sub>2</sub> presente en la corriente). Por lo tanto, en algunas formas de realización, al menos una porción del CO<sub>2</sub> en la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado es introducida en una tubería presurizada para recogida. La cantidad de CO<sub>2</sub> retirado de la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> y dirigida a la tubería (u otros medios de recogida o disposición) se puede variar en función del contenido deseado de CO<sub>2</sub> a introducido en la cámara de combustión para controlar la temperatura de la combustión y el contenido real de CO<sub>2</sub> presente en la corriente de descarga de la combustión que sale desde la cámara de combustión. En algunas formas de realización, la cantidad de CO<sub>2</sub> extraída como se ha descrito anteriormente puede ser sustancialmente la cantidad de CO<sub>2</sub> formada a partir de la combustión del combustible que contiene

carbono en la cámara de combustión.

Para conseguir una operación de alta eficiencia, puede ser beneficioso que el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> que abandona la unidad de presurización 620 sea calentado hasta una temperatura a la que el fluido supercrítico tiene un calor específico mucho más bajo. Esto es un equivalente a proporcionar una entrada de calor muy grande sobre un intervalo de temperatura comparativamente bajo. El uso de una fuente de calor externa (por ejemplo una fuente de calor a temperatura relativamente baja) para proporcionar calentamiento adicional para una porción del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado permite a la unidad de intercambio de calor 420 operar con una diferencia de temperatura pequeña entre la corriente de escape de la turbina 50 y la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado 236 en el extremo caliente de la unidad de intercambio de calor 420 (o el primer intercambiador de calor cuando se utiliza una serie de dos o más intercambiadores de calor). En formas de realización específicas, el paso del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado a través del uno o más intercambiadores de calor puede ser útil para calentar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado a una temperatura deseada para entrada de la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado en la cámara de combustión. En ciertas formas de realización, la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado se calienta a una temperatura de al menos aproximadamente 200 °C, al menos aproximadamente 300 °C, al menos aproximadamente 400 °C, al menos aproximadamente 500 °C, al menos aproximadamente 600 °C, al menos aproximadamente 700 °C, o al menos aproximadamente 800 °C antes de la entrada de la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en la cámara de combustión. En algunas formas de realización, el calentamiento puede ser hasta una temperatura de aproximadamente 500 °C a aproximadamente 1,200 °C, de aproximadamente 550 °C a aproximadamente 1000 °C, o de aproximadamente 600 °C a aproximadamente 950 °C.

La figura 8 ilustra una forma de realización de una unidad de intercambio de calor 420, en la que se utilizan tres intercambiadores de calor individuales en serie para extraer calor desde la corriente de descarga de la turbina 50 para proporcionar una corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> 60 en condiciones adecuadas para la retirada de componen tres secundarios y simultáneamente añadir calor a la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> supercrítico presurizado 70 (u 85) antes del reciclado e introducción de la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> 236 en la cámara de combustión. Como se describe más adelante, los presentes sistemas y métodos pueden retroajustarse a sistemas de potencia convencionales (por ejemplo, plantas de potencia quemadas con carbón) para incrementar la eficiencia y/o su salida. En algunas formas de realización, la unidad de intercambio de calor 420 descrita a continuación puede referirse, por lo tanto, como la unidad de intercambio de calor primaria en tal retroajuste, donde se utiliza también una unida de intercambio de calor secundaria (como se ilustra en la figura 12). La unidad de intercambio de calor secundaria podría ser, por lo tanto, uno o más intercambiadores de calor utilizados para sobrecalentar una corriente de vapor, por ejemplo. El uso de los términos unidad de intercambio de calor primaria y unidad de intercambio de calor secundaria no deberían interpretarse como limitación del alcance de la invención y sólo se utilizan para proporcionar claridad de descripción.

.En las formas de realización de la figura 8, la corriente de descarga de la turbina 50 entre en la serie de intercambiadores de calor 420 pasando primero a través del primer intercambiador de calor 430 para proporcionar la corriente 52, que tendrá una temperatura más baja que la temperatura de la corriente de descarga de la turbina 50. El primer intercambiador de calor 430 puede describirse como un intercambiador de calor de alta temperatura, ya que recibe la corriente más caliente en la serie – es decir, la corriente de descarga de la turbina 50 – y de esta manera transfiere calor en el intervalo más alto de la temperatura a la serie de intercambiadores de calor 420. Como se ha descrito anteriormente, el primer intercambiador de calor 430 que recibe la corriente de descarga de la turbina a temperatura relativamente alta 50 puede comprender aleaciones especiales u otros materiales adecuados para hacer que el intercambiador de calor sea adecuado para resistir las temperaturas indicadas. La temperatura de la corriente de descarga de la turbina 50 se puede reducir en una medida significativa por el paso a través del primer intercambiador de calor 430 (que se puede aplicar también a otras formas de realización, donde se utilizan menos de tres o más de tres intercambiadores de calor individuales). En algunas formas de realización, la temperatura de la corriente 52 que abandona el primer intercambiador de calor 430 puede ser menor que la temperatura de la corriente de descarga de la turbina 50 en al menos aproximadamente 100 °C, al menos aproximadamente 200 °C, al menos aproximadamente 300 °C, al menos aproximadamente 400 °C, al menos aproximadamente 450 °C, al menos aproximadamente 500 °C, al menos aproximadamente 550 °C, al menos aproximadamente 575 °C, o al menos aproximadamente 600 °C. En formas de realización específicas, la temperatura de la corriente 52 puede ser de aproximadamente 100 °C a aproximadamente 800 °C, de aproximadamente 150 °C a aproximadamente 600 °C, o de aproximadamente 200 °C a aproximadamente 500 °C. En formas de realización preferidas, la presión de la corriente 52 que abandona el primer intercambiador de calor 430 es sustancialmente similar a la presión de la corriente de descarga de la turbina 50. Específicamente, la presión de la corriente 62 que abandona el primer intercambiador de calor 430 puede ser al menos 90 %, al menos 91 %, al menos 92 %, al menos 93 %, al menos 94 %, al menos 95 %, al menos 96 %, al menos 97 %, al menos 98 %, al menos 99 %, al menos 99,5 %, o al menos 99,8 % de la presión de la corriente de descarga de la turbina 50.

La corriente 52 que abandona el primer intercambiador de calor 430 se pasa a través del segundo intercambiador de calor 440 para producir la corriente 56, que tiene una temperatura que es inferior a la temperatura de la corriente 52

que entra en el segundo intercambiador de calor 440. El segundo intercambiador de calor 440 puede describirse como un intercambiador de calor de temperatura intermedia, ya que transfiere calor en un intervalo de temperatura intermedia (es decir, un intervalo inferior al primer intercambiador de calor 430, pero mayor que el tercer intercambiador de calor 450). En algunas formas de realización, la diferencia de la temperatura entre la primera corriente 52 y la segunda corriente 56 puede ser sustancialmente menor que la diferencia de la temperatura entre la corriente de descarga de la turbina 50 y la corriente 52 que abandona el primer intercambiador de calor. En algunas formas de realización, la temperatura de la corriente 56 que abandona el segundo intercambiador de calor 440 puede ser menor que la temperatura de la corriente 52 que entra en el segundo intercambiador de calor 440 en aproximadamente 10 °C a aproximadamente 200 °C, aproximadamente 20 °C a aproximadamente 175 °C, aproximadamente 30 °C a aproximadamente 150 °C, o aproximadamente 40 °C a aproximadamente 140 °C. En formas de realización específicas, la temperatura de la corriente 56 puede ser de 75 °C a aproximadamente 600 °C, de aproximadamente 100 °C a aproximadamente 400 °C, o de aproximadamente 100 °C a aproximadamente 300 °C. De nuevo, se puede preferir que la presión de la corriente 56 que abandona el segundo intercambiador de calor 440 sea sustancialmente similar a la presión de la corriente 52 que entra en el segundo intercambiador de calor 440. De manera específica, la presión de la corriente 56 que abandona el segundo intercambiador de calor 440 puede ser al menos 90 %, al menos 91 %, al menos 92 %, al menos 93 %, al menos 94 %, al menos 95 %, al menos 96 %, al menos 97 %, al menos 98 %, al menos 99 %, al menos 99,5 %, o al menos 99,8 % de la presión de la corriente 52 que entra en el segundo intercambiador de calor 440.

La corriente 56 que abandona el segundo intercambiador de calor 440 se pasa a través del tercer intercambiador de calor 450 para producir la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> 60, que tiene una temperatura que es inferior a la temperatura de la corriente 56 que entra en el tercer intercambiador de calor 450. El tercer intercambiador de calor 450 puede describirse como un intercambiador de calor que transfiere calor en el intervalo de temperatura mínima de la serie de transferencia de calor 420. En algunas formas de realización, la temperatura de la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> 60 que abandona el tercer intercambiador de calor 450 puede ser inferior a la temperatura de la corriente 56 que entra en el tercer intercambiador de calor 450 en aproximadamente 10 °C a aproximadamente 250 °C, aproximadamente 15 °C a aproximadamente 200 °C, aproximadamente 20 °C a aproximadamente 175 °C, o aproximadamente 25 °C a aproximadamente 150 °C. En formas de realización específicas, la temperatura de la corriente 60 puede ser de aproximadamente 40 °C a aproximadamente 200 °C, de aproximadamente 40 °C a aproximadamente 100 °C, o de aproximadamente 40 °C a aproximadamente 90 °C. De nuevo, se puede preferir que la presión de la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> 60 que abandona el tercer intercambiador de calor 450 sea sustancialmente similar a la presión de la corriente 56 que entra en el tercer intercambiador de calor 450. Específicamente, la presión de la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> 60 que abandona el tercer intercambiador de calor 450 puede ser al menos 90 %, al menos 91 %, al menos 92 %, al menos 93 %, al menos 94 %, al menos 95 %, al menos 96 %, al menos 97 %, al menos 98 %, al menos 99 %, al menos 99,5 %, o al menos 99,8 % de la presión de la corriente 56 que entra en el tercer intercambiador de calor 450.

La corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> que abandona el tercer intercambiador de calor 450 (y que, por lo tanto, abandona la unidad de intercambiador de calor 420 en general) puede dirigirse a uno o más unidades de separación 520, como se ha descrito anteriormente. También como se ha descrito anteriormente, la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> puede someterse a uno o más tipos de separación para eliminar componentes secundarios desde la corriente, que es presurizada entonces para retornar a la cámara de combustión como el fluido de circulación reciclado (opcionalmente con una porción del CO<sub>2</sub> separado para entrada en una tubería de CO<sub>2</sub> u otros medios de recogida o disposición sin ventilación a la atmósfera).

Volviendo a la figura 8, la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado 70 (u 85 si se pasa primero a través de un aparato de separación, como se muestra en la figura 5) se puede dirigir de retorno a través de la misma serie de tres intercambiadores de calor, para que el calor extraído originalmente a través de los intercambiadores de calor se pueda utilizar para impartir calor a la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado 70 antes de entrar en la cámara de combustión 220. Típicamente, el calor impartido a la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado 70 por el paso a través de los tres intercambiadores de calor (450, 440, y 430) puede ser relativamente proporcional a la cantidad de calor extraído por los intercambiadores de calor, como se ha descrito anteriormente.

En algunas formas de realización, la invención se puede caracterizar por la diferencia de temperatura de las corrientes que salen y entran en el extremo frío del intercambiador de calor (o el último intercambiador de calor en una serie). Con referencia a la figura 8, esto se puede referir específicamente a la diferencia de la temperatura de las corrientes 60 y 70. Esta diferencia de la temperatura de las corrientes en el extremo frío del intercambiador de calor (o del último intercambiador de calor en una serie) es específicamente mayor que cero y puede estar en el intervalo de aproximadamente 2 °C a aproximadamente 50 °C, de aproximadamente 3 °C a aproximadamente 40 °C, de aproximadamente 4 °C a aproximadamente 30 °C, o de aproximadamente 5 °C a aproximadamente 20 °C.

En algunas formas de realización, la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado 70 se puede pasar directamente a través de los tres intercambiadores de calor en serie. Por ejemplo, la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado 70 (es decir, a una temperatura relativamente baja) puede pasar a través del tercer

intercambiador de calor 450 para formar la corriente 71 a una temperatura incrementada, que se puede pasar directamente a través del segundo intercambiador de calor 440 para formar la corriente 73 a una temperatura incrementada, que se puede pasar directamente a través del primer intercambiador de calor 430 para formar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado a alta temperatura 236 que se puede dirigir a la cámara de combustión.

En formas de realización particulares, sin embargo, la presente invención se puede caracterizar por el uso de una fuente de calor externas para incrementar adicionalmente la temperatura del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado. Por ejemplo, como se ilustra en la figura 8, después del paso de la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado 70 a través del primer intercambiador de calor 450, la corriente 71 formada, en lugar de pasar directamente al segundo intercambiador de calor 440 se puede pasar a través de un componente de división 460 que divide la corriente 71 en dos corrientes 71b y 72a. La corriente 71b puede pasarse a través del segundo intercambiador de calor 440 como se ha descrito de otra manera anteriormente. La corriente 72a puede pasarse a través de un radiador lateral 470 que se puede usar para impartir una cantidad adicional de calor a la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado 70 además del calor impartido por los propios intercambiadores de calor.

Las cantidades relativas del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado desde la corriente 71 que se dirigen al segundo intercambiador de calor 440 y al radiador lateral 470 se pueden variar en función de las condiciones de trabajo del sistema y la temperatura final deseada de la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado para entrada en la cámara de combustión 220. En ciertas formas de realización, la relación molar de CO<sub>2</sub> en la corriente 71b dirigida al segundo intercambiador de calor 440 y la corriente 72a dirigida al radiador lateral 470 puede ser de aproximadamente 1:2 a aproximadamente 20:1 (es decir, de aproximadamente 1 mol de CO<sub>2</sub> en la corriente 71b por 2 moles de CO<sub>2</sub> en la corriente 72a a aproximadamente 20 moles de CO<sub>2</sub> en la corriente 71b por 1 mol de CO<sub>2</sub> en la corriente 72a). En otras formas de realización, la relación molar de CO<sub>2</sub> en la corriente 71b dirigida al segundo intercambiador de calor 440 y la corriente 72a dirigida al radiador lateral 470 puede ser de aproximadamente 1:1 a aproximadamente 20:1, de aproximadamente 2:1 a aproximadamente 16:1, de aproximadamente 2:1 a aproximadamente 12:1, de aproximadamente 2:1 a aproximadamente 10:1, de aproximadamente 2:1 a aproximadamente 8:1, o de aproximadamente 4:1 a aproximadamente 6:1.

El radiador lateral puede comprender cualquier aparato útil para impartir calor al fluido de circulación de CO<sub>2</sub>. En algunas formas de realización, la energía (es decir, calor) proporcionada por el radiador lateral puede ser introducida en el sistema desde una fuente exterior. En formas de realización particulares, de acuerdo con la invención, sin embargo, la eficiencia del ciclo se puede incrementar utilizando calor residual que se genera en uno o más puntos en el ciclo. Por ejemplo, la producción de CO<sub>2</sub> para entrada en la cámara de combustión puede producir calor. Unidades de separación de aire conocidas pueden generar calor como sub-producto del proceso de separación. Además, puede ser útil que el O<sub>2</sub> sea proporcionado a una presión incrementada, tal como se ha descrito anteriormente, y tal presurización del gas puede generar también calor como un sub-producto. Por ejemplo, se puede producir O<sub>2</sub> por la operación de un proceso de separación de aire criogénico, en el que el oxígeno es presurizado en el proceso por bombeo de oxígeno líquido que es calentado de una manera eficiente temperatura ambiente conservando la refrigeración. Tal planta de oxígeno criogénico bombado puede tener dos compresores de aire, los cuales dos pueden ser accionados adiabáticamente sin refrigeración entre-fases, de manera que el aire presurizado caliente pueden ser refrigerado hasta una temperatura que está próxima a y/o mayor que la temperatura de la corriente que es calentada por la fuente externa (por ejemplo, la corriente 72a en la figura 8). En ajustes de la técnica conocidos, tal calor es inutilizado o puede ser realmente un drenaje en el sistema, ya que se requieren sistemas de refrigeración secundarios para eliminar el calor sub-producto. En la presente invención, sin embargo, se puede utilizar un refrigerante para extraer el calor generados desde el proceso de separación del aire y proporcionar el calor al radiador lateral ilustrado en la figura 8. En otras formas de realización, el radiador lateral podría ser él mismo la unidad de separación de aire (o un dispositivo asociado) y el fluido de circulación del aire de CO<sub>2</sub> (por ejemplo, la corriente 72a en la figura 8) podría ser recirculado él mismo directamente a través de un sistema de refrigerante o asociado con la unidad de separación de aire para extraer el calor generado en el proceso de separación del aire. Más específicamente, el calor añadido puede obtenerse por la operación del compresor de CO<sub>2</sub> adiabáticamente y retirado el calor de compresor en post-radiadores contra un fluido circulante de transferencia de calor que transfiere el calor de compresor para calentar parte del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a alta presión o por transferencia de calor directa a la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión (por ejemplo, la corriente 72a en la figura 8). Además, la adición de tal calor no está limitada necesariamente a la porción descrita con relación a la figura 8, sino que podría entrar en el ciclo en cualquier punto después de la separación de los componentes secundarios desde el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> (pero con preferencia antes del paso del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a través del intercambiador de calor directamente curso arriba desde la entrada en la cámara de combustión). Naturalmente, cualquier método similar de utilización de residuos generados en el ciclo de producción de potencia estaría comprendido también por la presente invención, tal como el uso de un suministro de vapor a una temperatura de condensación adecuada o el gas de escape caliente desde una turbina de gas de ciclo abierto convencional.

