

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 537 181**

51 Int. Cl.:

**F23L 7/00** (2006.01)

**F23M 5/00** (2006.01)

**F02C 1/00** (2006.01)

**F23M 5/08** (2006.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.01.2011 E 11705069 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.12.2014 EP 2529158**

54 Título: **Método para generación de potencia de alta eficiencia utilizando un fluido de trabajo circulante de dióxido de carbono**

30 Prioridad:

**31.08.2010 US 872777**

**26.02.2010 US 714074**

**28.01.2010 US 299272 P**

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

**03.06.2015**

73 Titular/es:

**PALMER LABS, LLC (50.0%)**

**300 Fuller Street**

**Durham, North Carolina 27701, US y**

**8 RIVERS CAPITAL, LLC (50.0%)**

72 Inventor/es:

**ALLAM, RODNEY JOHN;**

**PALMER, MILES R. y**

**BROWN, GLENN WILLIAM, JR.**

74 Agente/Representante:

**PONS ARIÑO, Ángel**

ES 2 537 181 T3

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

**DESCRIPCIÓN**

Método para generación de potencia de alta eficiencia utilizando un fluido de trabajo circulante de dióxido de carbono.

**CAMPO DE LA INVENCION**

- 5 La presente invención está dirigida a métodos para la generación de potencia, tal como electricidad, a través del uso de un fluido circulante para transferir energía generada a través de combustión de alta eficiencia de un combustible que contiene carbono. Particularmente, el sistema y método puede utilizar dióxido de carbono como fluido circulante.

**ANTECEDENTES DE LA INVENCION**

- 10 Se estima que los combustibles fósiles continuaran proveyendo el mayor volumen de los requerimientos de potencia eléctrica del mundo durante los próximos 100 años mientras que las fuentes no carbonáceas están desarrolladas y en decadencia. Los métodos conocidos para generación de potencia a través de la combustión de combustibles fósiles y/o biomasa adecuada, sin embargo, están plagados por costes de energía elevados y una creciente producción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otras emisiones. El calentamiento global es visto crecientemente como una consecuencia potencialmente catastrófica de las emisiones incrementadas de carbono por las naciones desarrolladas y en desarrollo. La energía solar y eólica no parecen ser capaces de remplazar la combustión de combustibles fósiles a corto plazo, y la energía nuclear tiene peligros asociados con la proliferación y desecho de los residuos nucleares.

- 15 Los medios convencionales de producción de potencia a partir de combustibles sólidos o biomasa adecuada están siendo recargados crecientemente con requerimientos para la captura de CO<sub>2</sub> a alta presión para distribución a sitios de retención. Está probado que este requerimiento es difícil de satisfacer, sin embargo, puesto que la tecnología actual solamente proporciona eficiencias térmicas muy bajas incluso para los mejores diseños para la captura de CO<sub>2</sub>. Además, los costes de capital para lograr la captura de CO<sub>2</sub> son altos, y esto da como resultado costes de electricidad significativamente más altos en comparación con los sistemas que emiten el CO<sub>2</sub> hacia la atmosfera. De acuerdo con lo anterior, hay una necesidad siempre creciente en la técnica por sistemas y métodos para la generación de potencia de alta eficiencia permitiendo una reducción de la emisión CO<sub>2</sub> y/o una facilidad mejorada para la retención del CO<sub>2</sub> producido.

- 20 La US 4,498,289 divulga un sistema de potencia de quema directa mejorada que genera y emplea un gas de combustión el cual incluye dióxido de carbono o un fluido de trabajo que incluye una cámara de combustión para quemar una mezcla que incluye oxígeno, combustible carbonáceo y dióxido de carbono recirculado como fluido de trabajo a una primera presión de por encima de 1100 PSI (aproximadamente 7.6 MPa) proveyendo por tanto un gas de combustión que incluye dióxido de carbono y agua a sustancialmente la primera presión y por encima de 31 °C. Una primera turbina permite que el gas se expanda a través de la misma para generar potencia y reducir la presión del gas de combustión hasta una segunda presión por debajo de 1100 PSI (aproximadamente 7.6 MPa) a la vez que mantiene la temperatura del gas por encima de 31 °C. Un segundo quemador calienta el gas de combustión hasta una temperatura más alta y una segunda turbina permite que el gas se expanda a través de la misma para generar potencia y reducir la presión hasta una tercera presión a la vez que mantiene la temperatura del gas por encima de 31 °C. Un intercambiador de calor incluye ductos, en una relación de intercambio de calor. Los ductos conducen el fluido de dióxido de carbono recirculado a sustancialmente la primera presión a través de los mismos y a la cámara de combustión. El ducto conduce el gas de combustión desde la turbina a través del mismo para transferir calor al fluido de trabajo de dióxido de carbono recirculado para condensar al menos una porción del agua en el gas de combustión pero mantener el dióxido de carbono del mismo en una fase gaseosa. El agua condensada es separada del gas. Un condensador enfría el gas hasta una primera temperatura por encima de 31 °C y un compresor comprime el gas hasta una cuarta presión de al menos 1100 PSI (aproximadamente 7.6 MPa) pero por debajo de la primera presión. Un segundo condensador enfría el gas hasta una segunda temperatura por debajo de la primera temperatura pero por encima de 31 °C y un segundo compresor comprime el gas hasta sustancialmente la primera presión para proporcionar un fluido de trabajo de dióxido de carbono recirculado el cual es suministrado al intercambiador de calor.

**RESUMEN DE LA INVENCION**

- La presente invención proporciona un método para generación de potencia de acuerdo con la reivindicación 1.
- 50 En ciertos aspectos, la invención proporciona sistemas para la producción de potencia que pueden producir potencia a alta eficiencia con bajo coste de capital y también puede producir CO<sub>2</sub> sustancialmente puro a presión de tubería para retención. El CO<sub>2</sub> también puede ser recirculado hacia el sistema de producción de potencia.

- Los sistemas y métodos de la invención están caracterizados 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 hacer uso de combustibles gaseosos (por ejemplo, gas natural o gases derivados del carbón), líquidos (por ejemplo, hidrocarburos, bitumen) y sólidos (por ejemplo carbón, lignito, coque de petróleo). Incluso podrían utilizarse combustibles adicionales, diferentes como se describe aquí de otra manera.

En otros aspectos, los métodos y sistemas de la invención son particularmente útiles en que pueden exceder la mejor eficiencia de las estaciones de potencia de quema de carbón actuales que no proporcionan la captura de CO<sub>2</sub>. Tales estaciones de potencia actuales pueden proporcionar, como máximo, aproximadamente 45% de eficiencia (valor de calentamiento inferior o "LHV") con 1.7 pulgadas de mercurio (aproximadamente 5.8 kPa) de presión de condensador utilizando un carbón bituminoso. El sistema presente puede exceder tal eficiencia a la vez que suministra CO<sub>2</sub> para retención u otros residuos a presiones requeridas.

En todavía otro aspecto, la presente invención proporciona la capacidad de reducir el tamaño físico y el coste de capital de un sistema de generación de potencia en comparación con tecnologías actuales que utilizan un combustible similar. Así, los métodos y sistemas de la presente invención pueden reducir significativamente los costes de construcción asociados con los sistemas de producción de potencia.

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

En un aspecto particular, la presente invención está dirigida a un método para generación de potencia que incorpora el uso de un fluido circulante, tal como CO<sub>2</sub>. En realizaciones específicas, un método de generación de potencia de acuerdo con la invención puede comprender la introducción de un combustible que contiene carbono, O<sub>2</sub> y un fluido circulante de CO<sub>2</sub> en una cámara de combustión enfriada por transpiración. Específicamente, el CO<sub>2</sub> puede ser introducido a una presión de al menos aproximadamente 8 MPa (preferiblemente al menos aproximadamente 12 MPa) y una temperatura de al menos aproximadamente 200 °C (preferiblemente al menos aproximadamente 400 °C). El método puede comprender adicionalmente la combustión del combustible para proporcionar una corriente del producto de combustión que comprende CO<sub>2</sub>. Particularmente, la corriente del producto de combustión puede tener una temperatura de al menos aproximadamente 800 °C. Adicionalmente, el método puede comprender la expansión de la corriente del producto de combustión a través de una turbina para generar potencia, teniendo la turbina una entrada para recibir la corriente del producto de combustión y una salida para liberar la corriente de descarga de la turbina que comprende CO<sub>2</sub>. Preferiblemente, la relación de presión de la corriente del producto de combustión en la entrada en comparación con la corriente de descarga de la turbina a la salida puede ser de menos de aproximadamente 12. En realizaciones específicas, puede ser deseable que el CO<sub>2</sub> sea introducido en la cámara de combustión a una presión de al menos aproximadamente 100 MPa, a una presión de al menos aproximadamente 20 MPa, o una temperatura de al menos aproximadamente 400 °C, o una temperatura de al menos aproximadamente 700 °C. Se describen aquí incluso parámetros de procesamiento posibles adicionales.