La cantidad de calor impartido por el radiador lateral 470 puede variar en función de los materiales y aparatos

utilizados así como la temperatura última que debe alcanzarse para la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> para la entrada en la cámara de combustión 220. En algunas formas de realización, el radiador lateral 470 incrementa efectivamente la temperatura de la corriente 72a en al menos aproximadamente 10 °C, al menos aproximadamente 20 °C, al menos aproximadamente 30 °C, al menos aproximadamente 40 °C, al menos aproximadamente 50 °C, al menos aproximadamente 60 °C, al menos aproximadamente 70 °C, al menos aproximadamente 80 °C, al menos aproximadamente 90 °C, o al menos aproximadamente 100 °C. En otras formas de realización, el radiador lateral 470 procesa efectivamente la temperatura de la corriente 72a de aproximadamente 10 °C a aproximadamente 200 °C, de aproximadamente 50 °C a aproximadamente 175 °C, o de aproximadamente 75 °C a aproximadamente 150 °C. En aspectos específicos, el radiador lateral 470 incrementa la temperatura de la corriente 72a hasta dentro de al menos aproximadamente 15 °C, dentro de al menos aproximadamente 12 °C, dentro de al menos aproximadamente 10 °C, dentro de al menos aproximadamente 7 °C, o dentro de al menos aproximadamente 5 °C de la temperatura de la corriente 73 que abandona al intercambiador de calor 440.

Por esta adición de una fuente de calor adicional, la corriente 71 que abandona el tercer intercambiador de calor 450 puede ser sobrecalentada más allá de la capacidad del calor disponible en el segundo intercambiador de calor 440 para calentar la corriente de calor 71 si toda la cantidad de CO<sub>2</sub> en la corriente ha sido dirigida a través del segundo intercambiador de calor 440. Por medio de la división de la corriente, el calor disponible en el segundo intercambiador de calor 440 puede ser impartido totalmente al contenido parcial del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en la corriente 71b mientras el calor disponible desde el radiador lateral 470 puede ser impartido totalmente al contenido parcial del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en la corriente 72a. Por lo tanto, se puede ver que la temperatura de las corrientes combinadas que entran en el primer intercambiador de calor 430, cuando se utiliza el método de división alternativo, puede ser mayor que la temperatura de la corriente 73 que sale desde el segundo intercambiador de calor 440 si la cantidad total del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en la corriente 71 se dirige al segundo intercambiador de calor 440 de lugar de ser dividida y tratada por separado, como se ha descrito anteriormente. En algunas formas de realización, el calor incrementado ganado por el método de división puede ser suficientemente significativo para limitar si o no la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> está suficientemente caliente antes de entrar en la cámara de combustión.

Como se ve en la figura 8, la corriente 71b que abandona el divisor 460 se pasa a través del segundo intercambiador de calor 440 para formar la corriente 73, que se dirige hacia la mezcladora 480 que combina la corriente 73 con la corriente 72b descargada desde el radiador lateral 470. La corriente combinada 74 se pasa entonces a través del primer intercambiador de calor 430 para calentar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a una temperatura que está sustancialmente próxima a la temperatura de la corriente de descarga de la turbina cuando entra en el primer intercambiador de calor 430. Esta proximidad de las temperaturas en las corrientes de fluido en el extremo caliente del primer intercambiador de calor se puede aplicar a otras formas de realización de la invención, en las que se utilizan menos de tres o más de tres intercambiadores de calor y se puede aplicar al primer intercambiador de calor a través del cual se pasa el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> después de la descarga desde las turbinas. La capacidad para conseguir esta proximidad en la temperatura de las corrientes de fluido en el extremo caliente del primer intercambiador de calor puede ser una característica clave de la invención para alcanzar niveles de eficiencia deseados. En ciertas formas de realización, la diferencia entre la temperatura de la corriente de descarga de la turbina que entra en el primer intercambiador de calor en línea desde las turbinas (es decir, después de la expansión en las turbinas) y la temperatura de la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> que abandona el intercambiador de calor para reciclado a la cámara de combustión puede ser inferior a aproximadamente 80 °C, inferior a aproximadamente 75 °C, inferior a aproximadamente 70 °C, inferior a aproximadamente 65 °C, inferior a aproximadamente 60 °C, inferior a aproximadamente 55 °C, inferior a aproximadamente 50 °C, inferior a aproximadamente 45 °C, inferior a aproximadamente 40 °C, inferior a aproximadamente 35 °C, inferior a aproximadamente 30 °C, inferior a aproximadamente 25 °C, inferior a aproximadamente 20 °C, o inferior a aproximadamente 15 °C.

Como se puede ver a partir de lo anterior, la eficiencia de los sistemas y métodos de la presente invención se puede facilitar grandemente por el control preciso de la diferencia de la temperatura en el extremo caliente del intercambiador de calor 429 (o el primer intercambiador de calor 430 en la serie ilustrada en la figura 8) entre la corriente de descarga de la turbina 50 y la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado 236. En formas de realización preferidas, esta diferencia de la temperatura es inferior a 50 °C. Aunque no se desea unirse por teoría, se ha encontrado de acuerdo con la presente invención que el calor disponible para calentar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado (por ejemplo calor tomado desde la corriente de descarga de a turbina en el uno o más intercambiadores de calor) puede ser inadecuado para calentar suficientemente la corriente total de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado. La presente invención ha reconocido que esto puede ser superado dividiendo la corriente 71 de manera que la corriente 71b entra en el intercambiador de calor 440 y la corriente 72a entra en la fuente de calor externa 470 que proporciona la fuente externa adicional de calor que eleva la temperatura de la corriente 72b que abandona el intercambiador de calor 440, como ya se ha descrito anteriormente. Las corrientes 72b y 73 se combinan entonces para formar la corriente 74. El caudal de flujo de la corriente 71b (es también la corriente 72a) se puede controlar por la diferencia de temperatura en el extremo frío del intercambiador de calor 440. La cantidad de calor externo requerido para superar la insuficiencia térmica descrita anteriormente se puede reducir

al mínimo haciendo que la temperatura de la corriente 56 sea lo más baja posible y entonces reduciendo al mínimo la diferencia de la temperatura del extremo frío del intercambiador de calor 440. El vapor de agua presente en la corriente 56 que resulta de los productos de la combustión alcanza su punto de rocío a una temperatura que depende de la composición de la corriente 56 y su presión. Por debajo de esta temperatura, la condensación del agua incrementa grandemente el mCp efectivo de la corriente 56 con respecto a la corriente 60 y proporciona todo el calor requerido para calentar la corriente de reciclado total 70 a la corriente 71. La temperatura de la corriente 56 que abandona el intercambiador de calor 440 entre las corrientes 56 y 71 puede ser con preferencia al menos aproximadamente 3 °C, al menos aproximadamente 6 °C, al menos aproximadamente 9 °C, al menos aproximadamente 12 °C, al menos aproximadamente 15 °C, al menos aproximadamente 18 °C, o al menos aproximadamente 20 °C.

Volviendo a la figura 5, el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> 236 puede ser precalentado antes de ser reciclado a la cámara de combustión 220, tal como se describe en relación a al menos un intercambiador de calor 420, que recibe la corriente de descarga de la turbina caliente 50 después del paso a través de las turbinas de expansión 320. Para incrementar al máximo la eficiencia del ciclo, puede ser útil operar las turbinas de expansión 320 a una temperatura de entrada tan alta como sea posible consistente con los materiales de construcción disponibles de la trayectoria de entrada de gas caliente y las palas de las turbinas altamente estresadas, así como la temperatura máxima disponible en el intercambiador de calor 420 consistente con las presiones operativas del sistema. La trayectoria de entrada caliente de la corriente de entrada de la turbina y las primeras hileras de palas de las turbinas se pueden refrigerar por cualquier medio útil. En algunas formas de realización, a eficiencia se puede incrementar al máximo utilizando parte del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión. Específicamente, el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a temperatura más baja (por ejemplo, en el intervalo de aproximadamente 50 °C a aproximadamente 200 °C) se puede extraer desde el ciclo delante del extremo frío del intercambiador de calor 420 o desde un punto intermedio en el intercambiador de calor 420 cuando se utiliza una serie de unidades de intercambiadores múltiples (por ejemplo de las corrientes 71, 72a, 71b, 72b, 73, o 74 en la figura. 8). El fluido de refrigeración de las palas se puede descargar desde agujeros en la pala de la turbina y se puede introducir directamente en el flujo de la turbina.

El funcionamiento de un quemador de alta eficiencia, tal como una cámara de combustión refrigerada por transpiración, puede producir un gas de la combustión que es un gas oxidante con exceso de concentración de oxígeno (tal como en el intervalo de 0,1 % a aproximadamente 5 % molar). Alternativamente, la cámara de combustión puede producir un gas de la combustión que es un gas reductor con ciertas concentraciones de uno o más H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, y NH<sub>3</sub>. Esto es particularmente beneficioso de acuerdo con la invención para usar una serie de unidades de turbina (por ejemplo 2, 3 o más unidades). De manera beneficiosa, todas las unidades pueden operar con la misma temperatura de entrada, y esto permite incrementar al máximo la potencia de salida para una relación dada de la presión de alimentación de la primera turbina y la presión general.

Un ejemplo de una unidad de turbina 320 que utiliza dos turbinas 330, 340 accionadas en serie en un modo reductor se muestra en la figura 9. Como se ve allí, la corriente de producto de la combustión 40 se dirige a la primera turbina 330. En tales formas de realización, la corriente de producto de la combustión 40 está diseñada (por ejemplo, a través del control del combustible usado, la cantidad de O<sub>2</sub> usado, y las condiciones operativas de la cámara de combustión) para que sea un gas reductor con uno o más componentes combustibles en él, como se ha descrito anteriormente. La corriente de producto de la combustión 40 se expande a través de la primera turbina 330 para producir potencia (tal como en asociación con un generador eléctrico, no mostrado en esta ilustración) y formar una primera corriente de descarga 42. Antes de la introducción en la segunda turbina 340, se puede añadir una cantidad predeterminada de O<sub>2</sub> a la primera corriente de descarga de la turbina 42. Ésta abandona el oxígeno excesivo mientras eleva la temperatura de entrada en la segunda unidad de turbina 340 hasta sustancialmente el mismo valor que la temperatura de entrada a la primera unidad de turbina 330. Por ejemplo, la temperatura de la corriente de descarga 42 desde la primera unidad de turbina 330 puede estar en el intervalo de aproximadamente 500 °C a aproximadamente 1000 °C. Cuando está en el modo reductor, la adición del O<sub>2</sub> a la corriente de descarga 42 a esta temperatura puede causar que el gas en la corriente sea calentado por la combustión del gas combustible en exceso hasta una temperatura en el intervalo de aproximadamente 700 °C a aproximadamente 1.600 °C, que es sustancialmente el mismo intervalo de temperatura que la corriente de producto de la combustión 40 que entra en la cámara de combustión 220 antes de entrar en la primera unidad de turbina 330. En otras palabras, la temperatura operativa en la entrada de cada una de las dos turbinas difiere en no más que aproximadamente 10 %, no más que aproximadamente 9 %, no más que aproximadamente 8 %, no más que aproximadamente 7 %, o no más que aproximadamente 6 %, no más que aproximadamente 5 %, no más que aproximadamente 4 %, no más que aproximadamente 3 %, no más que aproximadamente 2 %, o no más que aproximadamente 1 %. Etapas de calentamiento similares para otras unidades de turbinas podrían realizarse también hasta la extensión de que permanezca combustible residual.

La composición se puede mejorar por el uso de un catalizador adecuado en el espacio de la combustión alimentado con oxígeno, si se requiere. Las ventajas de tales sistemas y métodos de acuerdo con la presente invención que utilizan una pluralidad de turbinas y, opcionalmente, una pluralidad de cámaras de combustión se describen todavía más adelante. En ciertas formas de realización, se puede utilizar un ciclo de potencia como se describe aquí para

retroajustar estaciones de potencia existentes, tal como por la introducción de un fluido calefactor a alta temperatura, a alta presión (por ejemplo, la corriente de descarga de la turbina descrita aquí) en el ciclo de sobrecalentamiento del vapor de una estación de potencia de ciclo Ranking convencional. Ésta podría ser una estación de energía potencia quemada con carbón o estación de energía nuclear con un ciclo de calor de reactor de agua hirviendo (BWR) o de reactor de agua presurizada (PWR). Esto incrementa efectivamente la eficiencia y la salida de potencia de la estación de energía Ranking vapor por el sobrecalentamiento del vapor hasta una temperatura mucho más alta que la temperatura máxima del vapor sobrecalentado producido en el sistema existente. En el caso de una caldera quemada con carbón pulverizado, las temperaturas del vapor son actualmente hasta un máximo de aproximadamente 600 °C, mientras que las condiciones del vapor en una estación de energía nuclear son generalmente hasta aproximadamente 320 °C. Utilizando el sobrecalentamiento posible con el intercambio de calor en los presentes sistemas y métodos de la invención, la temperatura del vapor se puede elevar hasta por encima de 700 °C. Esto conduce a la conversión directa de la energía térmica en potencia extra del estator, puesto que el combustible adicional quemado para sobrecalentar el vapor se convierte en energía extra en la estación de energía basada en vapor proporcionando una unidad secundaria de intercambio de calor. Por ejemplo, la corriente de descarga de la turbina descrita en relación a los presentes métodos y sistemas de la invención podría dirigirse a través de la unidad secundaria de intercambio de calor antes de pasar a través de la unidad primaria de intercambio de calor, como se describe de otra manera aquí. El calor obtenido en la segunda unidad de intercambio de calor podría utilizarse para sobrecalentar el vapor desde la caldera, como se ha descrito anteriormente. El vapor sobrecalentado podría dirigirse hacia una o más turbinas para generar potencia. La corriente de descarga de la turbina, después de pasar a través de la unidad secundaria de intercambio de calor, podría dirigirse entonces a la unidad primaria de intercambio de calor, como se describe de otra manera aquí. Tal sistema y método se describe en el Ejemplo 2 y se ilustra en la figura 12. Además, es posible tomar bajo a baja presión desde la entrada de la turbina final de vapor y usarlo para calentar parte del fluido de circulación de CO<sub>2</sub>, como se ha descrito anteriormente. En formas de realización específicas, el condensado desde la estación de energía de vapor se puede calentar hasta una temperatura intermedia antes de la des-aireación utilizando una corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub>, que abandona el extremo frío de la unidad de intercambio de calor (por ejemplo, a una temperatura de aproximadamente 80 °C en algunas formas de realización). Este calentamiento utiliza normalmente vapor drenado tomado desde la entrada a la fase final de la turbina de vapor LP, de manera que el efecto neto sobre la eficiencia de la estación de energía de vapor del déficit para presente calentamiento de la corriente lateral se compensa por el pre-calentamiento del condensado, que conserva vapor drenado.

El método general descrito anteriormente para la producción de potencia (es decir, ciclo de potencia) se puede implementar de acuerdo con la invención utilizando un sistema de producción de potencia adecuado, como se describe aquí. Generalmente, un sistema de producción de potencia de acuerdo con la invención puede comprender cualquiera de los componentes descritos aquí en relación al método de producción de potencia. Por ejemplo, un sistema de producción de potencia puede comprender una cámara de combustión para quemar un combustible que contiene carbono en la presencia de O<sub>2</sub> y de un fluido de circulación de CO<sub>2</sub>. Específicamente, la cámara de combustión puede ser una cámara de combustión refrigerada por transpiración, como se describe aquí; no obstante, también se pueden utilizar aquí otras cámaras de combustión capaces de operar en las condiciones descritas de otra manera aquí. La cámara de combustión se puede caracterizar específicamente en relación a las condiciones de la combustión bajo las que opera así como componentes específicos de la propia cámara de combustión. En algunas formas de realización, el sistema puede comprender uno o más inyectores para proporcionar el combustible que contiene carbono (y opcionalmente un medio de fluidización) el O<sub>2</sub> y el fluido de circulación de CO<sub>2</sub>. El sistema puede incluir componentes para la eliminación de escoria líquida. La cámara de combustión puede producir un gas combustible a una temperatura a la que las partículas de ceniza sólida se pueden filtrar efectivamente desde el gas, y el gas se puede mezclar con CO<sub>2</sub> frío y se puede quemar en una segunda cámara de combustión. La cámara de combustión puede incluir al menos una etapa de combustión que quema el combustible que contiene carbono en la presencia del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> para proporcionar una corriente producto de la combustión que comprende CO<sub>2</sub> a una presión y temperatura como se describen aquí.

El sistema comprende, además, una serie de turbinas de producción de potencia en comunicación de fluido con la cámara de combustión. Las turbinas pueden tener una entrada para recibir la corriente de producto de la combustión y una salida para la liberación de una corriente de descarga de la turbina que comprende CO<sub>2</sub>. Se puede producir potencia a medida que la corriente de fluido se expande, estando diseñadas las turbinas para mantener la corriente de fluido en una relación de la presión ( $I_p/O_p$ ) deseada, como se describe aquí.

El sistema puede comprender al menos un intercambiador de calor en comunicación de fluido con las turbinas para recibir la corriente de descarga de las turbinas y refrigerar la corriente para formar una corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> refrigerado. De la misma manera, el al menos un intercambiador de calor se puede utilizar para calentar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> que se introduce en la cámara de combustión. El (los) intercambiador(es) de calor se puede(n) caracterizar de una manera específica en relación a los materiales a partir de los cuales está(n) constituido, por que permite(n) el funcionamiento en condiciones específicas, como se describe aquí.

El sistema puede comprender también uno o más dispositivos para separar la corriente de fluido de circulación de

CO<sub>2</sub> que sale desde el intercambiador de calor en CO<sub>2</sub> y uno u otros más componentes para recuperación o disposición. De manera específica, el sistema puede comprender medios para separar agua (u otras impurezas descritas aquí) a partir de la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub>.

5 El sistema puede comprender, además, uno o más dispositivos (por ejemplo, compresores) en comunicación de fluido con el al menos un intercambiador de calor y/o en comunicación de fluido con uno o más de los dispositivos de separación) para comprimir el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> purificado. Además, el sistema puede comprender medios para separar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en dos corrientes, una corriente para el paso a través del intercambiador de calor y en la cámara de combustión y una segunda corriente para suministro a una tubería presurizada (u otros  
10 medios para recogida y/o disposición del CO<sub>2</sub>).

En algunas formas de realización, se pueden incluir incluso otros componentes en el sistema. Por ejemplo, el sistema puede comprender una unidad de separación de O<sub>2</sub> para suministro de O<sub>2</sub> dentro de la cámara de combustión (o en un inyector p dispositivo similar mezclar el O<sub>2</sub> con uno u otros más materiales). En algunas formas  
15 de realización, la unidad de separación de aire puede generar calor. De esta manera, puede ser útil que el sistema comprenda, además, uno o más componentes de transferencia de calor que transfieren calor desde la unidad de separación de aire hasta la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> curso arriba desde la cámara de combustión. En otras formas de realización, un sistema de acuerdo con la invención puede comprender cualquiera o todos los componentes descritos de otra manera aquí en relación al ciclo de generación de potencia y los métodos de  
20 generación de potencia.

En otras formas de realización, la invención comprende sistemas y métodos particularmente útiles en la producción de potencia utilizando un combustible (tal como carbón) que deja un residuo incombustible después de la combustión. En ciertas formas de realización, tales materiales incombustibles se pueden eliminar de la corriente de  
25 producto de la combustión a través del uso de un dispositivo apropiado, tal como un aparato de retirada de contaminantes ilustrado en la figura 4. Sin embargo, en otras formas de realización, puede ser útil gestionar los materiales incombustibles a través del uso de un sistema de cámaras de combustión múltiples, tales como se ilustran en la figura 10.

30 Como se muestra en la figura 10, el combustible de carbón 254 se puede pasar a través de un aparato triturador 900 para proporcionar un carbón en polvo. En formas de realización específicas, el carbón puede tener un tamaño medio de las partículas de aproximadamente 10 µm a aproximadamente 500 µm, de aproximadamente 25 µm a aproximadamente 400 µm, o de aproximadamente 50 µm a aproximadamente 200 µm. En otras formas de realización, el carbón se puede describir por que más del 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 %, 91 %, 92 %, 93 %, 94 %, 95 %, 96 %, 97 %, 98 %, 99 %, o 99.5 % de las partículas de carbón tienen un tamaño medio inferior a  
35 aproximadamente 500 µm, 450 µm, 400 µm, 350 µm, 300 µm, 250 µm, 200 µm, 150 µm, o 100 µm. El carbón en polvo se puede mezclar con una sustancia de fluidización para proporcionar en carbón en la forma de una suspensión. En la figura 10, el carbón en polvo se combina en la mezcladora una toma lateral de CO<sub>2</sub> 68 desde el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado. En la figura 10, la toma lateral de CO<sub>2</sub> 68 se extrae desde la corriente 67, que ha sido sometida a procesamiento para proporcionar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> en un estado supercrítico de alta densidad. En formas de realización específicas, el CO<sub>2</sub> utilizado para formar la suspensión de carbón puede tener una densidad de aproximadamente 450 kg/m<sup>3</sup> a aproximadamente 1.100 kg/m<sup>3</sup>. Más particularmente, la toma lateral de CO<sub>2</sub> 68 puede cooperar con el carbón en partículas para formar una suspensión 255 que tiene, por ejemplo, entre  
40 aproximadamente 10 % en peso y aproximadamente 75 % en peso o entre aproximadamente 25 % en peso y aproximadamente 55 % en peso del carbón en partículas. Además, el CO<sub>2</sub> tomado en la toma lateral 68 utilizado para formar la suspensión puede estar a una temperatura inferior a aproximadamente 0 °C, inferior a aproximadamente -10 °C, inferior a aproximadamente -20 °C, o inferior a aproximadamente -30 °C. En otras formas de realización, el CO<sub>2</sub> tomado en la toma lateral 68 utilizado para formar la suspensión puede estar a una temperatura de aproximadamente 0 °C a aproximadamente -60 °C, de aproximadamente -10 °C a aproximadamente  
45 -50 °C, o de aproximadamente -18 °C a aproximadamente -40 °C.

La suspensión de carbón en polvo/CO<sub>2</sub> 255 se transfiere desde la mezcladora 910 a través de una bomba 920 hasta una cámara de combustión de oxidación parcial 930. Se forma una corriente de O<sub>2</sub> utilizando una unidad de separación de aire 30 que separa aire 241 en O<sub>2</sub> purificado, como se describe aquí. La corriente de CO<sub>2</sub> es dividida  
55 en la corriente de O<sub>2</sub> 243, que se dirige a la cámara de combustión de oxidación parcial 220. En la forma de realización de la figura 10, una corriente de CO<sub>2</sub> 86 es tomada desde la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado 85 para uso en la refrigeración de la cámara de combustión de oxidación parcial 930. En otras formas de realización, el CO<sub>2</sub> para uso en la refrigeración de la cámara de combustión de oxidación parcial 930 se puede tomar de la corriente 236 en lugar de la corriente 86 o la corriente 236. Con preferencia, la cantidad de CO<sub>2</sub> tomada es suficiente para refrigerar la temperatura de la corriente 256, de tal manera que la ceniza está presente en una forma sólida que se puede retirar con seguridad. Como se describe aquí de otra manera, el CO<sub>2</sub>, carbón y O<sub>2</sub> son proporcionados a la cámara de combustión de oxidación parcial 930 en relaciones tales que el carbón en oxidado sólo parcialmente para producir una corriente de producto de la combustión 256 oxidada parcialmente, que comprende CO<sub>2</sub> junto con uno o más de H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, y NH. El CO<sub>2</sub>, carbón y O<sub>2</sub> son introducidos también en  
60

la cámara de combustión de oxidación parcial 930 en relaciones necesarias para que la temperatura de la corriente de producto de la combustión parcialmente oxidado 356 sea suficientemente baja para que toda la ceniza presente en la corrientes 256 esté en la forma de partículas sólidas que se pueden retirar fácilmente por uno o más separadores de ciclón y/o filtros. La forma de realización de la figura 10 ilustra la retirada de la ceniza por medio de filtro 940. En formas de realización específicas. La temperatura de la corriente de producto de la combustión parcialmente oxidado 356 puede ser inferior a aproximadamente 1.100 °C, inferior a aproximadamente 1.000 °C, inferior a aproximadamente 900 °C, inferior a aproximadamente 800 °C, o inferior a aproximadamente 700 °C. En otras formas de realización, la temperatura de la corriente de producto de la combustión parcialmente oxidado 356 puede ser de aproximadamente 300 °C a aproximadamente 1.000 °C, de aproximadamente 400 °C a aproximadamente 950 °C, o aproximadamente 500 °C a aproximadamente 900 °C.

La corriente de combustión filtrada, parcialmente oxidada 257 puede introducirse directamente en la segunda cámara de combustión 220, que puede ser una cámara de combustión refrigerada por transpiración, como se describe de otra manera aquí. Esta entrada está prevista junto con la corriente de O<sub>2</sub> 242, y la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado 236. La combustión en este punto se puede realizar de manera similar como se describe de otra manera aquí. Los materiales de la combustión corriente de producto de la combustión 256 oxidada parcialmente son quemados en la cámara de combustión 220 en la presencia de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> para proporcionar la corriente de combustión 40. Esta corriente se expande a través de las turbinas 320 para producir potencia (por ejemplo, a través del generador 1209). La corriente de descarga de la turbina 50 se pasa a través de una unidad de intercambiador de calor 420 (que puede ser una serie de intercambiadores de calor, tal como se describe en relación a la figura 8). La corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> 60 se pasa a través del intercambiador de calor de agua fría 530 para formar la corriente 61, que se pasa al separador 540 para la retirada de componentes secundarios (por ejemplo, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, y Hg) en la corriente 62. El separador 540 puede ser sustancialmente similar a la columna 1330 descrita en relación a la figura 12 a continuación. Con preferencia, el separador 540 comprende un reactor que proporciona un contactor con tiempos de resistencia suficientes para que las impurezas puedan reaccionar con agua para formar materiales (por ejemplo, ácidos) que son eliminados fácilmente. La corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> purificado 65 se pasa a través del primer compresor 630 para formar la corriente 66, que se refrigera con el intercambiador de calor de agua fría 640 para proporcionar el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> supercrítico de alta densidad 67. Como se ha descrito anteriormente, una porción de la corriente 67 se puede extraer como corriente 68 para uso como el medio de fluidización en la mezcladora 910 para formar la corriente de suspensión de carbón 255. La corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> supercrítico de alta densidad 67 es presurizada, además, de otra manera en el compresor 650 para formar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado, supercrítico de alta densidad 70. Una porción del CO<sub>2</sub> en la corriente 70 se puede extraer en el punto 720, como se describe aquí en relación a la figura 5 y la figura 11 para proporcionar la corriente 80 a la tubería de CO<sub>2</sub> o a otros medios de recogida. La porción restante del CO<sub>2</sub> funciona como corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> supercrítico de alta densidad 85, una porción de la cual se puede extraer como corriente 86 para uso para refrigeración de la cámara de combustión de oxidación parcial 930, como se ha descrito anteriormente. De otra manera, la corriente 85 es pasada de retorno a través del intercambiador de calor 420 (o una serie de intercambiadores de calor, como se describe en relación a la figura 8) para calentar la corriente y finalmente formar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado 236 para introducción en la cámara de combustión 220. Como se ha descrito anteriormente, se puede utilizar una fuente de calor externa en combinación con la unidad de intercambiador de calor 420 para proporcionar la eficiencia necesaria. De la misma manera, otros parámetros de los sistemas y métodos como se describen de otra manera aquí se pueden aplicar al sistema y método de acuerdo con la figura 10, tales como temperaturas y presiones del vapor, así como otras condiciones operativas para la unidad de turbina 320, la unidad de intercambiador de calor 420, la unidad de separación 520, y la unidad de compresor 630.

La descripción anterior se ha referido a varios elementos de los sistemas y métodos descritos actualmente que pueden proporcionar incrementos inesperados en eficiencia que no han sido descritos hasta ahora en la técnica. De manera sorprendente, la presente invención es todavía más beneficiosa por que se pueden conseguir ganancias adicionales significativas a través de la utilización caídas directas de la temperatura y/o de la presión en cualquier punto de un ciclo cerrado de producción de potencia, como se describe aquí utilizando un fluido de trabajo de CO<sub>2</sub>. Combinaciones específicas de dispositivos de expansión y de cámaras de combustión, que se pueden adaptar para operación en serie o en paralelo, pueden comprender una variedad de condiciones, en donde el calentamiento de un fluido en la cámara de combustión y/o la refrigeración del fluido en el dispositivo de expansión es opcional, y se pueden posicionar en uno o más segmentos del ciclo cerrado para recuperar energía disponible de una manera que no se había reconocido hasta ahora.

En formas de realización particulares, por ejemplo, sistemas y métodos de la presente invención pueden comprender un sistema de turbina que está adaptado para incrementar al máximo la salida de potencia para un flujo de CO<sub>2</sub> reciclado de alta presión fijo dado y presión utilizando una o más turbinas adicionales. En formas de realización específicas, una o más de las otras turbinas pueden tomar parte o todo el flujo de descarga desde la primera turbina. El flujo desde la primera turbina se puede recalentar opcionalmente utilizando una segunda cámara de combustión de oxi-combustible, y el flujo recalentado se puede expandir entonces hasta cerca de presión atmosférica a través de una o más turbinas adicionales. El flujo desde uno o más dispositivos de expansión

adicionales se puede utilizar para proporcionar al menos parte del flujo de refrigeración total utilizado para calentar la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado de alta presión.

La presión de entrada de la segunda turbina (o turbinas siguientes en una serie) se puede definir por la presión de descarga de la primera turbina (o la turbina curso arriba inmediata en una serie) menos la caída de la presión a través de la tubería y cualquiera cámara de combustión interpuesta entre las turbinas. Además, la temperatura de descarga de la segunda turbina (o turbinas siguientes en una serie, se puede definir por la temperatura máxima de diseño del intercambiador de calor recuperativo e la presión que se define por la presión de la corriente de entrada de la turbina de máxima presión.

En una forma de realización se pueden usar dos turbinas y todo el flujo desde la primera turbina puede ser recalentado y mezclado con productos de la combustión de un combustible hidrocarburo y/o combustible gaseoso carbonoso con oxígeno en una segunda cámara de combustión interpuesta y entonces se expande en una segunda turbina que produce potencia de estator adicional. Puesto que la temperatura de salida de la turbina se fija por las condiciones de diseño del intercambiador de calor de recuperador, la temperatura de entrada de la segunda turbina está fijada de una manera similar una vez que se ha determinado la presión de salida de la segunda turbina.

En algunas formas de realización una o más de las turbinas utilizadas en los sistemas y métodos descritos se pueden adaptar para proporcionar energía mecánica desde la potencia del estator de la turbina (es decir, más que producir energía eléctrica). Una o más turbinas pueden estar entonces en una conexión de trabajo mecánico con uno o más componentes adicionales de los presentes sistemas y métodos (por ejemplo, un compresor, una bomba, una unidad de separación de aire). Por ejemplo, una pluralidad de turbinas puede estar en una conexión mecánica con una o más componentes adicionales, incluyendo un generador. En otro ejemplo, cada una de una pluralidad de turbinas puede estar por separado en conexión mecánica con un componente individual utilizando la potencia del estator de la turbina. En otras formas de realización, la conexión de trabajo mecánico se puede utilizaren combinación con otro sistema o método. En particular, cualquier sistema o método industrial que se beneficie de la provisión de potencia a partir de la rotación mecánica se puede combinar con los métodos y sistemas descritos actualmente.

En otras formas de realización, la salida de potencia de la segunda turbina (o de otra turbina cuando se utilizan tres o más turbinas) se puede incrementar al máximo a través de la operación de tal manera que la presión de descarga de la turbina está próxima a la presión atmosférica. Específicamente, esto puede permitir la caída de la presión a través del intercambiador de calor recuperativo, el refrigerador del ambiente, y los componentes separadores de agua líquida de todo el ciclo de producción de energía. La presión puede estar con preferencia por encima de 0,9 bares (0,09 MPa) para evitar caudales de flujo volumétrico grandes en el compresor de CO<sub>2</sub> reciclado.