En algunas realizaciones, el fluido circulante de CO<sub>2</sub> puede ser introducido a la cámara de combustión enfriada por transpiración como una mezcla con uno o ambos de O<sub>2</sub> y el combustible que contiene carbono. En otras realizaciones, el fluido circulante de CO<sub>2</sub> puede ser introducido en la cámara de combustión enfriada por transpiración como todo o parte de un fluido de enfriamiento por transpiración dirigido a través de uno o más pasos de suministro de fluido de transpiración formado en la cámara de combustión enfriada por transpiración. En realizaciones específicas, el fluido circulante de CO<sub>2</sub> puede ser dirigido hacia la cámara de combustión solamente como el fluido de transpiración.

La combustión puede ser caracterizada específicamente por la temperatura de combustión real. Por ejemplo, la combustión puede ser llevada a cabo a una temperatura de al menos aproximadamente 1500 °C. En otras realizaciones, la combustión puede ser llevada a cabo a una temperatura de aproximadamente 1600 °C hasta aproximadamente 3300 °C.

La invención también puede ser caracterizada por la pureza del O<sub>2</sub> en la corriente de O<sub>2</sub>. Por ejemplo, en algunas realizaciones, puede ser útil el aire ambiente. En realizaciones específicas, sin embargo, puede ser beneficioso purificar el contenido de oxígeno. Por ejemplo, el O<sub>2</sub> puede ser provisto como una corriente en donde la concentración molar del O<sub>2</sub> es al menos 85%. Se describen aquí concentraciones específicas e incluso adicionales.

Las realizaciones específicas, la corriente del producto de combustión puede tener una temperatura de al menos aproximadamente 1000 °C. Además, la corriente del producto de combustión puede tener una presión que es al menos aproximadamente 90% de la presión del CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión o es al menos aproximadamente el 95% de la presión del CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión.

En algunas realizaciones, la relación de presión de la corriente del producto de combustión en la entrada de la turbina en comparación con la corriente de descarga de la turbina a la salida de la turbina puede ser de aproximadamente 1.5 a aproximadamente 10 o puede ser aproximadamente 2 hasta aproximadamente 8. Se proporcionan aquí relaciones adicionales incluso posibles.

La invención puede ser caracterizada 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 circulante de CO<sub>2</sub> a carbono en el combustible introducido a la cámara de combustión, sobre una base molar, puede ser aproximadamente 10 hasta aproximadamente 50 o puede ser aproximadamente 10 hasta aproximadamente 30. Se proporcionan aquí incluso relaciones posibles adicionales.

La invención puede ser caracterizada adicionalmente en que al menos una porción del CO<sub>2</sub> en la corriente de descarga de la turbina puede ser recirculada y reintroducida en la cámara de combustión. Al menos una porción del CO<sub>2</sub> puede ser descargada del sistema (tal como para retención u otro desecho), por ejemplo a través de una tubería.

5 En realizaciones 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 de menos de o igual a 7 MPa.

En otras realizaciones, los métodos de la invención pueden comprender adicionalmente el paso de la corriente de descarga de la turbina a través de al menos un intercambiador de calor que enfría la corriente de descarga de la turbina y proporciona una corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> que tiene una temperatura de al menos de  
10 aproximadamente 200 °C. Esto puede ser útil para proporcionar la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> bajo condiciones que puedan facilitar la eliminación de uno o más componentes secundarios (esto es, componentes diferentes a CO<sub>2</sub>). En realizaciones específicas, esto puede comprender el paso de 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 la temperatura de la  
15 misma, estando formado el primer intercambiador de calor de una aleación para alta temperatura que soporta una temperatura de al menos aproximadamente 900 °C.

Los métodos de la invención también pueden comprender llevar a cabo una o más etapas de separación en la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> para eliminar uno o más componentes secundarios que están presentes en la corriente de fluido circulante además de CO<sub>2</sub>, como se anotó anteriormente. Específicamente, el uno o más  
20 componentes secundarios pueden comprender agua.

Los métodos de la invención también pueden comprender la presurización de una corriente de CO<sub>2</sub>. Por ejemplo, después de expandir la corriente del producto de combustión y de enfriar la corriente de descarga de la turbina, puede ser beneficioso presurizar la corriente para recircularla de vuelta a la cámara de combustión. Específicamente, los métodos pueden comprender pasar la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> a través de uno o  
25 más compresores (por ejemplo, bombas) para presurizar la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> hasta una presión de al menos aproximadamente 8 MPa. Esto puede comprender adicionalmente pasar la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> a través de una serie de al menos dos compresores para presurizar la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub>. En ciertas realizaciones, la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> puede ser presurizada a una presión de al menos aproximadamente 15 MPa. Pueden ser deseables rangos de presión incluso adicionales, tal como se describe de otra forma aquí. En otras realizaciones, la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada puede ser provista  
30 específicamente en un estado de fluido supercrítico. En algunas realizaciones, al menos una porción del CO<sub>2</sub> en la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada puede ser introducida en una tubería presurizada para retención (u otro desecho, como ya se anotó aquí).

Además de presurizar, los métodos de la invención, también pueden comprender calentar la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> previamente enfriada para la introducción de regreso a la cámara de combustión (esto es, recircular la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub>). En algunas realizaciones, esto puede comprender calentar la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada hasta una temperatura de al menos aproximadamente 200 °C, al menos aproximadamente 400 °C, o al menos aproximadamente 700 °C. En ciertas realizaciones, la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada puede ser calentada hasta una temperatura que es menor que la temperatura de la corriente de descarga de la turbina en no más de aproximadamente 50 °C. Se proporcionan aquí rangos de temperatura posibles incluso adicionales. Específicamente, tal calentamiento puede comprender el paso de la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada a través de los mismos intercambiadores de calor utilizados para enfriar la corriente de descarga de la turbina. Tal calentamiento también puede comprender la entrada de calor desde una fuente externa (esto es, diferente al calor recapturado de los intercambiadores de calor). En realizaciones  
45 específicas, el calentamiento puede comprender el uso de calor extraído de una unidad de separación de O<sub>2</sub>. Preferiblemente, este calor adicional es introducido en el extremo frío de la unidad intercambiadora de calor (o, cuando se usa una serie de intercambiadores de calor, antes del intercambiador de calor en la serie que trabaja sobre el rango de temperatura más alto).

En ciertas realizaciones, la invención puede ser caracterizada por la naturaleza de la corriente del producto de combustión, la cual puede permitir la implementación opcional de turbinas múltiples. Por ejemplo, en algunas realizaciones, la corriente del producto de combustión puede ser un fluido reductor que comprende uno o más componentes de combustible (por ejemplo, componentes seleccionados del grupo consistente de H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, y combinaciones de los mismos). Esto puede ser controlado por la relación de O<sub>2</sub> al combustible usada. En algunas realizaciones, el vapor de la corriente del producto de combustión puede contener componentes completamente oxidados, tales como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y SO<sub>2</sub>, así como los componentes reducidos listados más arriba. La composición real alcanzada puede depender de la relación de O<sub>2</sub> a combustible utilizada en la alimentación a la cámara de combustión de transpiración. Más específicamente, la turbina usada en tales realizaciones puede comprender dos o más unidades teniendo, cada una, una entrada y una salida. En realizaciones específicas, las unidades de turbina pueden ser operadas de tal manera que la temperatura de operación en la entrada de cada unidad es sustancialmente la misma. Esto puede comprender la adición de una cantidad de O<sub>2</sub> a la corriente de fluido en la salida de la primera unidad de turbina (o la unidad de turbina precedente en donde se utilizan tres o más unidades). La provisión del O<sub>2</sub> puede permitir la combustión del uno o más componentes del combustible descritos  
60

anteriormente, lo cual eleva la temperatura de la corriente antes de la entrada a la siguiente turbina en la serie. Esto da como resultado la capacidad de maximizar la potencia producida a partir de los gases de combustión en la presencia del fluido circulante.

5 En otras realizaciones, la corriente de descarga de la turbina puede ser un fluido oxidante. Por ejemplo, la corriente de descarga de la turbina puede contener una cantidad en exceso de O<sub>2</sub>.

10 En algunas realizaciones, la invención puede ser caracterizada por el estado de las diversas corrientes. Por ejemplo, después de la etapa de expansión de la corriente del producto de combustión a través de la turbina, la corriente de descarga de la turbina puede estar en un estado gaseoso. Este gas puede ser pasado a través de al menos un intercambiador de calor para enfriar la corriente gaseosa de descarga de la turbina para separación del CO<sub>2</sub> de cualquier componente secundario. Después de esto, al menos una porción del CO<sub>2</sub> separado puede ser presurizada y transformada en un estado de fluido supercrítico y de nuevo ser pasada a través de los mismos intercambiadores de calor para calentar el CO<sub>2</sub> para reciclaje hacia la cámara de combustión. En realizaciones específicas, la diferencia de 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) a partir de la etapa de expansión de la temperatura del CO<sub>2</sub> fluido supercrítico calentado, presurizado que sale del mismo intercambiador de calor para recircular en la cámara de combustión puede ser menor de aproximadamente 50 °C.

20 Como se anotó anteriormente, la corriente de fluido que sale de la cámara de combustión de combustible puede comprender el fluido circulante de CO<sub>2</sub> así como uno o más componentes adicionales, tales como productos de combustión. En algunas realizaciones, puede ser útil recircular al menos una porción del CO<sub>2</sub> y reintroducirla en la cámara de combustión de combustible. Así, el fluido circulante puede ser un fluido recirculado. Desde luego, puede utilizarse CO<sub>2</sub> desde cualquier fuente externa como fluido circulante. El desfogue de la turbina puede ser enfriado en un intercambiador de calor economizador, y el calor extraído puede ser utilizado para calentar el CO<sub>2</sub> recirculado a alta presión. El desfogue de turbina enfriado que sale del extremo a baja temperatura del intercambiador de calor puede contener componentes derivados de combustible o del proceso de 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 realizaciones adicionales, 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 oxidantes tales como N<sub>2</sub>, Argón (Ar) y O<sub>2</sub> en exceso. Estos pueden ser removidos por procesos separados adecuados. En realizaciones adicionales, el desfogue de la turbina puede estar a una presión que es menor que la presión de condensación de CO<sub>2</sub> en el desfogue de la turbina a la temperatura de los medios de enfriamiento disponibles de tal manera que no pueda formarse fase líquida de CO<sub>2</sub> cuando el desfogue de la turbina es enfriado y esto permite una separación eficiente de agua como líquido a partir del CO<sub>2</sub> gaseoso del cual contendrá la cantidad mínima de vapor de agua para permitir que el agua sea condensada. En realizaciones adicionales, el CO<sub>2</sub> purificado puede ser comprimido ahora para producir la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculada a alta presión con al menos una porción del CO<sub>2</sub> en el fluido que representa el carbono oxidado derivado del carbono en el combustible alimentado a la cámara de combustión, el cual puede ser introducido en una tubería presurizada para retención. La capacidad de transferir CO<sub>2</sub> directamente desde el proceso de combustión hacia una tubería presurizada con un tratamiento o compresión adicional es mínimo debido a la alta presión de la corriente de desfogue de la turbina es una ventaja distintiva sobre los métodos convencionales donde el CO<sub>2</sub> es recuperado a casi la presión atmosférica (esto es, alrededor de 0.1MPa) o es emitido a la atmosfera. Además, el CO<sub>2</sub> para retención de acuerdo con la presente invención puede ser transferido de una manera que es más eficiente y económica que las conocidas hasta el momento.

45 El calor específico del fluido de CO<sub>2</sub> recirculado que entra al intercambiador de calor, idealmente por encima de la presión crítica, es alto y reduce a medida que se eleva la temperatura. Esto es particularmente beneficioso para que al menos una porción del calor en los niveles de temperatura más bajos sea derivada de una fuente externa. Esta podría ser por ejemplo un suministro de vapor a baja presión el cual proporcionaría calor por condensación. En realizaciones adicionales esta fuente de calor podría ser derivada de la operación de los compresores de aire usados en la planta de separación de aire criogénica que suministra oxidante a la cámara de combustión en el modo adiabático sin interenfriamiento y extracción del calor de compresión con una corriente de ciclo cerrado del fluido de transferencia de calor utilizado para proporcionar calor a la corriente de CO<sub>2</sub> recirculada.

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

Introducir un combustible, O<sub>2</sub> y un fluido circulante 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;

55 hacer combustión del combustible para proporcionar una corriente producto de combustión que comprende CO<sub>2</sub>, teniendo la corriente de producto de combustión una temperatura del al menos aproximadamente 800 °C;

expandir otra corriente del producto de combustión a través de una turbina para generar potencia, teniendo la turbina una entrada para recibir la corriente del producto de combustión y una salida para liberar una corriente de descarga de la turbina que comprende CO<sub>2</sub>, en donde la relación de presión de la corriente del producto de combustión en la entrada en comparación con la corriente de descarga de la turbina en la salida es menor de aproximadamente 12;

- retirar calor de la corriente de descarga de turbina haciendo pasar la corriente de descarga de turbina a través de una unidad de intercambio de calor para proporcionar una corriente de descarga de turbina enfriada;
- eliminar de la corriente de descarga de turbina enfriada uno o más componentes secundarios que están presentes en la corriente de descarga de turbina enfriada además del CO<sub>2</sub> para proporcionar una corriente de descarga de turbina enfriada, purificada;
- 5 comprimir la corriente de descarga de turbina enfriada, purificada, con un primer compresor hasta una presión por encima de la presión crítica del CO<sub>2</sub> para proporcionar una corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> supercrítica;
- enfriar la corriente del fluido circulante de CO<sub>2</sub> supercrítica hasta una temperatura en donde su densidad es al menos aproximadamente 200kg/m<sup>3</sup>;
- 10 hacer pasar el fluido circulante de CO<sub>2</sub> de alta densidad, supercrítico, a través de un segundo compresor para presurizar el fluido circulante de CO<sub>2</sub> hasta la presión requerida para la entrada a la cámara de combustión;
- hacer pasar el fluido circulante de CO<sub>2</sub> a alta presión, de alta densidad, supercrítico a través de la misma unidad intercambiadora de calor de tal manera que el calor extraído se utiliza para incrementar la temperatura del fluido circulante de CO<sub>2</sub>;
- 15 suministrar una cantidad adicional de calor al fluido circulante de CO<sub>2</sub> a alta presión, de alta densidad, supercrítico, de tal manera que la diferencia entre la temperatura del fluido circulante de CO<sub>2</sub> que sale de la unidad intercambiadora de calor para recircular a la cámara de combustión y la temperatura de la corriente de descarga de la turbina es menor de aproximadamente 50 °C; y
- recircular el líquido circulante de CO<sub>2</sub> de alta densidad, supercrítico, calentado hacia la cámara de combustión.
- 20 En realizaciones particulares, los métodos pueden ser particularmente útiles para combinación con métodos de generación de potencia existentes (por ejemplo, utilizando estaciones de potencia de quema de carbón convencionales, reactores nucleares y otros sistemas y métodos que pueden hacer uso de los sistemas de calderas provisionales). Así, en algunas realizaciones, entre la etapa de expansión y la etapa de extracción descritas anteriormente, los métodos de la invención pueden comprender el paso de la corriente de descarga de la turbina a través de una segunda unidad de intercambio de calor.
- 25 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 potencia por vapor (por ejemplo, un sistema de caldera convencional, incluyendo estaciones de potencia de quema de carbón y reactores nucleares). Las corrientes de vapor así calentadas pueden ser pasadas a través de una o más turbinas para generar potencia. Las corrientes que salen de las turbinas pueden ser procesadas en ciclo de retroceso a través de los componentes del sistema de potencia convencional (por ejemplo, la caldera).
- 30 En realizaciones adicionales, el método de la invención puede ser caracterizado por uno o más de los siguientes:
- enfriar la corriente de descarga de la turbina hasta una temperatura por debajo de su punto de rocío;
- enfriar adicionalmente la corriente de descarga de la turbina contra un medio de enfriamiento a temperatura ambiente;
- 35 condensar el 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;
- presurizar la corriente de descarga de la turbina enfriada hasta una presión de menos de aproximadamente 15 MPa;
- 40 un producto de la corriente de CO<sub>2</sub> de la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> a alta presión, de alta densidad, supercrítica antes de pasar a través de la unidad de intercambio de calor;
- utilizar como combustible una corriente de los productos de combustión parcial;
- someter a combustión combustible un combustible que contiene carbono con O<sub>2</sub> en la presencia de un fluido circulante de CO<sub>2</sub>, el combustible que contiene carbono, O<sub>2</sub> y fluido circulante de CO<sub>2</sub> provistos en proporciones tales que el combustible que contiene carbono es oxidado solo parcialmente para producir la corriente de producto de conducción parcialmente oxidada 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>;
- 45 proporcionar el combustible que contiene carbono, O<sub>2</sub> y el fluido circulante de CO<sub>2</sub> en proporciones tales que la temperatura de la corriente del producto de combustión parcialmente oxidada es suficientemente baja de forma que todo el componente incombustible en la corriente está en la forma de partículas sólidas;
- 50 hacer pasar la corriente del producto de combustión parcialmente oxidado por uno o más filtros;
- usar el filtro para reducir la cantidad residual de componentes incombustibles a menos de aproximadamente 2 mg/m<sup>3</sup> del producto de combustión parcialmente oxidado;
- utilizar carbón, lignito o coque de petróleo como combustible;

proporcionar un combustible en partículas como suspensión con CO<sub>2</sub>;

en realizaciones adicionales, la invención puede ser descrita como relacionada con un método para la generación de potencia que comprende las siguientes etapas:

- 5 introducir un combustible que contiene carbono, O<sub>2</sub> y un fluido circulante de CO<sub>2</sub> en una cámara de combustión enfriada 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;
- someter a combustión 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;
- 10 expandir la corriente de producto de combustión a través de una turbina para generar potencia, teniendo la turbina una entrada para recibir la corriente de producto de combustión y una salida de liberación de una corriente de descarga de turbina que comprende CO<sub>2</sub>, en donde la relación de presión de la corriente de producto de combustión en la entrada en comparación con la corriente de descarga de la turbina en la salida es menor de aproximadamente 12;
- 15 hacer pasar la corriente de descarga de la turbina a través de una serie de al menos dos intercambiadores de calor que retiran calor de la corriente de descarga de la turbina y proporcionan la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub>;
- eliminar de la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> uno o más componentes secundarios que están presentes en la corriente de fluido circulante además del CO<sub>2</sub>;
- hacer pasar la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> a través de una serie de al menos dos compresores que incrementan la presión del fluido circulante de CO<sub>2</sub> al menos a aproximadamente 8 MPa y transforma el CO<sub>2</sub> en el
- 20 fluido circulante de un estado gaseoso a un estado fluido supercrítico; y
- hacer pasar el fluido circulante de CO<sub>2</sub> supercrítico a través de la misma serie de al menos dos intercambiadores de calor que usan el calor de extracción para incrementar la temperatura del fluido circulante de CO<sub>2</sub> a al menos aproximadamente 200 °C (o, opcionalmente, hasta una temperatura que es menor que la temperatura de la corriente de descarga de la turbina en no más de aproximadamente 50 °C). Esto específicamente puede comprender la
- 25 introducción de calor adicional a partir de una fuente de calor externa (por ejemplo, una fuente de calor no derivada directamente del paso de la corriente de descarga de la turbina a través de los intercambiadores de calor).
- En realizaciones adicionales, la invención puede ser caracterizada por proporcionar un método de alta eficiencia de generación de potencia a partir de la combustión de un combustible que contiene carbono sin liberación atmosférica de CO<sub>2</sub>. Específicamente, el método puede comprender las siguientes etapas:
- 30 introducir el combustible que contiene carbono, O<sub>2</sub>, y el fluido de circulante de CO<sub>2</sub> recirculado en una cámara de combustión enfriada por transpiración en una relación estequiométrica definida, 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;
- producir combustión de combustible para proporcionar una corriente de producto de combustión que comprende CO<sub>2</sub>, teniendo la corriente del producto de combustión una temperatura de al menos 800 °C.
- 35 Expandir la corriente del producto de combustión a través de una turbina para generar potencia, teniendo la turbina una entrada para recibir la corriente del producto de combustión y una salida para la liberación de una corriente de descarga de la turbina que comprende CO<sub>2</sub>, en donde la relación de presión de la corriente del producto de combustión en la entrada en comparación con la corriente de descarga de la turbina la salida es menor de aproximadamente 12;
- 40 hacer pasar la corriente de descarga de la turbina a través de una serie de al menos dos intercambiadores de calor que retiran calor de la corriente de descarga de la turbina y proporcionan la corriente del fluido circulante de CO<sub>2</sub>;
- hacer pasar la corriente de fluidos circulantes de CO<sub>2</sub> a través de una serie de al menos dos compresores que incrementan la presión del fluido circulante de CO<sub>2</sub> a al menos aproximadamente 8 MPa y transforma el CO<sub>2</sub> en el fluido circulante de un estado gaseoso a un estado de fluido supercrítico;
- 45 hacer pasar la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> a través de una unidad de separación en donde la cantidad estequiométricamente requerida de CO<sub>2</sub> es recirculada y dirigida a la cámara de combustión y cualquier exceso de CO<sub>2</sub> es extraído sin liberación atmosférica; y
- hacer pasar el fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculado a través de la misma serie de al menos dos intercambiadores de calor que usan el calor extraído para incrementar la temperatura del fluido circulante de CO<sub>2</sub> a al menos
- 50 aproximadamente 200 °C antes de la introducción en la cámara de combustión (o, opcionalmente, hasta una temperatura que es menor que la temperatura de la corriente de descarga de turbina en no más de aproximadamente 50 °C);
- en donde la eficiencia de la combustión es mayor que 50%, siendo calculada dicha eficiencia como la relación de la potencia neta generada en relación con la energía térmica con valor de calentamiento más bajo inferior para el
- 55 combustible que contiene carbono sometido a combustión para generar la potencia.

El método de la invención es utilizando un sistema de generación de potencia. Específicamente, un sistema de generación de potencia de acuerdo con el método de la invención puede comprender una cámara de combustión enfriada por transpiración, una turbina para producción de potencia y al menos un intercambiador de calor, y al menos un compresor.

5 En realizaciones específicas, la cámara de combustión enfriada por transpiración puede tener al menos una entrada para recibir un combustible que contiene carbono,  $O_2$  y una corriente de fluido circulante de  $CO_2$ . La cámara de combustión puede tener adicionalmente al menos una etapa de combustión que somete a combustión el combustible en la presencia del fluido circulante de  $CO_2$  y proporciona una corriente de producto de combustión que comprende  $CO_2$  a una presión (por ejemplo, al menos aproximadamente 8 MPa) y temperatura (por ejemplo, al menos aproximadamente 800 °C) definidas.

10 La turbina de producción de potencia puede estar en comunicación fluida con la cámara de combustión y puede tener una entrada para recibir la corriente del producto de combustión y una salida para liberar una corriente de descarga de la turbina que comprende  $CO_2$ . La turbina puede estar adaptada para controlar las caídas de presión de tal manera que la relación de la presión de la corriente del producto de combustión en la entrada en comparación con la corriente de descarga de la turbina en la salida es menos de aproximadamente 12.

15 El al menos un intercambiador de calor puede estar en comunicación fluida con la turbina para recibir la corriente de descarga de la turbina. Los intercambiadores de calor pueden transferir calor desde la corriente de descarga de la turbina a la corriente de fluido circulante de  $CO_2$ .

20 El al menos un compresor puede estar en comunicación fluida con el al menos un intercambiador de calor. Los compresores pueden estar adaptados para presurizar la corriente de fluido circulante de  $CO_2$  hasta una presión deseada.

25 Además de lo anterior, un sistema de generación de potencia utilizado de acuerdo con el método de la invención puede comprender adicionalmente uno o más dispositivos de separación posicionados entre el al menos un intercambiador de calor y el al menos un compresor. Tales dispositivos de separación pueden ser útiles para la eliminación de uno o más componentes secundarios presentes en el fluido circulante de  $CO_2$  además del  $CO_2$ .

30 Todavía adicionalmente, el sistema de generación de potencia puede comprender una unidad de separación de  $O_2$  que incluye uno o más componentes que generan calor. Así, el sistema de generación de potencia también puede comprender uno o más componentes de transferencia de calor que transfieren calor desde la unidad de separación de  $O_2$  al fluido circulante de  $O_2$  corriente arriba de la cámara de combustión. Opcionalmente, el sistema de generación de potencia puede comprender una fuente de calor externa. Esta podría ser por ejemplo un suministro de vapor a baja presión el cual proporcionaría calor por condensación. El sistema de generación de potencia podría incluir así uno o más componentes de transferencia de calor que transfieren calor desde la corriente de fluido circulante de  $CO_2$  corriente arriba de la cámara de combustión.

35 En realizaciones adicionales, un sistema de generación de potencia utilizado en el método de la invención puede incluir uno o más de los siguientes:

un primer compresor adaptado para comprimir la corriente de fluido circulante de  $CO_2$  a una presión que está por encima de la presión crítica del  $CO_2$ ;

un segundo compresor adaptado para comprimir la corriente de fluido circulante de  $CO_2$  hasta una presión requerida para la entrada a la cámara de combustión;

40 un dispositivo de enfriamiento adaptado para enfriar la corriente de fluido circulante de  $CO_2$  a una temperatura en donde su densidad es mayor de aproximadamente 200 kg/m<sup>3</sup>;

uno o más componentes de transferencia que transfieren calor desde una fuente externa al fluido circulante de  $CO_2$  corriente arriba de la cámara de combustión y corriente abajo del segundo compresor;

45 una segunda cámara de combustión localizada corriente arriba desde y en comunicación fluida con la cámara de combustión enfriada por transpiración;

uno o más filtros o dispositivos de separación localizados entre la segunda cámara de combustión y la cámara de combustión enfriada por transpiración;

un dispositivo de mezcla para formar un lodo de un material combustible en partículas con un medio fluidizante;

un dispositivo de molienda para formar partículas a partir de un combustible sólido.