En algunas formas de realización, una turbina individual de fases múltiples puede utilizarse de acuerdo con la presente descripción. En otras formas de realización, se puede utilizar una pluralidad de turbinas de fase individual. La temperatura de salida fija de la segunda turbina puede conducir a una temperatura de entrada definida por la relación entre la presión de salida de la primera turbina y la presión de la segunda turbina. En general, se ha encontrado que la temperatura de entrada de la primera turbina se puede fijar ahora en el valor más alto posible consistente con el diseño, material y consideraciones de vida, lo que significa que la potencia de salida de la primera turbina se puede incrementar considerablemente comparada con un caso de una turbina individual. La razón para esto es que puesto que toda la salida de la primera turbina entra ahora en la segunda turbina, no existe ahora ya ninguna limitación de la temperatura sobre la temperatura de salida de la primera turbina causada por consideraciones de diseño para el intercambiador re calor recuperativo, debido a que el flujo de salida de la primera turbina no pasa ya a través del intercambiador de calor recuperativo. La temperatura de entrada de la segunda turbina puede ser más alta que la temperatura de descarga de la primera turbina que resulta de la segunda cámara de combustión de oxi-combustible, que calienta por combustión directa el flujo de entrada de la segunda turbina en el caso de flujo completo de la primera temperatura dentro de la segunda turbina. La temperatura de entrada de CO<sub>2</sub> reciclado a la primera cámara de combustión y la temperatura de salida de la segunda turbina son virtualmente idénticas para los casos de turbina individual y de dos turbinas, como se define con todo el flujo de descarga de la primera turbina que entra en la segunda turbina. La potencia de salida de la primera turbina se incrementa, sin embargo, considerablemente incrementando la temperatura de entrada con la combustión de oxi-combustible de más combustible gaseoso en la primera cámara de combustión. El valor del combustible adicional quemado en el caso de dos turbinas se convierte en potencia del estator cerca del 100 % de eficiencia. Esto conduce a un incremento significativo en la salida total de potencia y eficiencia para el sistema de dos turbinas comparado con un sistema de una turbina individual. El incremento en el equipo instalado y el coste del sistema de dos turbinas es básicamente tomar el caso de una turbina individual y añadir la segunda turbina y cámara de combustión más el compresor de reciclado adicional para incrementar la presión desde cerca de la presión atmosférica hasta la presión de salida de la turbina refrigerada del caso de una turbina individual. Éste no es un incremento grande de coste comparado con el incremento en potencia de salida que es hasta 280 %. Utilizando números de diseño de proceso real representativo para un sistema, la eficiencia utilizando combustible de gas natural está en el intervalo de 58,5 % a 62 % en (base de vapor calefactor inferior) en Condiciones ISO con todo el CO<sub>2</sub> producido a presión atmosférica.

La compresión del producto neto de CO<sub>2</sub> a 300 bares (30 MPa) reducirá estas eficiencias en aproximadamente 1,8 puntos porcentuales dependiendo principalmente de las eficiencias del compresor y de la turbina.

El combustible y oxígeno adicionales utilizados en la segunda cámara de combustión se añade al flujo de la segunda turbina y resulta en un flujo de escape adicional pequeño de la turbina disponible para otras actividades de calentamiento, una vez que la cantidad de flujo de la turbina requerida para calentar el CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión ha sido utilizada en el intercambiador de calor recuperativo. Este flujo pequeño adicional está típicamente en el intervalo de 4 % a 8 % del flujo total de la segunda turbina cuando todo el flujo de la primera turbina pasa a la segunda turbina. Este flujo a temperatura de descarga de la turbina se puede utilizar para precalentar el combustible utilizado en las dos turbinas y el oxidante utilizado en la segunda cámara de combustión. Hay que indicar que el oxidante utilizado en la primera cámara de combustión se diluye generalmente con CO<sub>2</sub> y se calienta en el intercambiador de calor regenerativo.

El sistema de dos turbinas puede utilizar un calor de nivel de baja temperatura para contribuir al calentamiento la corriente de reciclado de CO<sub>2</sub> a alta presión derivada típicamente de la compresión adiabática de al menos parte de la alimentación de aire a la planta de separación de aire criogénico, aunque también están comprendidas otras fuentes de calor. En algunas formas de realización, parte de la energía térmica presente en el flujo de descarga de exceso de la segunda turbina puede ser utilizada para proporcionar al menos parte de este ciclo de calentamiento de CO<sub>2</sub> reciclado de nivel de baja temperatura. La operación de la segunda turbina a una presión de descarga próxima a la presión atmosférica significa que una porción de oxígeno requerido para la primera cámara de combustión puede ser producido a partir de la planta de oxígeno cerca de la presión atmosférica. Entonces se puede mezclar con el CO<sub>2</sub> reciclado aproximadamente a presión atmosférica. Entonces se puede mezclar con CO<sub>2</sub> reciclado a presión aproximadamente atmosférica después de la separación del agua líquida, dando una composición de 15 % a 45 % molar de O<sub>2</sub>, que es comprimido entonces a la presión de descarga de la corriente de reciclado a alta presión de CO<sub>2</sub> con un incremento de la presión equivalente a la caída de la presión a través del sistema de quemadores de la primera cámara de combustión. Esto puede proporcionar una alternativa a la producción de oxígeno a partir de la planta de separación de aire a las presiones más altas requeridas para las cámaras de combustión.

En algunas formas de realización, el flujo en la segunda turbina puede estar limitado a la cantidad de un contenido de CO<sub>2</sub> que es igual al carbono oxidado presente en el combustible utilizado en la primera y segunda cámaras de combustión. En este caso, todo el flujo de descarga del segundo dispositivo de expansión a presión próxima a la atmosférica se puede pasar a través de un conjunto separado de pasos en el intercambiador de calor recuperativo. Se puede descargar a la atmósfera después de abandonar el extremo frío del intercambiador de calor recuperativo. Si el producto de CO<sub>2</sub> neto debe ser recuperado para desecho, se puede comprimir a la presión de aspiración del compresor de CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión y se puede producir a cualquier presión a partir de ese punto hasta la presión de reciclado que entra en el intercambiador de calor recuperativo para suministro de un sistema de tubería para desecho.

En algunas formas de realización de un sistema de dos tuberías, todo el flujo de la primera tubería puede pasar a través de la segunda tubería que tiene una presión de descarga próxima a la atmosférica. Tales formas de realización pueden integrarse con una instalación calefactora de gas natural líquido presurizado utilizada para suministro de gas natural desde un terminal de recepción de LNG hasta un sistema de tubería de gas natural a alta presión. Un sistema de este tipo que utiliza una turbina individual se describe en la Solicitud de Patente de los EE.UU. en tramitación con la presente N° 13/666.522. En tales formas de realización, el CO<sub>2</sub> a presión próxima a la atmosférica desde la segunda turbina, después de la separación del agua líquida, se puede comprimir a una presión en el intervalo de aproximadamente 6 bares (0,6 MPa) a aproximadamente 10 bares (1 MPa), que está por encima de la presión de congelación del CO<sub>2</sub> de 5,18 bares (0,518 MPa). El gas CO<sub>2</sub> se seca entonces en un secador secante hasta un punto de rocío inferior a -56°C y se pasa a un intercambiador de calor de licuación, donde es licuado contra una corriente de gas natural a alta presión en condiciones de entrada que tienen típicamente una presión en el intervalo de aproximadamente 40 bares (4 MPa) a aproximadamente 70 bares (7 MPa) y una temperatura en el intervalo de aproximadamente -160 °C a aproximadamente -140 °C. El gas natural abandona el licuador de CO<sub>2</sub> a una temperatura próxima a aproximadamente 10°C a aproximadamente 20°C hasta la temperatura de entrada del CO<sub>2</sub>. El CO<sub>2</sub> licuado es bombeado en una bomba centrífuga de fases múltiples a la presión requerida de reciclado de CO<sub>2</sub>. El producto CO<sub>2</sub> neto se puede producir a partir de la planta como CO<sub>2</sub> líquido a una presión de aproximadamente 6 bares (6 MPa) a 10 bares (1 MPa). Este CO<sub>2</sub> líquido se puede transportar fácilmente para desecho o uso para recuperación mejorada del aceite. Tal uso se describe en la Publicación de Patente de los EE.UU. N° 2012/0067568 a nombre de Palmer et al. En el caso de su uso para recuperación mejorada de aceite, el O<sub>2</sub> y el contenido de gas inerte se pueden ajustar para caer dentro del intervalo de partes por millón para cumplir las especificaciones de pureza requeridas. Una variante particular de este sistema es accionar la segunda turbina con una presión de descarga en el intervalo de aproximadamente 6.5 bares (0,65 MPa) a aproximadamente 10,5 bares (1,05 MPa) para que no se requiera ningún compresor de CO<sub>2</sub> después de la refrigeración en el intercambiador de calor recuperativo, refrigerador ambiente y separador de agua. La temperatura de entrada de la segunda turbina se reducirá debido a la relación de presión inferior. Ambas de estas formas de realización pueden proporcionar eficiencias muy altas debido a la reducción grande en potencia de compresión de

CO<sub>2</sub> y en ahorro en gas natural que normalmente sería consumido en un radiador de baño de agua de combustión sumergido para elevar la temperatura del gas natural frío a alta presión a cerca de temperatura ambiente para el transporte por tubería.

5 EXPERIMENTAL

La invención se describe a continuación, además, en relación a ejemplos específicos. Los ejemplos son proporcionados para ilustrar ciertas formas de realización de la invención y no deberían interpretarse como limitación de la invención.

10 EJEMPLO 1

Sistema y método para la producción de energía con combustión de metano utilizando un fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado

15 Un ejemplo de antecedentes para llevar a cabo un sistema y método de acuerdo con la presente invención se ilustra en la figura 11. La descripción siguiente describe el sistema en relación a un ciclo específico en condiciones específicas utilizando un modelo por ordenador.

En este modelo, una corriente de combustible metano (CH<sub>4</sub>) 254 a una temperatura de 134 °C y una presión de 30,4 MPa se combina con una corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado 236 a una temperatura de 860 °C y una presión de 30,3 MPa (y, por lo tanto, en un estado fluido supercrítico) en una mezcladora 252 antes de la introducción en una cámara de combustión refrigerada por transpiración 220. Se utiliza una unidad de separación de aire 30 para proporcionar O<sub>2</sub> concentrado a una temperatura de 105 °C y una presión de 30,5 MPa. La unidad de separación de aire produce también calor (Q) que es retirado para uso en el proceso. El O<sub>2</sub> se combina en la cámara de combustión 220 con la corriente de combustible de metano 254 y el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> 236 donde ocurre la combustión para proporcionar la corriente de producto de la combustión 40 a una temperatura de 1189 °C y una presión de 30 MPa. El CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y metano son proporcionados en una relación molar de aproximadamente 35:2:1 (es decir, lbmol/h – libras moles por hora). La combustión en esta forma de realización utiliza entrada de energía a una tasa de 344.935 Btu/h (363.932 kJ/h).

30 La corriente de producto de la combustión 40 se expande a través de la turbina 320 para producir la corriente de descarga de la turbina 50 a una temperatura de 885 °C y una presión de 5 MPa (estando el CO<sub>2</sub> en la corriente de descarga de la turbina 50 en un estado gaseoso). La expansión de la corriente de producto de la combustión 40 a través de la turbina 320 produce energía a una tasa de 83,5 kilovatios por hora (kW/h).

35 La corriente de descarga de la turbina 50 se pasa entonces a través de una serie de tres intercambiadores de calor para refrigerar sucesivamente la corriente para eliminación de componentes secundarios. El paso a través del primer intercambiador de calor 430 produce la corriente 52 a una temperatura de 237 °C y una presión de 5 MPa. La corriente 52 se pasa a través de un segundo intercambiador de calor 440 para producir la corriente 56 a una temperatura de 123 °C y una presión de 5 MPa. La corriente 56 se pasa a través del tercer intercambiador de calor 450 para producir la corriente 60 a una temperatura de 80 °C y una presión de 5 MPa.

Después del paso del fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado a través de la serie de intercambiadores de calor, la corriente 60 es refrigerada todavía más por el paso a través de un intercambiador de calor de agua fría 530. Agua (C) a una temperatura de 24 °C es ciclada a través del intercambiador de calor de agua fría 530 para refrigerar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> 60 a una temperatura de 27 °C y de esta manera condensar cualquier agua presente en la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub>. La corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> refrigerado 61 se pasa entonces a través de una unidad de separación de agua 540, de tal manera que el agua líquida es retirada y descargada como corriente 62a. La corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> "seco" 65 se descarga desde la unidad de separación de agua 540 a una temperatura de 34 °C y una presión de 3 MPa.

50 La corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> seco 65 (que está todavía en un estado gaseoso) se pasa a continuación a través de una primera unidad de compresión 630 en un sistema de presurización de dos fases. La corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> es presurizada a 8 MPa, que eleva asimismo la temperatura de la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> a 78 °C. Esto requiere una entrada de energía de 5.22 kW/h. Esta corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> fluido supercrítico 66 se pasa entonces a través de un segundo intercambiador de calor de agua fría 640 donde la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> fluido supercrítico 66 se refrigera con agua a una temperatura de 24 °C para producir una corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> fluido supercrítico refrigerado 67 a una temperatura de 27 °C, una presión de 8 MPa, y una densidad de 762 kg/m<sup>3</sup>. Esta corriente se pasa entonces a través de una segunda unidad de compresión 650 para formar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado 70 a una temperatura de 69 °C y una presión de 30,5 MPa. Esto requiere una entrada de energía de 8,23 kW/h. Esta corriente se pasa a través de un divisor de tubería 720. de manea que 1 lbml (libra mol) de CO<sub>2</sub> se dirige a una tubería presurizada a través de la corriente 80, y 34,1 lbmol (libras mol) de CO<sub>2</sub> se dirige como corriente 85 de retorno a través de la serie de tres intercambiadores de calor para recalentar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> antes de entrar en la cámara de combustión 220.

La corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> presurizado 85 se pasa a través del tercer intercambiador de calor 450 para formar la corriente 71 a una temperatura de 114 °C y una presión de 30,5 MPa. La corriente 71 se pasa a través del divisor 460, de tal manera que 27,3 lbmol (libras mol) de CO<sub>2</sub> se dirigen en la corriente 72a a través del radiador lateral 470. Cada una de la corriente 71b y la corriente 72a tiene una temperatura de 114 °C a una presión de 30,5 MPa. El radiador lateral 470 utiliza calor (Q) desde la unidad de separador de aire 30 para proporcionar calor adicional a la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub>. El paso de la corriente 71b a través del segundo intercambiador de calor 440 produce la corriente 73 a una temperatura de 224 °C y una presión de 30,5 MPa. El paso de la corriente 72a a través del radiador lateral 470 forma la corriente 72b que está asimismo a una temperatura de 224 °C y una presión de 30,4 MPa. Las corrientes 73 y 72b se combinan en la mezcladora 480 para formar la corriente 74 a una temperatura de 224 °C y una presión de 30,3 MPa. La corriente 74 se pasa entonces a través del primer intercambiador de calor 430 para proporcionar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado 236 a una temperatura de 860 °C y una presión de 30,0 MPa para entrada de retorno en la cámara de combustión 220.

La eficiencia para el ciclo modelado anterior se calculó sobre la base de la energía generada en comparación con el LHV del combustible metano y la entrada de energía adicional en el sistema, como se ha descrito anteriormente. En las condiciones del modelo, se consiguió una eficiencia de aproximadamente 53,9 %. Esto es particularmente sorprendente por que tal eficiencia excelente se puede conseguir previniendo al mismo tiempo la descarga a la atmósfera de cualquier CO<sub>2</sub> (en particular cualquier CO<sub>2</sub> que procede de la combustión del combustible que contiene carbono).

#### EJEMPLO 2

Sistema y método para producción de energía con una estación de energía de carbón pulverizado retroajustada para unos de un fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado

Otro ejemplo de antecedentes para llevar a cabo un sistema y método de acuerdo con la presente invención se ilustra en la figura 12. La descripción siguiente describe el sistema en relación a un ciclo específico en condiciones específicas utilizando un modelo matemático. Este modelo ilustra la capacidad para retroajustar un sistema y modelo como se describe aquí a una estación de energía quemada con carbón pulverizado convencional.

.Se introduce una corriente de O<sub>2</sub> 1056 a una presión de 30,5 MPa en una cámara de combustión 220 refrigerada por transpiración junto con un combustible que contiene carbono 1055 (por ejemplo, gas derivado de carbón producido por oxidación parcial) a una presión de 30,5 MPa y una corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> 1053 a una presión de 30,5 MPa. El O<sub>2</sub> puede ser recibido desde un separador de aire o dispositivo similar que puede producir calor (Q), que se puede retirar para uso en el sistema, tal como para producir vapor para expansión o para añadir calor a una corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> refrigerado. La combustión del combustible en la cámara de combustión 220 produce una corriente de producto de la combustión 1054 a una temperatura de 1.150 °C y una presión de 30,0 MPa. Esta corriente se expande a través de una turbina 320 (que puede referirse, en general, como una turbina de producción de energía primaria) para producir energía accionando un generador eléctrico 1209. La corriente de descarga de la turbina de expansión 1001 a una temperatura de 775 °C y una presión de aproximadamente 3,0 MPa se introduce en el extremo caliente de un intercambiador de calor 1100, donde el calor de la corriente de descarga de la turbina de la corriente de descarga de turbina 1001 se utiliza para sobrecalentar el flujo de vapor a alta presión 1031 y el flujo de corriente de presión intermedia 1032 producido en una estación de energía quemada con carbón en polvo 1800 convencional. El agua 1810 y el carbón 1810 alimentados a la caldera son introducidos en la estación de energía 1800 para producir los flujos de vapor 1031 y 1032 por combustión del carbón 1810. La transferencia de calor en el intercambiador de calor sobrecalienta los flujos de vapor 1031 y 1032 desde una temperatura de aproximadamente 550 °C hasta una temperatura de aproximadamente 750 °C para formar los flujos de vapor 1033 y 1034, que se retornan a la estación de energía como se describe a continuación. Este método consigue temperaturas muy altas del vapor sin la necesidad de utilizar aleaciones de expansivas a alta temperatura en las calderas de vapor grandes de una estación de energía convencional que quema carbón cerca de presión atmosférica. Los flujos de vapor 1033 y 1034 se expanden en una turbina de tres fases 1200 (que se puede referir, en general, como una turbina de producción de energía secundaria) que acciona un generador eléctrico 1210. El vapor 1035 que sale desde la turbina 1200 se condensa en un condensador 1220. El condensado tratado 1036 es bombeado a alta presión con una bomba de agua de alimentación 1230 y entonces es vaporizado y sobrecalentado en la caldera quemada con carbón 1800 para descarga al intercambiador de calor 1100, como se ha descrito anteriormente. Este sistema se utiliza para incrementar la salida de energía y la eficiencia de una estación de energía quemada con carbón existente.