50 En otras realizaciones, el presente sistema de generación de potencia puede comprender lo siguiente: uno o más inyectores para proporcionar combustible, un fluido circulante de  $CO_2$ , y un oxidante; una cámara de combustión enfriada por transpiración que tiene al menos una etapa de combustión que somete a combustión el combustible y proporciona una corriente de fluido de desfogue una temperatura de al menos aproximadamente 800 °C y una presión de al menos aproximadamente 4 MPa (preferiblemente al menos aproximadamente 8 MPa); una turbina para producción de potencia que tiene una entrada y una salida y en donde la potencia es producida a medida que la corriente de fluido se expande, estando diseñada la turbina para mantener la corriente de fluido a una presión

55

deseada de tal manera que la relación de la presión de la corriente de fluido en la entrada versus la salida es menor de aproximadamente 12; un intercambiador de calor para enfriar la corriente de fluido que sale de por la salida de la turbina y para calentar el fluido circulante de CO<sub>2</sub>; y uno o más dispositivos para separar la corriente de fluido que sale del intercambiador de calor hacia el CO<sub>2</sub> y uno o más componentes adicionales para recuperación o desecho.

5 En realizaciones adicionales, el sistema de generación de potencia también puede comprender uno o más dispositivos para suministrar al menos una porción del CO<sub>2</sub> separado de la corriente de fluido en una tubería presurizada.

En realizaciones específicas, el sistema puede comprender uno o más componentes tal como se describe aquí retroalimentados con un sistema de producción de potencia convencional, tal como una estación de potencia por quema de carbón, un reactor nuclear, o similares. Por ejemplo, un sistema de potencia podría comprender dos unidades de intercambio de calor en diferentes (por ejemplo una unidad de intercambio de calor primaria y unidad de intercambio de calor secundaria). La unidad de intercambio de calor primario podría ser sustancialmente una unidad como se describe aquí en otro lugar, y la unidad de intercambio de calor secundaria podría ser una unidad útil para transferir calor desde la corriente de descarga de la turbina a una o más corrientes de vapor (por ejemplo, desde una caldera asociada con el sistema de producción de potencia convencional) para sobrecalentar las corrientes de vapor. Así, un sistema de generación de potencia usado de acuerdo con la invención puede comprender una unidad de intercambio de calor secundaria localizada entre y en comunicación fluida con la turbina y con la unidad de intercambio de calor primaria. El sistema de generación de potencia puede comprender de la misma manera una caldera en comunicación fluida con la segunda unidad de intercambio de calor a través de al menos una corriente de vapor. Todavía adicionalmente, el sistema de generación de potencia puede comprender al menos una turbina de producción de potencia adicional que tiene una entrada para recibir la al menos una corriente de vapor desde la unidad de intercambio de calor secundaria. Así, el sistema puede ser descrito comprendiendo una turbina de producción de potencia primaria y una turbina de producción de potencia secundaria. La turbina de producción de potencia primaria puede ser la turbina en comunicación fluida con la cámara de combustión de la invención. La turbina de producción de potencia secundaria puede ser la turbina en comunicación fluida con una corriente de vapor, particularmente una corriente de vapor sobrecalentada que es sobrecalentada con calor de la corriente de descarga de la turbina de producción de potencia primaria. Tal sistema que se retroalimenta con uno o más componentes de un sistema de producción de potencia convencional es descrito, particularmente en relación con la Figura 12 y el ejemplo 2. El uso de los términos turbina de producción de potencia primaria y turbina de producción de potencia secundaria no deberían ser considerados como limitantes del alcance de la invención y se utilizan solamente para proporcionar claridad en la descripción.

En otro aspecto de la invención puede calentarse una corriente externa si en el extremo a alta temperatura el intercambiador de calor por transferencia de calor desde la corriente de desfogue de la turbina de enfriamiento y, como resultado, la corriente recirculada a alta presión saldrá del intercambiador de calor y entrará en la cámara de combustión a una temperatura inferior. En este caso, la cantidad de combustible quemado en la cámara de combustión puede ser incrementada de tal manera que se mantenga la temperatura de entrada a la turbina. El valor de calentamiento del combustible extra quemado es equivalente a la carga de calor extra impuesta sobre el intercambiador de calor.

En realizaciones adicionales, la invención proporciona procesos en los cuales pueden satisfacerse ciertas condiciones. En realizaciones específicas, la invención puede ser caracterizada adicionalmente por una o más de las siguientes acciones o dispositivos útiles para llevar a cabo tales acciones:

comprimir el fluido circulante de CO<sub>2</sub> hasta una presión en exceso de la presión crítica de CO<sub>2</sub>;

50 someter a combustión directamente un combustible hidrocarbonado sólido, líquido o gaseoso en O<sub>2</sub> sustancialmente puro con la provisión de mezclar un fluido recirculado supercrítico rico en CO<sub>2</sub> para alcanzar una temperatura de entrada en turbina de potencia requerida-por ejemplo, mayor a aproximadamente 500 °C (u otro rango de temperatura como se describe aquí);

50 expandir una corriente supercrítica formada a partir de los productos de combustión y el fluido recirculado rico en CO<sub>2</sub> en una turbina con producción de potencia de eje, expandiéndose particularmente a una presión que está por encima de aproximadamente 2 MPa y está por debajo de la presión a la cual la fase líquida de CO<sub>2</sub> aparece cuando el fluido es enfriado a una temperatura consistente con el uso de medios de enfriamiento a temperatura ambiente (por ejemplo, aproximadamente 7.3-7.4 MPa);

introducir un desfogue de turbina en un intercambiador de calor en el cual se enfría el desfogue de la turbina y el calor es transferido a un fluido supercrítico rico en CO<sub>2</sub> recirculado;

55 enfriar una corriente que contiene CO<sub>2</sub> al salir de un intercambiador de calor contra un medio de enfriamiento a temperatura ambiente y separar una fase líquida de agua que contiene al menos concentraciones menores de CO<sub>2</sub> y una fase gaseosa de CO<sub>2</sub> que contiene al menos una concentración menor de vapor de agua;

60 llevar a cabo una separación de agua de una manera que permita un tiempo de residencia deseado (por ejemplo, hasta 10 segundos) con contacto íntimo entre el CO<sub>2</sub> gaseoso y el agua líquida o una fase ácida débil de tal forma que las reacciones que involucran 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 pueden tener lugar dando como resultado la conversión de más del 98% del azufre presente en una corriente a H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y la conversión de más de 90% de los