El intercambiador de calor 100 es un intercambiador de calor de placa adherida por difusión del tipo Heatric con pasos perforados químicamente construidos con aleación de alto contenido de níquel, a alta temperatura, tal como la aleación 617, que es capaz de gestionar altas presiones y temperaturas que permiten un vapor significativamente sobrecalentado y el funcionamiento en condiciones oxidantes. Este intercambiador de calor es una unidad de intercambiador de calor de alta eficiencia con altos coeficientes de transferencia de calor para todos los fluidos.

La porción remanente del sistema y métodos ilustrados en la figuras 12 es similar en estructura y funcionamiento a los sistemas y métodos descritos de otra manera aquí. Específicamente, la corriente de descarga de la turbina de expansión 1001 se refrigera en el intercambiador de calor 1100 y abandona el extremo frío del intercambiador de calor 1100 como corriente de descarga 1037, que está a una temperatura de 575 °C. esta corriente es refrigerada adicionalmente contra una porción del condensado 1057 desde el condensador 1230 de la estación de energía en un tercer intercambiador de calor 1310 hasta una temperatura de 40 °C para formar la corriente 1039 que es refrigerada adicionalmente a una temperatura de 27 °C contra el agua de refrigeración en un intercambiador de calor 1320 de agua fría para formar la corriente 1040 a una presión de 2,87 MPa. El intercambiador de calor 1300 puede ser unidad de difusión de acero inoxidable Heatric 310.

La corriente refrigerada 1040 a 30 °C es alimentada a la base de una columna empaquetada 1330, que está equipada con una bomba de circulación 1340 que proporciona una corriente de circulación de ácido débil a contra-corriente que estable contacto a contra-corriente entre el gas de entrada y el ácido débil de depuración. Los SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, NO, y NO<sub>2</sub> se convierten en HNO<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y son absorbidos en el líquido junto con agua condensada y cualquier otro componente soluble en agua. El producto líquido neto desde la columna 1330 es removido en la línea 10342 y la presión se reduce a presión atmosférica y entra en un separador 1360. CO<sub>2</sub> disuelto se descarga en la línea 1043, se comprime utilizando una bomba 1350 hasta una presión de 2,85 MPa y fluye como corriente 1044 para unirse con la corriente 1045 que abandona la parte superior de la columna 1330. Estas corrientes combinadas forman el fluido de circulación de CO<sub>2</sub> que será reciclado de retorno a la cámara de combustión. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y HNO<sub>3</sub> disueltos en agua abandonan como corriente 1046 la base del separador 1360. Las concentraciones dependen de la composición del combustible y de la temperatura en la columna del contactor 1330. Hay que indicar que ácido nítrico está presente con preferencia en la corriente de ácido 1046, ya que el ácido nítrico reaccionará con cualquier mercurio presente y eliminará esta impureza completamente.

La corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado que entra en el compresor 1380 se seca primero hasta un punto de rocío de aproximadamente 60 °C en un secador de secante y entonces se purifica para eliminar O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, y Ar utilizando un esquema de separación a baja temperatura como se muestra en la solicitud de patente europea EP1952874 A1.

La corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado comprimido 1047 que abandona el compresor 1380 a una presión de 8,5 MPa es refrigerada con agua de refrigeración a 27 °C en un intercambiador de calor de agua fría 1370 que forma la corriente de fluido de CO<sub>2</sub> supercrítico dentro 1048, que se bombea a una presión de 30,5 MPa y una temperatura de 74 °C en la bomba 1390 para formar la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión 1050. Una porción del CO<sub>2</sub> es retirado de la corriente 1050 como corriente de producto de CO<sub>2</sub> 1049 para ser recogido o dispuesto de otra manera sin descarga a la atmósfera. En esta forma de realización, la corriente de producto de CO<sub>2</sub> 1049 se reduce en presión a la presión requerida de la tubería de aproximadamente 20 MPa y se pasa a una tubería de CO<sub>2</sub>.

La porción remanente de la corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión (ahora la corriente 1051) entra en el extremo frío del intercambiador de calor 1300. Esta corriente, que es un fluido supercrítico denso a 74 °C, debe recibir una cantidad considerable de calor de grado bajo para convertirla en un fluido con un calor específico mucho más bajo a una temperatura de 237 °C. En esta forma de realización, tal calor de grado bajo es proporcionado por una corriente de vapor LP 1052 a una presión de 0,65 MPa tomada desde la corriente de vapor que entra en la turbina de vapor a baja presión de la estación de energía convencional junto con calor adiabático de compresión derivado de compresores de aire en la planta de oxígeno criogénico que suministra la corriente de O<sub>2</sub> 1056. La corriente de baja presión sale del intercambiador de calor 1300 como corriente 1301. Opcionalmente, todo el calor puede ser proporcionado utilizando un número de corrientes de vapor disponibles desde la estación de energía quemada con carbón a presiones de hasta 3,8 MPa. Esta energía podría ser proporcionada también desde el calor (Q) formado por la unidad de separación de aire, como se ha descrito anteriormente. El calentamiento de la corriente lateral de parte de la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado proporciona una parte grande del calor requerido en el extremo frío del intercambiador de calor 1300 y permite una diferencia de temperatura pequeña de sólo aproximadamente 25 °C en el extremo caliente del intercambiador de calor 1300, lo que incrementa la eficiencia general.

La corriente de fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión, a alta temperatura 1053 abandona el intercambiador de calor 1300 a una temperatura de 550 °C y entra en la cámara de combustión 220, donde se utiliza para refrigerar los gases de la combustión derivados de la combustión de una corriente de gas natural 1055 (en esta forma de realización) con la corriente de oxígeno al 97 % molar 1056 para producir la corriente de producto de la combustión 1054, como se ha descrito anteriormente. En esta forma de realización, la trayectoria caliente de la turbina y las primeras hileras de palas de la turbina son refrigeradas utilizando una corriente de CO<sub>2</sub> 1058 tomada desde la corriente de descarga de la bomba 1050 a una temperatura de 74 °C. Si el sistema descrito anteriormente es accionado como una estación de energía autónoma combustible de gas natural simulado por CH<sub>4</sub> puro, entonces la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado 1053 entra en la cámara de combustión a una temperatura de aproximadamente 750 °C y el escape de la turbina 1001 entra en el intercambiador de calor 1300 a una temperatura de aproximadamente

775 °C.

La eficiencia del sistema de energía autónomo en esta forma de realización es 53,0 % (LHV). Esta cifra incluye el consumo de potencia para la planta de O<sub>2</sub> criogénico y la alimentación de gas natural y los compresores de CO<sub>2</sub>. Si el combustible era un carbón simulado con un valor de calentamiento de 27,92 MJ/kg (por ejemplo, parcialmente oxidado con ceniza retirada en una primera cámara de combustión y unidad de filtración seguida por la combustión de la mezcla de gas combustible y CO<sub>2</sub> en una segunda cámara de combustión), entonces la eficiencia sería 54 % (LHV). En ambos casos, virtualmente el 100 % del CO<sub>2</sub> derivado de carbono en el combustible sería producido a 20 MPa de presión de la tubería.

El sistema y el método descritos anteriormente e ilustrados en la figura 12 con combustible de carbón se pueden caracterizar por que se aplican a una estación de energía con parámetros específicos descritos a continuación. El efecto de convertir una estación de energía quemada con carbón en polvo de acuerdo con la presente invención se calcula de la siguiente manera:

Condiciones del vapor	Vapor HP: 16.6 MPa, 565 °C,	flujo: 473,14 kg/seg.
	Vapor LP: 4,02 MPa, 565 °C,	flujo: 371,62 kg/seg.
	Salida neta de energía:	493.7.Mw
	Carbón para la estación existente:	1256,1 Mw
	Eficiencia (LHV) neta:	39,31 %
	Captura de CO <sub>2</sub> %:	0

Planta convertida con mejora de la estación existente incorporando un sistema y método siguientes:

Salida neta de energía del sistema de energía de CO <sub>2</sub> :	371.7 Mw
Energía neta de la estación existente:	639.1 Mw
Energía neta total:	1010.8Mw
Carbón para el sistema de energía de CO <sub>2</sub> :	1053.6 Mw
Carbón para la estación existente:	1256.1 Mw
Eficiencia general (LHV) neta:	43.76 %
Captura de CO <sub>2</sub> capture %:	45.6 % *

- Observar que ni se captura ningún CO<sub>2</sub> desde la estación existente en este ejemplo

### EJEMPLO 3

Sistema y método para producción de energía con combustión de metano utilizando un fluido de circulación de CO<sub>2</sub> reciclado con múltiples etapas de expansión

La figura 13 muestra un sistema y método de acuerdo con la presente invención, que comprende dos turbinas que funcionan en serie con dos cámaras de combustión que quemad gas natural utilizando oxígeno puro como oxidante para precalentar las corrientes de entrada a cada una de las turbinas. La presencia de la segunda turbina de expansión incrementa significativamente la relación de la presión del sistema total de turbinas, reteniendo al mismo tiempo virtualmente el mismo régimen de calor del intercambiador de calor recuperativo. Este forma de realización se beneficia, además, de del incremento de la eficiencia proporcionado por la entrada de calor generado externamente (como se describe aquí) a un nivel de temperatura en el intervalo de aproximadamente 150 °C a 400 °C en la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión en el intercambiador de calor recuperativo. La fuente de este calor adicional es el calor de compresión adiabático del compresor de aire principal en la planta de separación de aire criogénico.

La forma de realización descrita en este ejemplo se puede definir por las siguientes ventajas. Se utilizan dos turbinas en serie para expandir un corriente de CO<sub>2</sub> reciclado caliente a alta presión entre una alta presión en el intervalo de 100 bares a 600 bares sobre una relación de la presión que es mayor que 20. Preferiblemente, la presión de descarga de la segunda turbina está por debajo de 1,5 bares y de una manera óptima está aproximadamente en 1,1 bares. En otras formas de realización, tales caídas de la presión se pueden con seguir a través del uso de tres o más turbinas. Las dos turbinas tienen flujos de entrada que son precalentados por combustión de un hidrocarburo o combustible carbonoso en oxígeno puro. En otras formas de realización, puede que no se requiera combustión antes de cada etapa de expansión. La segunda turbina deriva su flujo de entrada desde al menos parte del flujo de descarga desde la primera turbina junto con productos de la combustión a partir de la segunda cámara de combustión de precalentamiento. La temperatura máxima de salida de la segunda turbina se fija por la temperatura máxima disponible del material utilizado para construir el intercambiador de calor recuperativo en su extremo caliente y en la presencia de la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión, que entra en la cámara de combustión de la primera turbina. Cuando el flujo total desde la primera turbina se utiliza como el flujo de entrada a la segunda cámara de combustión, entonces la temperatura de entrada de la primera turbina puede ser lo más alta posible

sobre la base de las propiedades de los materiales utilizados para su construcción con el fin de incrementar al máximo la salida de potencia de la primera y segunda turbinas. Cuando el flujo total desde la primera turbina se utiliza como el flujo de entrada a la segunda cámara de combustión, la relación de la presión de la primera turbina se fija por la necesidad de incrementar al máximo la salida de potencia disponible desde la primera más la segunda turbina a una presión de entrada dada y la temperatura del CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión a la primera cámara de combustión y una presión de salida dada y temperatura de salida definida de la segunda turbina. Cada temperatura y presión de entrada para la primera turbina conduce a una relación de la presión óptima diferente para la primera turbina, una vez que se han definido la presión de entrada de la primera turbina y la presión de salida de la segunda turbina. Al menos parte del flujo de salida desde la segunda turbina se utiliza para proporcionar al menos parte del régimen de calor en el intercambiador de calor recuperativo utilizado para precalentar la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión que entra en la primera cámara de combustión. En general, existe un exceso de flujo de salida de la segunda turbina por encima del requerido para el paso a través del intercambiador de calor recuperativo para calentar el CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión y fluye oxígeno a la primera cámara de combustión. Éste se utiliza para al menos parte del precalentamiento de oxígeno para la segunda cámara de combustión más gas natural para la primera y segunda cámaras de combustión.

Una forma de realización ejemplar de un sistema de producción de energía de acuerdo con la presente invención se muestra en la figura 13. Se entiende que los números de referencia en la figura 13 se refieren sólo a elementos ilustrados en la figura 13. La presencia de los mismos números de referencia en una o más de las figuras 1 a 12 no está destinada a referenciar los mismos elementos.

El sistema de la figura 13 comprende dos turbinas en serie 3 y 4 que reciben corriente de fluido ricos en CO<sub>2</sub> a alta temperatura 67 y 57 y se montan en este caso sobre un árbol común que acciona un generador eléctrico 5 que produce salida de energía eléctrica 68. La corriente de flujo de entrada 67 de la turbina 3 está a una presión de 295 bares y a una temperatura de 1154 °C. Ha sido calentada en una cámara de combustión 1 por combustión de una corriente de gas natural 44 (simulada en este caso por propiedades de metano puro) a 204 °C y 304,4 bares utilizando una corriente oxidante 52 a 304,2 bares y 735 °C que comprende 25,6 % en mol de O<sub>2</sub> y 74,4 % de CO<sub>2</sub>, junto con una corriente de CO<sub>2</sub> reciclado 56 a 303,4 bares y 735 °C. El CO<sub>2</sub> reciclado total más CO<sub>2</sub> diluyente en el oxidante CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> es 29,2 veces mayor que el CO<sub>2</sub> producido por oxidación completa de combustible CH<sub>4</sub>. La corriente de escape 37 a 30 bares y 746 °C que abandona la turbinas 1 se divide en dos partes. La corriente 36 se mezcla con una corriente de oxígeno 35 a 30 bares y 316 °C y proporciona una corriente oxidante combinada 39 que quema una corriente de metano 40 a 30 bares y 204 °C. Los productos de la combustión son enfriados con la segunda corriente parcial 38 dando una corriente de entrada 57 de la turbina 4 a 29,1 bares y 1269 °C. La corriente de salida de la turbina 58 a 1,1 bares y 738 °C es refrigerada en los intercambiadores de calor recuperativos 14 y 13 que salen como corriente 60. Esta corriente junto con una parte de la corriente 58, corriente 71, que ha sido utilizada para precalentar corrientes de alimentación, está a una presión de 1,04 bares y 79 °C. Se refrigera en un refrigerador de agua de contacto directo 9 a 17,2 °C saliendo como corriente 63. El agua líquida que abandona la base de la empaquetadura utilizada para contacto directo entre agua y CO<sub>2</sub> se recoge en la base de 9 y se bombea por la bomba 75 a través del refrigerador de agua 10 hasta la parte superior de la torre 9. El agua producto neto producida por el ciclo de energía es retirada como corriente 62 para desecho. La corriente de salida 63 es comprimida en un sistema de compresor axial/centrífugo de fases múltiples mostrado como dos unidades separadas 6, que es refrigerada intermedia, y 7 que no tiene refrigeradores intermedios separados por un refrigerador intermedio 8 con corrientes de entrada y de salida 64 y 65 a una presión de 30 bares. Estos dos elementos compresores de reciclado de CO<sub>2</sub> separados se montan directamente sobre la turbina de gas común más el árbol de accionamiento del generador eléctrico. Esto proporciona una carga de frenado sobre las turbinas para prevenir el exceso de velocidad cuando el sistema funciona bajo en presión después de una desconexión del sistema. La corriente de salida 12 del compresor 12 a 57,5 bares y 93,3 °C se utiliza para calentar la salida desde una bomba 11 en el intercambiador de calor 75 a 35 bares desde 54,4 °C a 73,9 °C. La corriente de salida de CO<sub>2</sub> a 57,5 bares es refrigerada a 60 °C y luego es refrigerada y condensada en el intercambiador de calor 12 formando una alimentación de CO<sub>2</sub> líquido a la bomba 11. El calentamiento de CO<sub>2</sub> introducido en el intercambiador de calor recuperativo 13 asegura que la corriente 60 esté por encima de su punto de rocío. Hay que indicar que estas temperaturas y la presión correspondiente del CO<sub>2</sub> de 57,5 bares son relevantes para las condiciones ISO para el sistema. A temperaturas ambiente más altas, la presión de descarga del compresor 7 sería fijada aproximadamente en el intervalo de 57,5 bares a 100 bares, pero en todos estos casos, el CO<sub>2</sub> estaría a una densidad alta apropiada para una bomba centrífuga de fases múltiples 11. El flujo de descarga 47 de la bomba 11 se divide en dos corrientes. La corriente 46 se mezcla con una corriente de oxígeno 27 a 305 bares y 15,5 °C formando la corriente oxidante 45 que se calienta en los pre-radiadores 15 y 73 a una temperatura de 252 °C y entonces se calienta en el intercambiador de calor recuperativo 14 para formar la corriente oxidante a alta presión 52. La corriente 48 se divide de nuevo en dos corrientes. La corriente de flujo de CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión mayor se calienta en 13 y 14 formando la corriente de reciclado caliente 52. La corriente de flujo menor 49 se desvía del intercambiador de calor recuperativo 13 de temperatura más baja y se calienta a 185 °C como corriente 50 en el intercambiador de calor 15 contra la corriente de aire 24, que ha sido comprimida adiabáticamente en el compresor 16 con flujo de aire atmosférico 23, a 5,7 bares y 226 °C. La corriente 50 reúne la corriente de CO<sub>2</sub> caliente 54 y la corriente combinada 55 se calienta adicionalmente en 14 formando la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado caliente 56. La corriente de alimentación de aire