- óxidos de nitrógeno presentes en una corriente a  $\text{HNO}_3$ , y la conversión de más del 80% del mercurio en una corriente a compuestos de mercurio solubles;
- 5 separar componentes no condensables (tales como  $\text{N}_2$ , Ar y  $\text{O}_2$ ) de una fase de  $\text{CO}_2$  gaseosa enfriando hasta una temperatura cercana al punto de congelación del  $\text{CO}_2$  con una separación de fase en gas/líquida que deja el  $\text{N}_2$ , Ar y  $\text{O}_2$ , predominantemente en la fase gaseosa;
- comprimir una corriente de  $\text{CO}_2$  gaseosa purificada en un compresor de gas hasta una presión en la cual el enfriamiento por medios de enfriamiento a temperatura ambiente producirá un fluido de  $\text{CO}_2$  de alta densidad (por ejemplo, una densidad de al menos aproximadamente  $200 \text{ kg/m}^3$ , preferiblemente al menos aproximadamente  $300 \text{ kg/m}^3$ , o más preferiblemente al menos aproximadamente  $400 \text{ kg/m}^3$ );
- 10 enfriar el  $\text{CO}_2$  comprimido con medios de enfriamiento a temperatura ambiente para formar un fluido supercrítico de  $\text{CO}_2$  de alta densidad (por ejemplo, con una densidad de al menos aproximadamente  $200 \text{ kg/m}^3$ , preferiblemente al menos aproximadamente  $300 \text{ kg/m}^3$ , o más preferiblemente al menos aproximadamente  $400 \text{ kg/m}^3$ );
- comprimir un fluido de  $\text{CO}_2$  de alta densidad en un compresor hasta una presión por encima de la presión crítica del  $\text{CO}_2$ ;
- 15 separar una corriente de  $\text{CO}_2$  a alta presión en dos corrientes separadas-una que entra al extremo frío de un intercambiador de calor y una segunda que es calentada utilizando una fuente de calentamiento externo disponible a una temperatura por debajo de aproximadamente  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- facilitando una 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 al extremo caliente de un intercambiador de calor y la temperatura de un fluido circulante de  $\text{CO}_2$  recirculado que sale del extremo caliente del mismo intercambiador de calor es menor que aproximadamente  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  (u otro umbral de temperatura tal como se describe aquí);
- 20 comprimir un fluido circulante de  $\text{CO}_2$  a una presión de aproximadamente 8 MPa hasta aproximadamente 50 MPa (u otro rango de presión según se describe aquí);
- 25 mezclar una corriente de  $\text{O}_2$  con al menos una porción de la corriente de fluido circulante de  $\text{CO}_2$  recirculada y una corriente de combustible que contiene carbono para formar una corriente de fluido sencilla (o suspensión si se usa un combustible sólido pulverizado), la cual está por debajo de la temperatura de autoignición del combustible, y cuyas proporciones están ajustadas para dar una temperatura de llama adiabática de aproximadamente  $1.200 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $3.500 \text{ }^\circ\text{C}$  (u otro rango de temperatura según se describe aquí);
- 30 mezclar al menos una porción de un fluido circulante de  $\text{CO}_2$  recirculada con productos de combustión para formar una corriente fluida mixta a una temperatura en el rango de aproximadamente  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $1.600 \text{ }^\circ\text{C}$  (u otro rango de temperatura según se describe aquí);
- producir una corriente de descarga de turbina que tiene una presión de aproximadamente 2 MPa a aproximadamente 7.3 MPa (u otro rango de presión según se describe aquí);
- 35 calentar externamente una porción de una corriente de fluido circulante de  $\text{CO}_2$  a alta presión utilizando calor de compresión derivado de la operación de uno o más compresores de aire de una planta de  $\text{O}_2$  criogénica (particularmente en el modo adiabático) y/o un compresor de  $\text{CO}_2$  (particularmente en el modo diabático), siendo transferido el calor por circulación de un fluido de transferencia de calor adecuado (incluyendo el fluido de  $\text{CO}_2$  mismo);
- 40 calentar una o más corrientes fluidas externas en un intercambiador de calor con combustible extra equivalente que es quemado en un quemador, en donde una o más de las corrientes de fluido externas pueden comprender vapor, el cual puede ser sobrecalentado en el intercambiador de calor;
- utilizar el calor suministrado por el vapor de condensación provisto por una fuente externa para calentar externamente una porción de una corriente de fluido circulante de  $\text{CO}_2$  recirculada;
- 45 enfriar en un intercambiador de calor una corriente que contiene  $\text{CO}_2$  (la cual sale del extremo frío del intercambiador de calor) para proporcionar calor para calentar una corriente de fluido provista externamente;
- proporcionar una corriente de alimentación de  $\text{O}_2$  en donde la concentración molar del  $\text{O}_2$  es al menos 85% (u otro rango de concentración según se describe aquí);
- 50 operar una cámara de combustión de tal manera que la concentración de  $\text{O}_2$  en la corriente de gas total que sale de la cámara de combustión (esto es, una corriente producto de la combustión) y que entra a la turbina es mayor de aproximadamente 0.1% molar;
- llevar a cabo un proceso de producción de potencia de tal manera que se usa solamente una turbina productora de potencia;

- llevar a cabo un proceso de producción de potencia de tal manera que se usa solamente una cámara de combustión para someter a combustión de manera sustancial completamente la entrada de combustible que contiene carbono en la cámara de combustión;
- 5 operar 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 a la cámara de combustión está por debajo de la cantidad requerida para la combustión estequiométrica de la corriente de combustible que entra a la cámara de combustión y generar así la producción de uno o ambos de H<sub>2</sub> y monóxido de carbono (CO) en la corriente del producto de combustión; y
- 10 llevar a cabo un proceso que utiliza dos o más turbinas teniendo cada una una presión de salida definida en donde uno o ambos de H<sub>2</sub> y CO están presentes en la corriente de descarga que sale de la primera turbina (y turbinas subsecuentes, que es aplicable, con la excepción de la turbina final en la serie de turbinas) y parte o todo del H<sub>2</sub> y de CO son sometidos a combustión mediante la adición de una corriente de O<sub>2</sub> antes de la entrada de la segunda y subsecuentes turbinas para elevar la temperatura de operación de cada una de la segunda o más turbinas a un valor más alto que da como resultado un exceso de O<sub>2</sub> en la corriente de salida de la última turbina, siendo tal exceso mayor de aproximadamente 0.1% molar.
- 15 En realizaciones adicionales, la presente invención puede proporcionar uno o más de los siguientes:
- calentar un fluido circulante de CO<sub>2</sub> en un sistema de intercambio de calor contra la corriente de desfogue de la turbina de enfriamiento de tal manera que la corriente de desfogue de la turbina es enfriada a una temperatura por debajo de su punto de rocío del agua;
- 20 enfriar la corriente de desfogue de la turbina contra un medio de enfriamiento a temperatura ambiente y condensar el agua junto con combustible e impurezas 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 la forma de compuestos iónicos en solución;
- comprimir el fluido circulante de CO<sub>2</sub> purificado hasta una presión por encima de su presión crítica pero por debajo de 10 MPa en un primer compresor;
- enfriar el fluido circulante hasta un punto en donde su densidad es mayor a 600 kg/m<sup>3</sup>;
- 25 comprimir el fluido circulante de CO<sub>2</sub> de alta densidad en un compresor a la presión requerida para superar la caída de presión en el sistema y alimentar el fluido de CO<sub>2</sub> circulante en la cámara de combustión;
- eliminar una corriente de producto de CO<sub>2</sub> que contiene sustancialmente todo el CO<sub>2</sub> formado por combustión del carbono en una corriente de combustible, siendo tomada la corriente de CO<sub>2</sub> bien sea del flujo de descarga del primer compresor o del segundo compresor;
- 30 suministrar una cantidad adicional de calor al fluido circulante de CO<sub>2</sub> a un nivel de temperatura el cual está por encima del punto de rocío del agua de la corriente de desfogue de la turbina de enfriamiento bien sea directamente al intercambiador de calor o calentando una parte que comprende una corriente lateral del fluido circulante de CO<sub>2</sub> de tal manera que la diferencia de temperatura entre el fluido CO<sub>2</sub> circulante y el desfogue de la turbina en el extremo caliente del intercambiador de calor es menor de 50 °C;
- 35 utilizar un combustible que comprende un combustible que contiene carbono que tiene un residuo incombustible el cual es parcialmente oxidado con O<sub>2</sub> en una cámara de combustión enfriada por transpiración para producir una corriente que comprende H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub> y un residuo incombustible, siendo alimentada la cámara de combustión con parte del fluido de CO<sub>2</sub> circulante para enfriar los productos de combustión parcialmente oxidados hasta una temperatura de 500 °C a 900 °C en donde las cenizas están presentes como partículas sólidas que
- 40 pueden ser removidas completamente de la corriente de fluido de salida mediante un sistema de filtración;
- proporcionar una diferencia de temperatura entre la corriente de desfogue de la turbina de enfriamiento y la corriente de fluido de CO<sub>2</sub> circulante de calentamiento en el punto en el cual el flujo de corriente lateral se remezcla con el flujo de fluido de CO<sub>2</sub> circulante calentado separadamente que está entre 10 °C y 50 °C;
- 45 proporcionar una presión de la corriente de desfogue de la turbina que sale del extremo frío del intercambiador de calor de tal manera que no se forma CO<sub>2</sub> líquido cuando está corriente es enfriada antes de la separación de agua e impurezas;
- utilizar al menos parte de la corriente de desfogue de la turbina para sobrecalentar corrientes de vapor múltiples derivadas de los sistemas de potencia de vapor asociados con los sistemas de caldera convencionales y reactores nucleares;
- 50 proporcionar calor de nivel bajo adicional a la corriente de CO<sub>2</sub> circulante como vapor a uno o más niveles de presión tomados de la fuente de calor externa tal como una estación de potencia;
- utilizar la corriente de desfogue en expansión que sale del extremo frío del sistema intercambiador de calor para proporcionar calentamiento para al menos una parte del condensado que sale del condensador de vapor del sistema de generación de potencia por vapor;
- 55 el proporcionar calor de nivel bajo adicional a la corriente de CO<sub>2</sub> circulante desde el desfogue caliente de una turbina de gas de ciclo abierto;

pasar un gas derivado del carbón parcialmente oxidado a más CO<sub>2</sub> como combustible a una segunda cámara de combustión para combustión completa;

5 operar una cámara de combustión sencilla con una relación de O<sub>2</sub> a combustible tal que parte del combustible es oxidado a productos de oxidación que comprenden CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y SO<sub>2</sub> y el resto de combustible es oxidado a componentes que comprenden H<sub>2</sub>, CO y H<sub>2</sub>S;

operar dos turbinas las cuales superan la relación de presión total requerida con O<sub>2</sub> inyectado en el flujo de descarga de la primera turbina para someter a combustión los componentes reducidos para recalentar el flujo de presión intermedio hasta una temperatura superior antes de que sea expandido a través de la segunda turbina.