## ES 2 708 352 T3

refrigerado 25 que abandona 15 a 79,4 °C es refrigerada en un refrigerador de agua 17 de contacto directo y es pasada a través de un dispositivo de adsorción oscilante térmico 18 que elimina todo el agua y CO<sub>2</sub>. El volumen de la corriente de aire 29 entra en la caja fría de un a planta de separación de aire criogénico 20. La porción menor 30 entra en un compresor de aire 19 engranado integralmente de cinco fases que produce dos corrientes de aire presurizadas 31 a 60 bares y 32 a 100 bares, que entran también en la caja fría y se utilizan para calentar las corrientes de oxígeno de producto 34 a 30 bares y 27 a 305 bares hasta cerca de temperatura ambiente. La corriente de descarga 58 de la segunda turbina se divide en dos partes. La porción mayor 77 se requiere para precalentar el CO<sub>2</sub> reciclado y las corrientes oxidantes en los intercambiadores de calor recuperativo 13 y 14, La porción menor 69 pasa en serie a través de los intercambiadores de calor de precalentamiento 73 y 22. La unidad 22 se utiliza para precalentar la corriente de alimentación de metano total 43 a 40 bares y 15 °C, que se divide en una porción 41 utilizada como combustible en la cámara de combustión 2 y una porción 78 que es comprimida a 304,5 bares en el compresor refrigerado intermedio 21 y suministrada al pre-calentado 22 como corriente 42. La corriente de producto de CO<sub>2</sub> neta 66 derivada desde la corriente de metano oxidado 77 se puede producir a 1,04 bares a partir de la corriente 60 y a 304,8 bares a partir de la corriente 48 o a cualquier otra presión entre fases en los compresores 6 y 7.

En una forma de realización alternativa, todo el oxígeno desde el separador de aire puede ser suministrado a una presión de 32 bares. El O<sub>2</sub> para la cámara de combustión 1 se mezcla con CO<sub>2</sub> tomado desde la corriente 65 y comprimido en un compresor adicional a 305 bares. Se precalienta entonces como se ha descrito anteriormente y se utiliza como corriente oxidante 52. La corriente de O<sub>2</sub> restante es precalentada y suministrada como corriente 35 a la cámara de combustión 2.

En otra forma de realización alternativa, la porción de oxígeno para la cámara de combustión 2 desde el separador de aire se puede suministrar a 30 bares y la porción requerida para la cámara de combustión 1 a 1,2 bares se puede tomar y mezclar con una porción de CO<sub>2</sub> tomado desde la corriente 63. La mezcla de oxidante es comprimida entonces a 305 bares en un compresor de fases múltiples, luego es calentada en 15, 73 y 14 como anteriormente.

El efecto de incrementar la temperatura de entrada de la turbina 1 se puede ver en la Tabla siguiente, que se basa en el caso donde el O<sub>2</sub> para la cámara de combustión 1 se produce a una presión de 1,2 bares a partir de ASU y se mezcla con 1 bar de CO<sub>2</sub> de la corriente 65 y se comprime en un compresor de fases múltiples refrigerado intermedio a 305 bares. Esta Tabla se base en condiciones ISO utilizando metano puro como el combustible con un producto neto de CO<sub>2</sub> a 1 bar de presión y todo el agua derivada de la combustión del combustible producida como líquido a 17,2 °C. Todos estos casos se basan en una presión de entrada de la turbina 1 de 295 bares y una presión de salida de 30 bares y una presión de entrada de la turbina 2 de 29,1 bares y una presión de salida de 1,1 bares.

Temperatura de entrada de la turbina	1154,4 °C	1250,0 °C	1349,4 °C
Salida neta de energía	742,5 Mw	763,7 Mw	788,3 Mw
Flujo de CO <sub>2</sub> contenido a 1,2 bares	3226,5 MT/día	4022,6 MT/día	4873,1 MT/día
Flujo de CO <sub>2</sub> contenido a 30 bares	5511,0 MT/día	4863,9 MT/día	4178,8 MT/día
Eficiencia neta (base LHV)	58,58 %	59,23 %	59,85 %

Muchas modificaciones y otras formas de realización de la invención vendrán a la mente de un experto en la técnica a la que pertenece esta invención con el beneficio de las enseñanzas presentadas en las descripciones anteriores y los dibujos asociados. Por lo tanto, debe entenderse que la invención no está limitada a las formas de realización específicas descritas, pero su alcance se define por las reivindicaciones anexas. Aunque se emplean aquí términos específicos, se utilizan en un sentido general y descriptivo y no para fines de limitación.

REIVINDICACIONES

1. Un método de generación de energía, que comprende:

5 expandir una corriente de CO<sub>2</sub> a una presión de al menos aproximadamente 12 MPa a aproximadamente 60 MPa a través de una serie de primeras turbinas (3) y una última turbina (4) sobre una relación de la presión de al menos aproximadamente 20 para emitir desde la última turbina una corriente de descarga de la última turbina que está opcionalmente a una presión inferior a aproximadamente 0,15 MPa;  
 10 calentar una corriente de descarga desde la primera turbina (3) antes de pasar a la última turbina (4) en una cámara de combustión (2) por combustión de un hidrocarburo o combustible carbonoso en la presencia de un oxidante y la corriente de descarga de la primera turbina para formar una corriente de escape de la cámara de combustión a una temperatura de al menos aproximadamente 800 °C;  
 15 refrigerar la corriente de descarga de la última turbina en un intercambiador de calor de recuperador (14); aislar al menos una porción del CO<sub>2</sub> desde la corriente de descarga de la turbina refrigerada para formar la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado;  
 20 comprimir la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado;  
 calentar la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado comprimido en el intercambiador de calor de recuperador (14) contra la corriente de descarga de la última turbina;  
 y pasar la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado a la serie de turbinas (3, 4).

2. El método de la reivindicación 1, en donde la compresión comprender pasar la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado a través de un compresor (6, 7) de fases múltiples que comprime la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado a una presión de al menos aproximadamente 5.75 MPa y luego a través de una bomba (11) que incrementa la presión hasta al menos aproximadamente 12 MPa; en particular, en donde el compresor de fases múltiples comprende un primer compresor (6) que incluye al menos dos unidades que están refrigeradas intermedias, y más particularmente en donde el compresor de fases múltiples comprende un segundo compresor (7), y en donde el método comprende, además, la refrigeración intermedia entre el primer compresor y el segundo compresor; con preferencia en donde la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado que sale desde el primer compresor (6) está a una presión de al menos aproximadamente 3 MPa.

3. El método de la reivindicación 1 o la reivindicación 2, que comprende, además, extraer una porción de la corriente de descarga de la última turbina curso arriba del intercambiador de calor de recuperador (14) y pasar la porción extraída de la corriente de descarga de la última turbina a través de uno o más intercambiadores de calor (22) adicionales para proporcionar calor a uno o más corrientes adicionales, que opcionalmente son uno o ambos del hidrocarburo o combustible carbonoso y el oxígeno introducido a la cámara de combustión (2) o a otra cámara de combustión opcional.

4. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en donde el método comprende, además, proporcionar calor adicional desde una fuente diferente a al menos una porción de la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado antes de expandir la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado a través de la serie de turbinas; particularmente en donde el método comprende, además, extraer una corriente lateral desde la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado comprimido y añadir el calor adicional a la corriente lateral extraída de CO<sub>2</sub> reciclado comprimido; con preferencia en donde la combinación de calentamiento en el intercambiador de calor de recuperador contra la corriente de descarga de la última turbina y el calor adicional desde una fuente diferente es suficiente para que la diferencia de la temperatura entre el CO<sub>2</sub> reciclado expandido a través de la serie de turbinas (3, 4) y la temperatura de la corriente de descarga de la última turbina sea inferior a aproximadamente 50 °C.

5. El método de la reivindicación 4, en donde la fuente de calor adicional es una unidad de separación de aire (20).

6. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, que comprende, además, pasar la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado a otra cámara de combustión (1) antes de expandir la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado comprimido a través de una serie de turbinas (3, 4), y en donde una corriente de escape desde la otra cámara de combustión (1) entra en la primera turbina (3) a una presión de aproximadamente 12 MPa a aproximadamente 60 MPa.

7. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, que comprende, además, pasar la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado comprimido a un intercambiador de calor de licuación para licuar la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado comprimido contra una corriente de gas natural líquido (LNG) a alta presión e incrementar la temperatura de la corriente de LNG; particularmente en donde el método comprende una o ambas de las siguientes características:

la corriente de LNG está a una presión de aproximadamente 4 MPa a aproximadamente 7 MPa y a una temperatura de aproximadamente -160 °C a aproximadamente -140 °C;  
 la corriente de LNG que sale del intercambiador de calor de licuación está a una temperatura que está dentro de aproximadamente 10°C a aproximadamente 20°C de la temperatura de entrada de la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado comprimido en el intercambiador de calor de licuación.

8. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en donde una o ambas de la primera y última turbina (3, 4) están en una conexión de trabajo mecánico con uno o más componentes adicionales utilizados en el método, de tal manera que la potencia del estator proporcionada por una o ambas de la primera y última turbinas es transferida mecánicamente a uno o más componentes adicionales; particularmente en donde el método comprende una o ambas de las siguientes características:

uno o más componentes adicionales son un compresor (6), una bomba (11), o una unidad de separación de aire (10); y  
una o ambas de la primera y última turbinas (3, 4) proporcionan también potencia de estator a un generador (5).

9. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en donde una o ambas de la primera y última turbinas (3, 4) comprende una o más turbinas radiales.

10.- Un sistema de generación de energía, que comprende:

una primera turbina (3) y una segunda turbina (4) en serie que están adaptadas para expandir una corriente de CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión entre una alta presión de aproximadamente 10 MPa a aproximadamente 60 MPa sobre una relación de la presión que es mayor que 20;  
una cámara de combustión (2) que tiene una entrada en disposición de trabajo con una salida de la primera turbina (3) y que tiene una salida en disposición de trabajo con una entrada de la segunda turbina (4) y que está adaptada para calentar el vapor de CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión;  
una intercambiador de calor de recuperador (14) que tiene una primera entrada en una disposición de trabajo con una salida de la segunda turbina (4) y adaptada para transferir calor entre una corriente de descarga desde la salida de la segunda turbina y la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado a alta presión; y  
al menos un compresor (6, 7) que tiene una salida en disposición de trabajo con una segunda entrada del intercambiador de calor de recuperador y adaptada para presurizar la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado a una presión de al menos aproximadamente 10 MPa;  
en donde una salida del intercambiador de calor de recuperador (14) está en una disposición de trabajo con una entrada de la primera turbina (3), de tal manera que la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado comprimido caliente pasa desde la salida del al menos un compresor (6, 7) hasta una entrada de la primera turbina a través del intercambiador de calor de recuperador (14).

11. El sistema de generación de energía de la reivindicación 10, en donde la cámara de combustión (2) es una segunda cámara de combustión, y en donde el sistema comprende, además, una primera cámara de combustión (1) que tiene una entrada y una salida y que está adaptada para quemar un combustible en presencia de una corriente de CO<sub>2</sub> reciclado y proporcionar una primera corriente de escape de la cámara de combustión a una presión de aproximadamente 12 MPa a aproximadamente 60 MPa;  
en donde la primera turbina (3) está en disposición de trabajo con la primera cámara de combustión (1) y comprende una entrada adaptada para recibir la primera corriente de escape de la cámara de combustión y una salida adaptada para emitir una corriente de descarga de la primera turbina;  
en donde la segunda cámara de combustión (2) está en disposición de trabajo con una salida de la primera turbina (3) y comprende una entrada para recibirla corriente de descarga de la primera turbina y una salida adaptada para emitir una segunda corriente de escape de la cámara de combustión;  
en donde la segunda turbina (4) está en disposición de trabajo con la segunda cámara de combustión (2) y comprende una entrada adaptada para recibir la segunda corriente de salida de la cámara de combustión y una salida adaptada para emitir una corriente de descarga de la segunda turbina que opcionalmente está a una presión inferior a aproximadamente 0,15 MPa, estando adaptadas la primera y segunda turbinas para expandir sus corrientes respectivas de tal manera que la relación de la presión en la entrada de la primera turbina a la salida de la segunda turbina es al menos aproximadamente 20;  
en donde la primera entrada del intercambiador de calor de recuperador (14) está adaptada para recibir la corriente de descarga de la segunda turbina y transferir calor desde allí hasta la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado; y  
en donde la salida del al menos un compresor (6, 7) está en disposición de trabajo con la segunda entrada del intercambiador de calor de recuperador (14), de tal manera que la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado pasa al intercambiador de calor de recuperador para calentamiento contra la corriente de descarga de la segunda turbina, estando adaptado el al menos un compresor para presurizar la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado a una presión de al menos aproximadamente 12 MPa;  
en el que la salida del intercambiador de calor de recuperador (14) está en una disposición de trabajo con la entrada de la primera cámara de combustión (1), de tal manera que la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado comprimido caliente pasa a la primera cámara de combustión antes de pasar a la entrada de la primera turbina.

12. El sistema de generación de energía de la reivindicación 11, que comprende, además, un divisor posicionado curso arriba del intercambiador de calor de recuperador y adaptado para dividir una porción de la corriente de descarga de la segunda turbina, y que comprende opcionalmente, además, uno o más intercambiadores de calor

(73, 22) adicionales adaptados para recibir la porción dividida de la corriente de descarga de la segunda turbina, y calentar una o más corrientes adicionales.

5 13. El sistema de generación de energía de la reivindicación 11 o la reivindicación 12, en donde el al menos un  
compresor (6, 7) comprende un compresor de fases múltiples adaptado para comprimir la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado  
a una presión de al menos aproximadamente 5,75 MPa y una bomba (11) adaptada para incrementar la presión a al  
menos aproximadamente 12 MPa; particularmente en donde el compresor de fases múltiples (6, 7) comprende un  
primer compresor (6) que incluye al menos dos unidades que están refrigeradas intermedias; y más particularmente  
10 en donde el compresor de fases múltiples comprende un segundo compresor (7), y en donde el sistema comprende,  
además, un refrigerador intermedio (8) entre el primer compresor (6) y el segundo compresor (7).

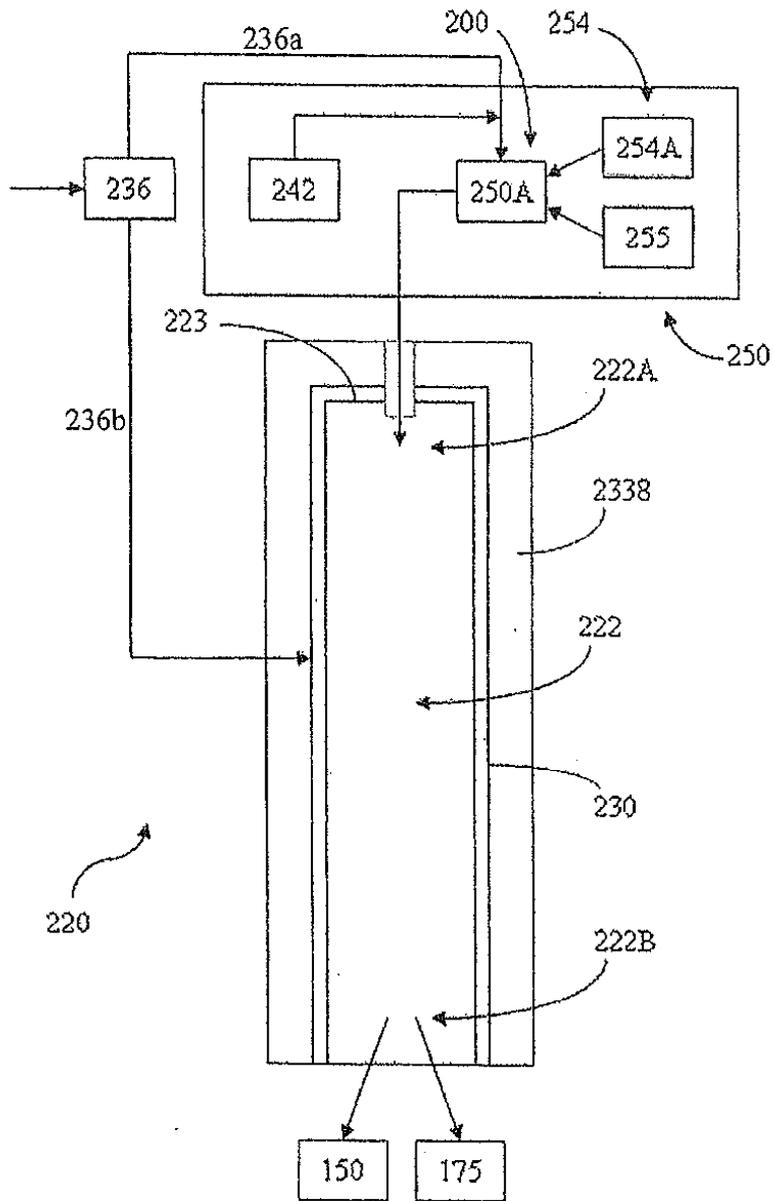
14. El sistema de generación de energía de la reivindicación 11, que comprende, además, un elemento de  
transferencia de calor en una disposición de trabajo con el intercambiador de calor de recuperador y adaptado para  
proporcionar calor desde una fuente diferente a al menos una porción de la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado;  
15 particularmente en donde la fuente de calor adicional es una unidad de separación de aire (20).