10 Realizaciones incluso adicionales son abarcadas por la presente invención según se describe en relación con las diversas figuras y/o se divulga en la descripción siguiente de la invención provista aquí.

Breve descripción de los dibujos

Habiendo descrito así la invención en términos generales, se hará referencia ahora a los dibujos acompañantes, los cuales no necesariamente están dibujados a escala, y en donde:

15 La Figura 1 es una ilustración esquemática de un aparato de combustión enfriado por transpiración que puede ser utilizado de acuerdo con ciertas realizaciones de la presente divulgación;

La Figura 2 es una ilustración esquemática de una sección transversal de ejemplo de una pared de un miembro de transpiración en un aparato de combustión que puede ser utilizado en ciertas realizaciones de la presente divulgación;

20 Las Figura 3A y la Figura 3B ilustran esquemáticamente un proceso de ajuste en caliente para un ensamblaje de un miembro de transpiración de un aparato de combustión que puede ser utilizado en ciertas realizaciones de la presente divulgación.

La Figura 4 ilustra esquemáticamente un aparato para eliminación de contaminantes producto de la combustión que puede ser útil de acuerdo con ciertas realizaciones de la presente divulgación;

25 La Figura 5 es un diagrama de flujo que ilustra un ciclo de potencia de acuerdo con una realización de la presente divulgación;

La Figura 6 es un diagrama de flujo que ilustra el flujo de un fluido circulante de CO<sub>2</sub> a través de una unidad de separación de acuerdo con una realización de la presente divulgación;

La Figura 7 es un diagrama de flujo que ilustra la presurización utilizando una serie de dos o más compresores o bombas en una unidad de presurización de acuerdo con una realización de la presente divulgación;

30 La Figura 8 es un diagrama de flujo que ilustra una unidad intercambiadora de calor de acuerdo con una realización de la presente divulgación en donde se utilizan tres intercambiadores de calor individuales en serie;

La Figura 9 es un diagrama de flujo que ilustra una unidad de turbina que utiliza las turbinas operadas en serie en el modo de reducción de acuerdo con una realización de la presente divulgación;

35 La Figura 10 es un diagrama de flujo que ilustra un sistema y un método para producción de potencia de acuerdo con una realización de la presente invención usando dos cámaras de combustión;

La Figura 11 es un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo específico de un sistema y método para la producción de potencia de acuerdo con una realización de la presente divulgación; y

40 La Figura 12 es un diagrama de flujo que ilustra otro ejemplo de un sistema y método para producción de potencia incorporando una caldera para quema de carbón convencional de acuerdo con una realización de la presente divulgación.

Descripción detallada de la invención

45 La invención será descrita ahora más completamente de aquí en adelante a siendo referencia a diversas realizaciones. Estas realizaciones son provistas de manera que esta divulgación sea exhaustiva y completa, y transmitirá completamente el alcance de la invención para los experimentados en la técnica. En efecto, la invención puede ser realizada en muchas diferentes maneras y no debería ser considerada como limitada a las realizaciones establecidas aquí; en vez de esto, estas realizaciones se proporcionan de tal manera que esta divulgación satisfaga los requerimientos legales aplicables. Tal como se utilizan en esta especificación, y en las reivindicaciones anexas, las formas singulares "un", "una", "el, la", incluyen referentes plurales a menos que el contexto dicte claramente otra cosa.

50 La presente invención proporciona métodos para producir potencia a través del uso de una cámara de combustión de combustible de alta eficiencia (tal como una cámara de combustión enfriada por transpiración) y un fluido circulante asociado (tal como un fluido circulante de CO<sub>2</sub>). El fluido circulante es provisto en la cámara de combustión junto con un combustible apropiado, cualquier oxidante necesario, y cualquier material asociado que pueda ser útil para una combustión eficiente. En realizaciones específicas, los métodos pueden ser llevados a cabo

utilizando una cámara de combustión que opera a temperaturas muy altas (por ejemplo, en el rango de aproximadamente 1.600 °C hasta aproximadamente 3.300 °C, u otros rangos de temperatura tal como se divulga aquí), y la presencia de fluido circulante puede funcionar para moderar la temperatura de una corriente de fluido que sale de la cámara de combustión de tal manera que la corriente de fluido pueda ser utilizada en la transferencia de energía para la producción de potencia. Específicamente, una corriente de producto de combustión puede ser expandida a través de al menos una turbina para generar potencia. La corriente de gas expandido puede ser enfriada para retirar diversos componentes de la corriente, tales como agua, y calor retirado de la corriente de gas expandido puede ser utilizado para calentar el fluido circulante de CO<sub>2</sub>. La corriente de fluido circulante purificada puede ser entonces presurizada y calentada para recircular a través de la cámara de combustión. Si se desea, parte del CO<sub>2</sub> del producto de la corriente producto de combustión (esto es, que surge del CO<sub>2</sub> formado por combustión del combustible que contiene carbono en la presencia de oxígeno) puede ser extraída para retención u otra forma de desecho, tal como transferencia a una tubería de CO<sub>2</sub>. El sistema y métodos pueden hacer uso de parámetros y componentes de proceso específicos para maximizar la eficiencia del sistema y método, particularmente a la vez que se evita la liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Como se describe particularmente aquí, el fluido circulante es ejemplificado por uso de CO<sub>2</sub> como fluido circulante. Mientras que el uso de un fluido circulante de CO<sub>2</sub> es una realización ventajosa de acuerdo con la invención, tal divulgación no debe ser considerada como limitante necesariamente del alcance del fluido circulante que puede ser utilizado en la invención a menos que se establezca otra cosa.

En ciertas realizaciones, un sistema de generación de potencia de acuerdo con la invención puede utilizar un fluido circulante que comprende predominantemente CO<sub>2</sub>. En otras palabras, la naturaleza química del fluido circulante inmediatamente antes de la entrada a 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, o al menos aproximadamente 99% en concentración molar de CO<sub>2</sub>. El fluido circulante inmediatamente antes de entrar a la cámara de combustión comprende preferiblemente de manera sustancial solo CO<sub>2</sub>. En este sentido, la expresión "sustancialmente solo" puede significar al menos aproximadamente el 99.1% en concentración molar, al menos aproximadamente 99.25% en concentración molar, al menos aproximadamente el 99.5% en concentración molar, al menos aproximadamente 99.75% en concentración molar, al menos aproximadamente 99.8% en concentración molar, o al menos aproximadamente 99.9% en concentración molar de CO<sub>2</sub>. En la cámara de combustión, el CO<sub>2</sub> puede coexistir con uno o más componentes adicionales que puedan ser derivados del combustible, cualquier oxidante, y cualquier derivado de la combustión del combustible. Así, el fluido circulante que sale de la cámara de combustión, el cual puede ser descrito aquí como una corriente producto de 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, Ar, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, HCl, Hg y trazas de otros componentes que pueden ser derivados del proceso de combustión (por ejemplo partículas, tales como cenizas o cenizas licuadas) incluyendo combustibles adicionales. Tales como se describe en mayor detalle más adelante, el proceso de combustión puede ser controlado de tal manera que la naturaleza de la corriente fluida pueda ser bien sea reductora u oxidante, lo cual puede proporcionar particularmente los beneficios descritos.

Los sistemas y métodos de la invención pueden incorporar uno o más cámaras de combustión útiles para la combustión de un combustible adecuado, tal como se describe aquí. Preferiblemente, al menos un combusto o sea de acuerdo con la presente invención es una cámara de combustión de alta eficiencia capaz de proporcionar una combustión sustancialmente completa de un combustible a una temperatura de combustión relativamente alta. La combustión a alta temperatura puede ser particularmente útil para proporcionar una combustión sustancialmente completa del combustible y así maximizar la eficiencia. En diversas realizaciones, la 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 realizaciones adicionales, la combustión a alta temperatura puede significar combustión a una temperatura de aproximadamente 1.200 °C a aproximadamente 5.000 °C, aproximadamente 1.500 °C a aproximadamente 4.000 °C, aproximadamente 1.600 °C a aproximadamente 3.500 °C, aproximadamente 1.700 °C a aproximadamente 3.200 °C, aproximadamente 1.800 °C a aproximadamente 3.100 °C, aproximadamente 1.900 °C a aproximadamente 3.000 °C, o aproximadamente 2.000 °C a aproximadamente 3.000 °C.