15. El sistema de generación de energía de cualquiera de las reivindicaciones 10 a 14, que comprende, además, un  
intercambiador de calor de licuación; particularmente en donde el intercambiador de calor de licuación está adaptado  
para posicionar la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado comprimido y una corriente de gas natural líquido (LNG) a alta presión  
20 en una relación de intercambio de calor para licuar la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado comprimido y para incrementar la  
temperatura de la corriente de LNG.

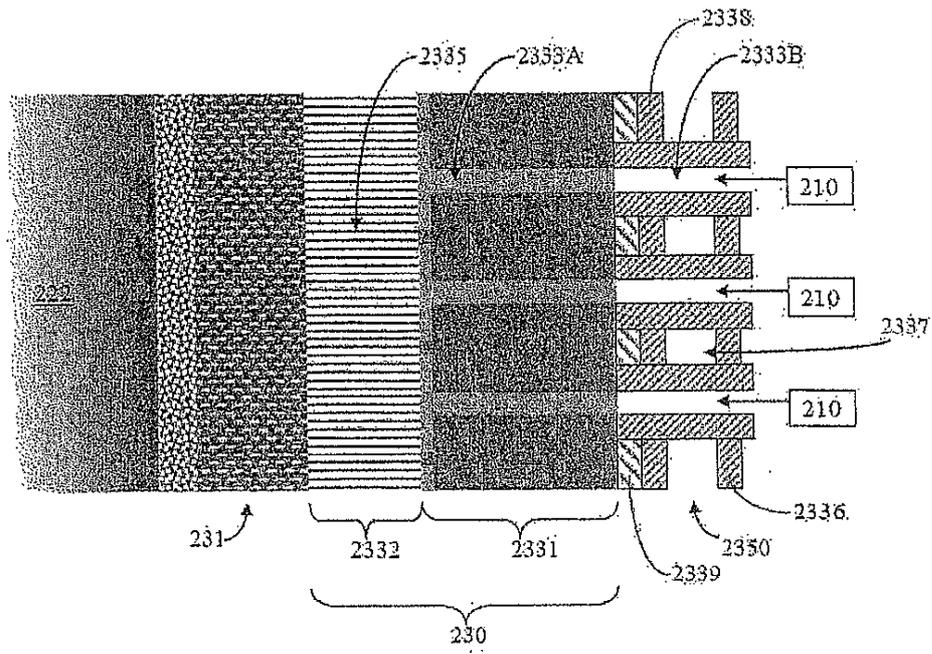
16. El sistema de generación de energía de cualquiera de las reivindicaciones 10 a 15, en donde uno o ambas de la  
primera y segunda turbinas (3, 4) están en una conexión de trabajo mecánico con uno o más componentes  
25 adicionales del sistema, estando adaptada dicha conexión de trabajo mecánica para transferir mecánicamente  
potencia del estator proporcionara por una o ambas de la primera y segunda turbinas (3, 4) a uno o más  
componentes adicionales; particularmente en donde el uno o más componentes adicionales son un compresor (6),  
una bomba (11) o una unidad de separación de aire (20).

30 17. El sistema de generación de energía de cualquiera de las reivindicaciones 10 a 16, en donde una o ambas de la  
primera y segunda turbinas (3, 4) comprende una o más turbinas radiales.

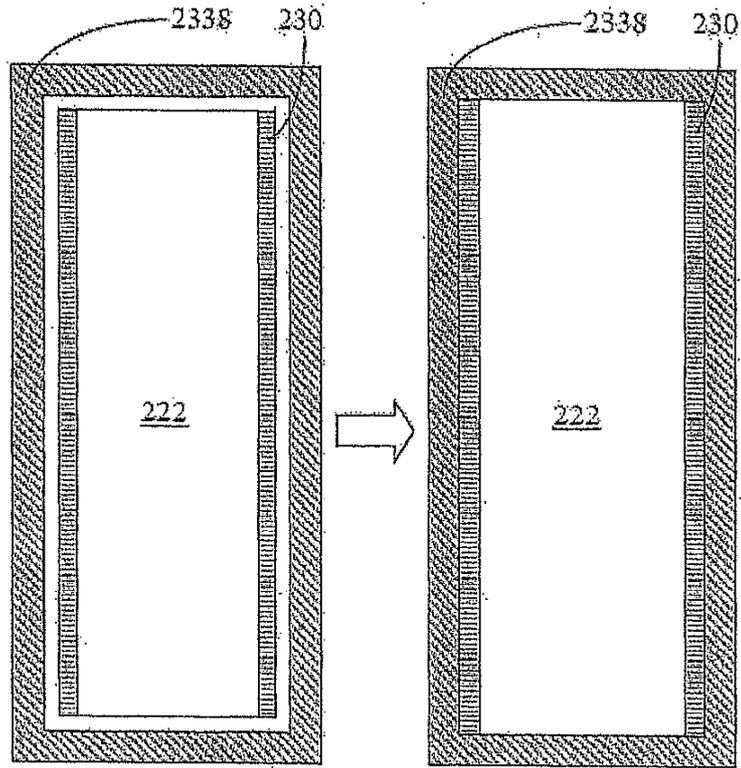
35



**FIG. 1**



**FIG. 2**



*FIG. 3A*

*FIG. 3B*

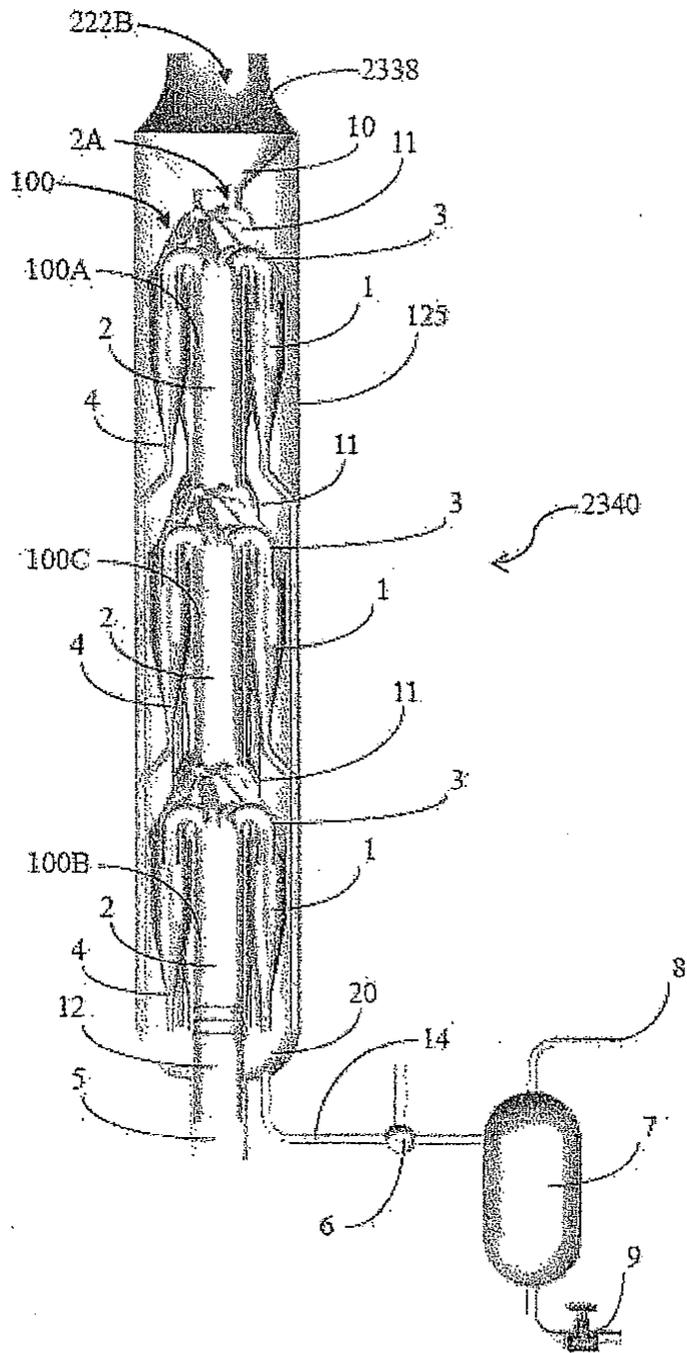
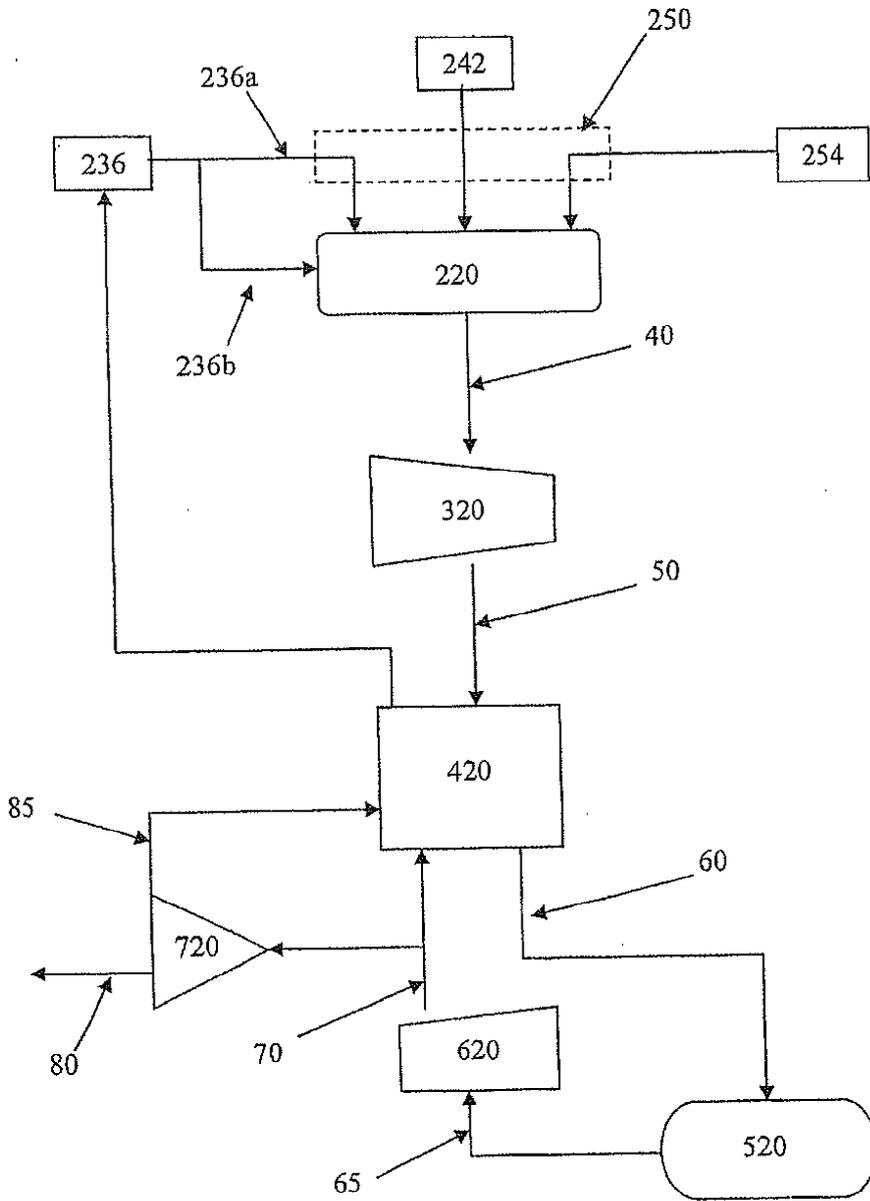
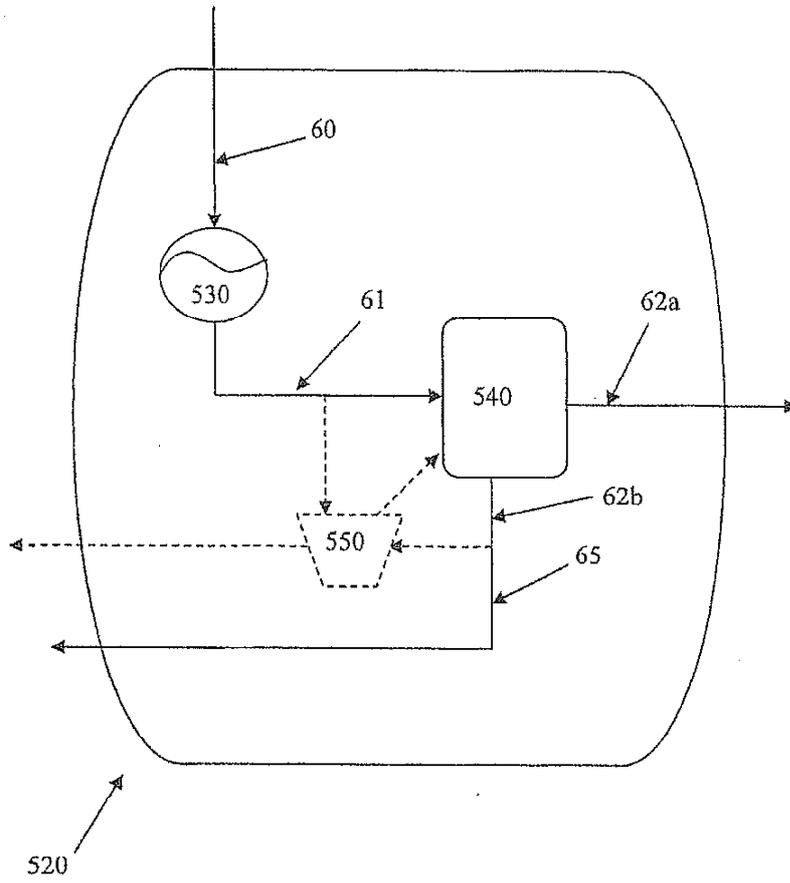


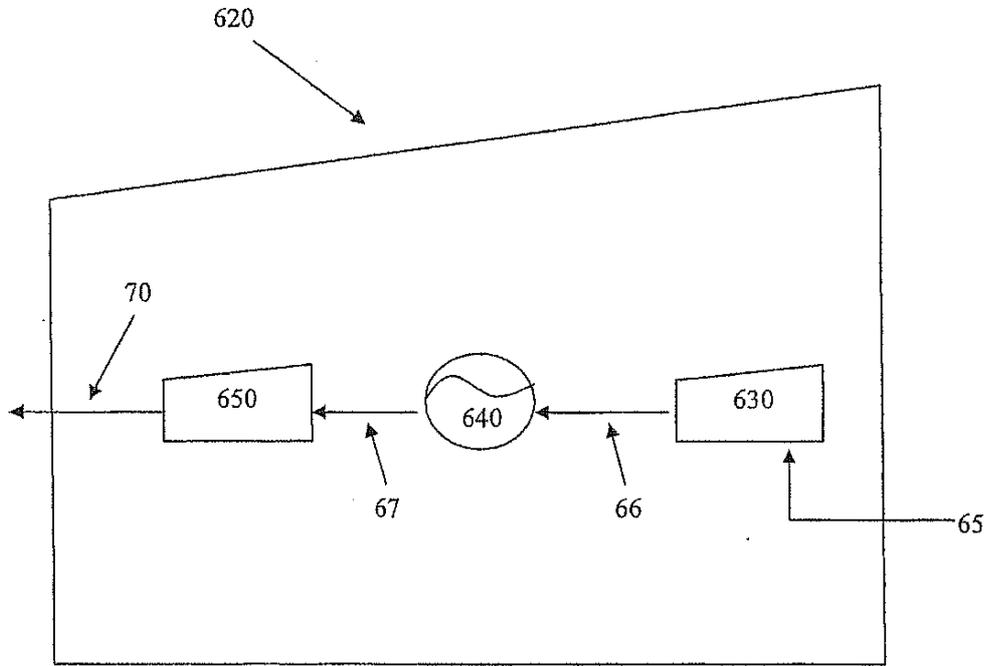
FIG. 4



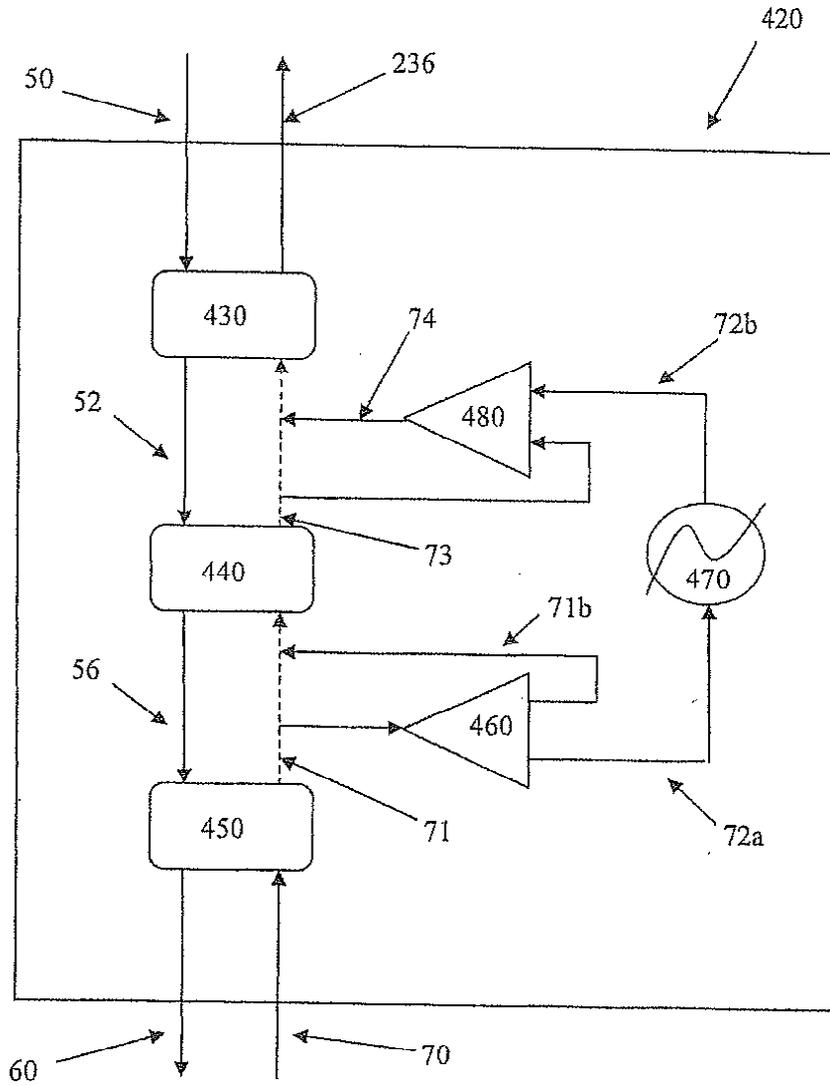
**FIG. 5**



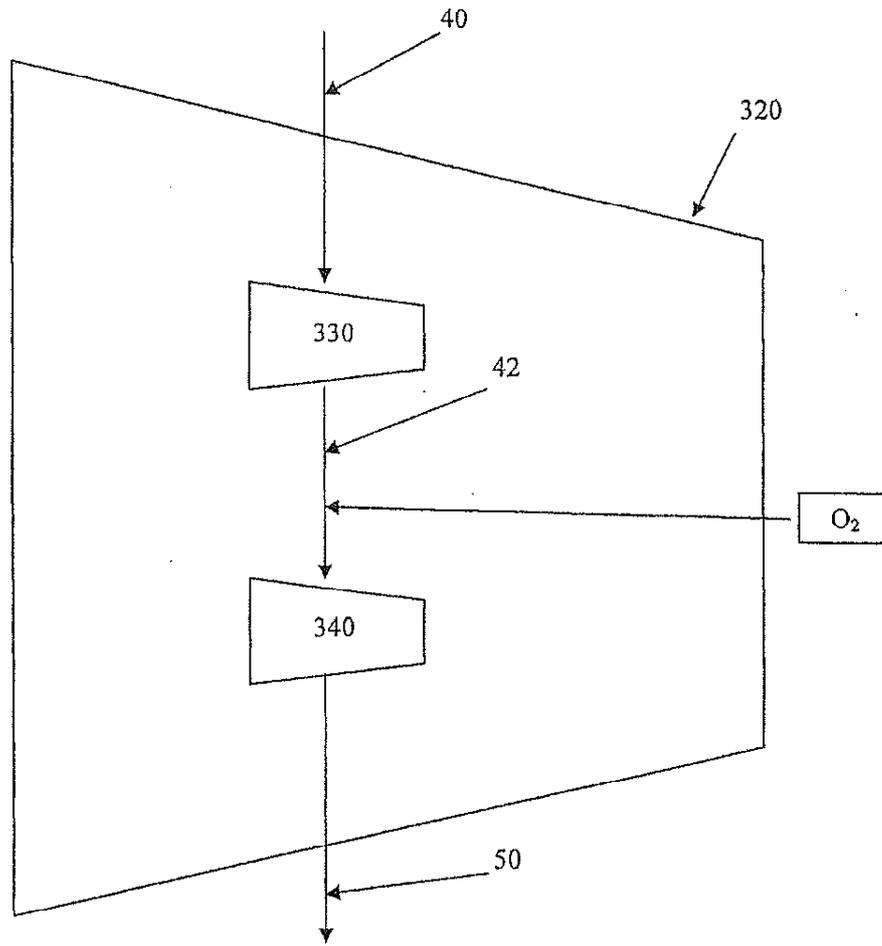
**FIG. 6**



**FIG. 7**



**FIG. 8**



**FIG. 9**

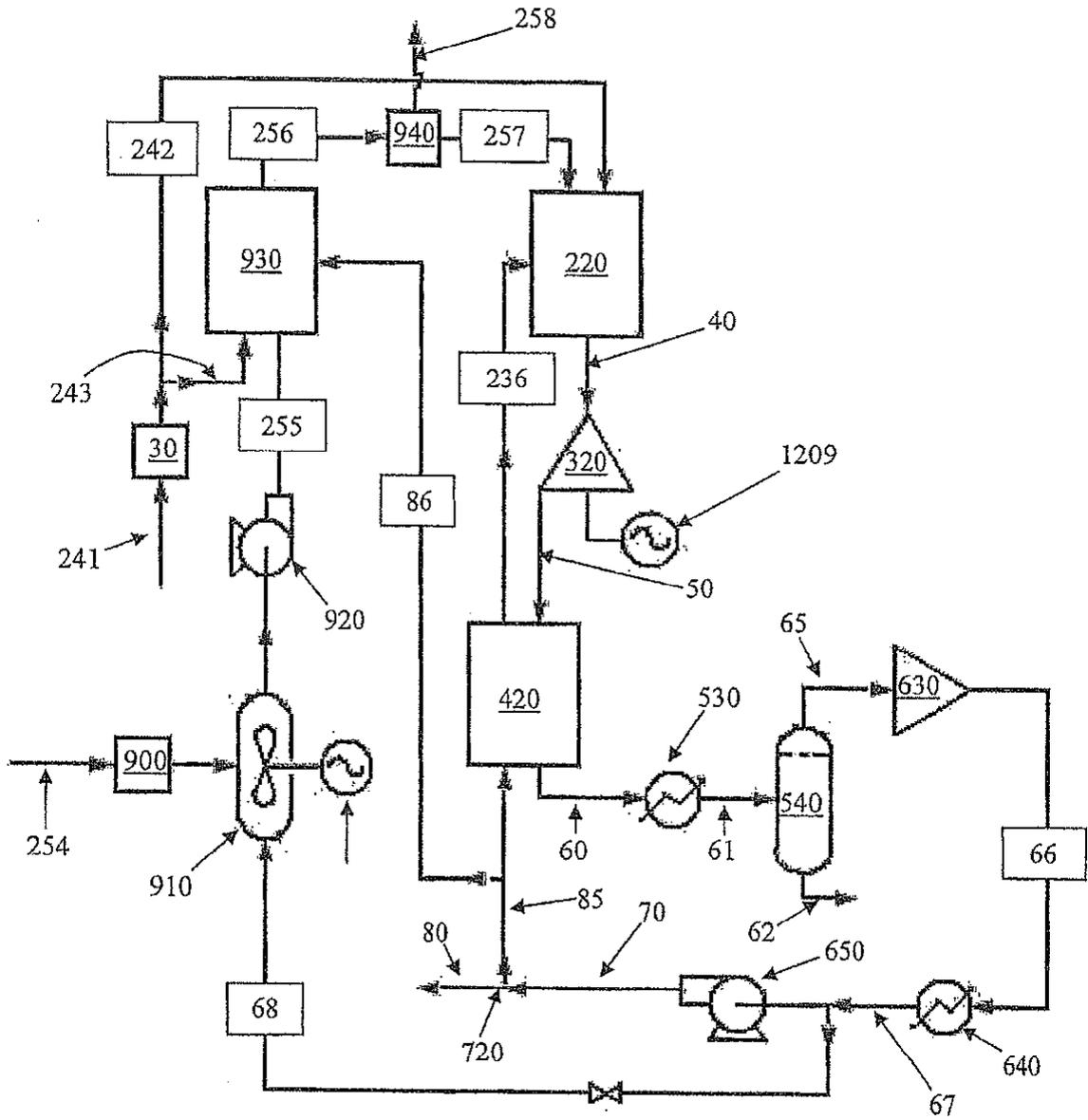


FIG. 10

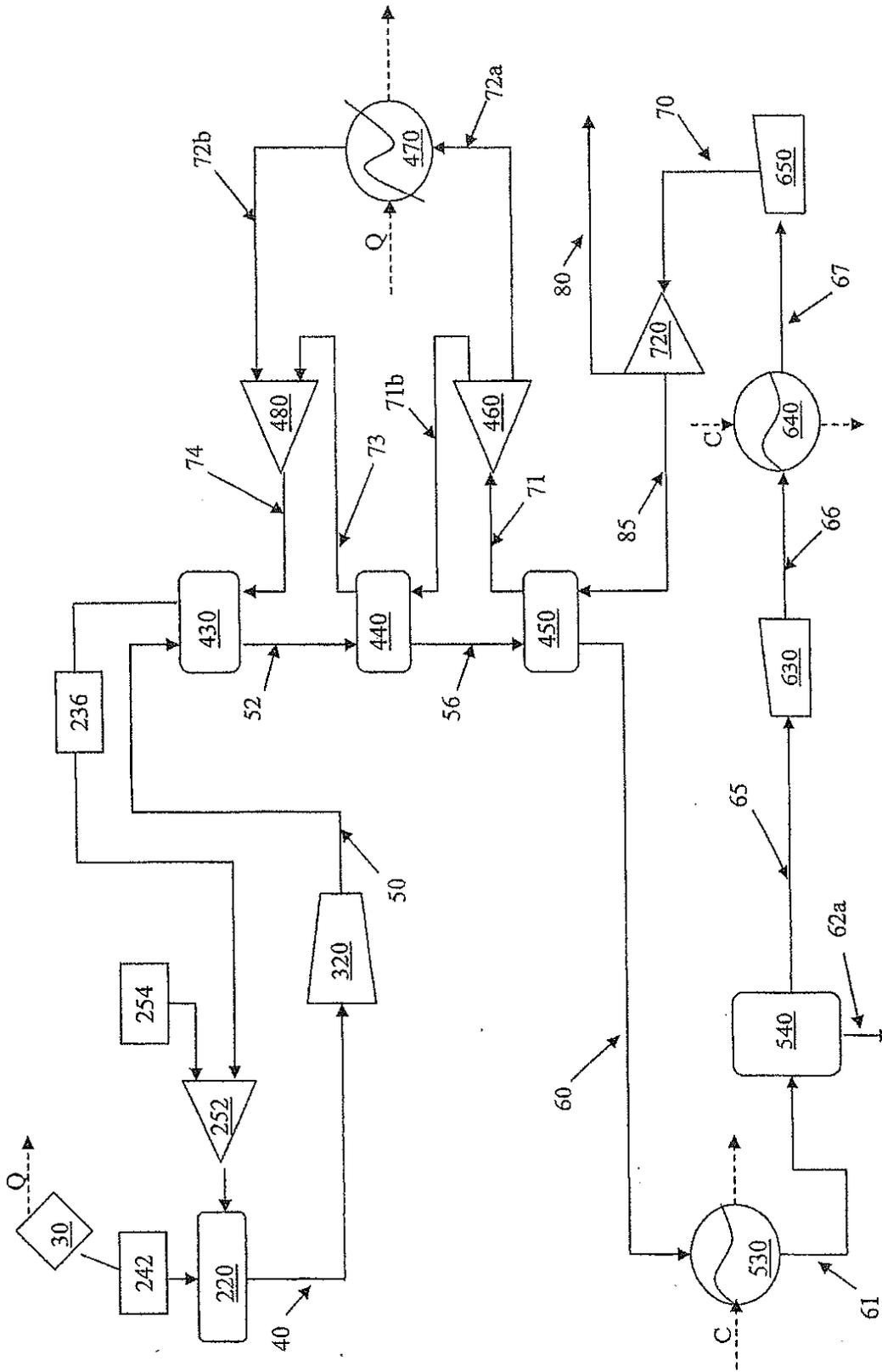


FIG. 11



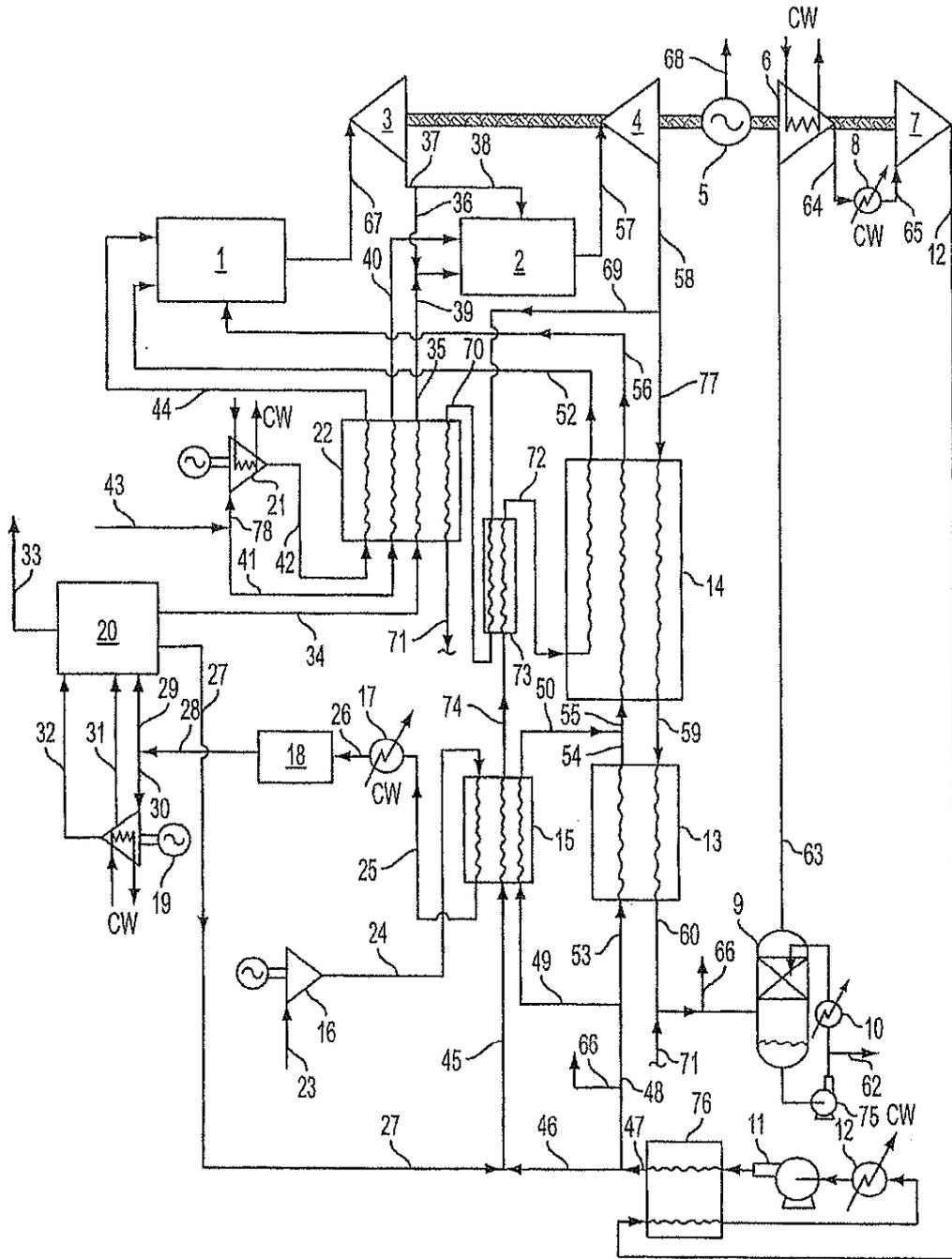


FIG. 13