En ciertas realizaciones, la combustión a alta temperatura de acuerdo con la invención puede ser llevada a cabo usando una cámara de combustión enfriada por transpiración. Un ejemplo de una cámara de combustión enfriada por transpiración que puede ser utilizada en la invención está descrito en la solicitud de patente de los Estados Unidos No 12/714,074, presentada el 26 de febrero del 2010. En algunas realizaciones, una cámara de combustión enfriada por transpiración útil de acuerdo con la invención puede incluir una o más zonas de intercambio de calor, uno o más fluidos de enfriamiento, y uno o más fluidos de transpiración.

El uso de una cámara de combustión enfriada por transpiración de acuerdo con la presente invención es particularmente ventajoso con respecto a la técnica conocida alrededor de la combustión de combustible para la

producción de potencia. Por ejemplo, el uso del enfriamiento por transpiración puede ser utilizado para prevenir la corrosión, fallo y erosión en la cámara de combustión. Esto permite adicionalmente que la cámara de combustión trabaje en un rango de temperatura suficientemente alto para permitir una combustión completa o al menos sustancialmente completa del combustible que es usado. Estas, y ventajas adicionales, serán descritas aquí posteriormente.

En un aspecto particular, una cámara de combustión enfriada por transpiración útil de acuerdo con la invención puede incluir una cámara de combustión al menos parcialmente definida por un miembro de transpiración, en donde el miembro de transpiración está rodeado al 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 ser configurada para recibir el combustible que contiene carbono que va a ser sometido a combustión dentro de la cámara de combustión a una temperatura de combustión para formar un producto de combustión. La cámara de combustión puede ser configurada adicionalmente para dirigir el producto de combustión hacia la porción de salida. El miembro de transpiración puede ser configurado para dirigir una sustancia de transpiración a través del mismo hacia la cámara de combustión para regular la interacción entre el producto de combustión y el miembro de transpiración. Además, la sustancia de transpiración puede ser introducida en la cámara de combustión para alcanzar una temperatura de salida deseada del producto de combustión. En realizaciones particulares, la sustancia de transpiración puede comprender al menos parcialmente el fluido circulante.

Las paredes de la cámara de combustión pueden estar recubiertas con una capa de material poroso a través de la cual se dirige y fluye la sustancia de transpiración, tal como CO<sub>2</sub> y/o H<sub>2</sub>O.

En aspectos todavía adicionales, el miembro 2332 de transpiración interno puede extenderse desde la porción 222A de entrada a la porción 222B de salida del miembro 230 de transpiración. En algunos casos, la estructura perforada/porosa del miembro 2332 de transpiración interno puede extenderse sustancialmente de manera completa (axialmente) desde la porción 222A de entrada a la porción 222B de salida de tal forma que el fluido 210 de transpiración es dirigido hacia sustancialmente la longitud completa de la cámara 222 de combustión. Esto es, sustancialmente la totalidad del miembro 2332 de transpiración interno puede ser configurada con una estructura perforada/porosa de tal forma que sustancialmente la longitud completa de la cámara 222 de combustión es enfriada por transpiración. Más particularmente, en algunos aspectos, el área de perforación/poros acumulativa puede ser sustancialmente igual al área superficial del miembro 2332 de transpiración interno. En todavía otros aspectos, las perforaciones/poros pueden estar espaciados entre sí a una densidad apropiada de tal forma que se logra una distribución sustancialmente uniforme de la sustancia de transpiración desde el miembro 2332 de transpiración interno hacia la cámara 222 de combustión (esto es, sin "puntos muertos" donde el flujo o presencia de la sustancia 210 de transpiración este ausente). En un ejemplo, una pulgada cuadrada del miembro 2332 de transpiración interno puede incluir un arreglo de perforaciones/poros del orden de 250 x 250 por pulgada cuadrada (aproximadamente 9800 x 9800 por metro cuadrado), de tal manera que se proporcionan aproximadamente 62500 poros/pulgada<sup>2</sup> (aproximadamente 9.6 x 10<sup>7</sup> poros/m<sup>2</sup>), estando tales perforaciones/poros espaciados alrededor de 0.004 pulgadas (aproximadamente 0.1mm) entre sí. La relación del área de poro al área de pared total (% de porosidad) puede ser por ejemplo de aproximadamente 50%. La disposición de poros puede ser variada en un amplio rango para adaptarse a otros parámetros de diseño del sistema, tales como la caída de presión deseada versus la rata de flujo a través del miembro de transpiración. Tamaños de arreglo de aproximadamente 10 x 10 hasta aproximadamente 10,000 x 10,000 por pulgada cuadrada (400 x 400 hasta aproximadamente 400,000 x 400,000 por metro cuadrado) con porcentajes de porosidad de aproximadamente 10% a 80% pueden ser utilizados 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, puede configurarse de tal manera que se alcance una temperatura de salida de la corriente de fluido de salida total deseada desde la cámara de combustión. En algunas realizaciones, según se describe aquí adicionalmente tal temperatura puede estar en el rango de aproximadamente 500 °C hasta aproximadamente 2000 °C. Este flujo puede servir también para enfriar el miembro de transpiración hasta una temperatura operacional máxima permisible del material que forma el miembro de transpiración. La sustancia de transpiración también puede servir para prevenir el impacto de cualquier material de cenizas líquido o sólido u otros contaminantes en el combustible que pueda corroer, fracturar o de alguna otra manera dañar las paredes. En tales casos, puede ser deseable utilizar un material para el miembro de transpiración con una conductividad térmica razonable de tal manera que el calor radiante incidente pueda ser conducido de manera radial hacia afuera a través del miembro de transpiración poroso y luego ser intersectado por transferencia de calor por convección desde la superficies de la estructura de capa porosa al fluido que pasa radialmente hacia dentro a través de la capa de transpiración. Tal configuración puede permitir que la parte subsecuente de la corriente dirigida a través del miembro de transpiración sea calentada a una temperatura en un rango deseable, tal como aproximadamente 500 °C hasta aproximadamente 1,000 °C, mientras que simultáneamente se mantiene la temperatura del miembro de transpiración porosa dentro del rango de diseño del material utilizado para la misma. Materiales adecuados para el miembro de transpiración poroso pueden incluir, por ejemplo, cerámicas porosas, cubiertas de fibra de metal refractario, secciones cilíndricas perforadas huecas y/o capas de metales sinterizados o polvos de metales sinterizados. Una segunda función del miembro de transpiración puede ser asegurar un flujo sustancialmente homogéneo radialmente hacia dentro del fluido de transpiración, así como longitudinalmente a lo largo de la cámara de combustión, para alcanzar una buena mezcla entre la corriente del fluido de transpiración y el producto de transpiración a la vez que se promueve un flujo axial homogéneo a lo largo de la longitud de la cámara de combustión. Una tercera función del miembro de

transpiración puede ser alcanzada una velocidad de fluido diluyente radialmente hacia dentro de tal manera que provea una amortiguación para o de alguna otra manera interseque las partículas sólidas y/o líquidas de ceniza u otros contaminantes dentro de los productos de combustión para que no impacten la superficie de la capa de transpiración y produzcan bloqueo u otros daños. Tal factor puede ser solamente de importancia, por ejemplo, cuando se somete a combustión un combustible, tal como carbón, que tiene un residuo residual inerte no combustible. La pared interna del recipiente de presión de la cámara de combustión que rodea el miembro de transpiración también puede ser aislada para aislar la corriente de fluido de transpiración a alta temperatura dentro de la cámara de combustión.

Una realización de un aparato de combustión adecuado para ser utilizado en el método de la presente invención se ilustra esquemáticamente en la Figura 1, estando indicado generalmente el aparato de combustión por el numeral 220. En este ejemplo, el aparato 220 de combustión puede estar configurado para someter a combustión un sólido en partículas tal como carbón para formar un producto de combustión, aunque también puede utilizarse cualquier otro material que contiene carbón no combustible, tal como se divulga aquí, como combustible. La cámara 222 de combustión puede estar definida por un miembro 230 de transpiración, el cual está configurado para dirigir un fluido de transpiración a través del mismo hacia la cámara 222 de combustión (esto es, para facilitar el enfriamiento por transpiración y/o para regular la interacción entre el producto de combustión y el miembro 230 de transpiración). Una persona experimentada en la técnica apreciará que el miembro 230 de transpiración puede ser sustancialmente cilíndrico, de tal manera que define una cámara 222 de combustión sustancialmente cilíndrica que tiene una porción 222A de entrada y una porción 222B de salida opuesta. El miembro 230 de transpiración puede estar rodeado al menos parcialmente por un miembro 2338 de contención de la presión. La porción 222A de entrada de la cámara 222 de combustión puede estar configurada para recibir una mezcla de combustibles a partir de una disposición de mezcla, generalmente indicada por el numeral 250. En otras realizaciones, tal disposición de mezcla puede estar ausente, y la entrada de uno o más de los materiales en la cámara de combustión puede ser agregada separadamente a través de entradas independientes. De acuerdo con realizaciones particulares, la mezcla de combustible puede ser sometida a combustión dentro de la cámara 222 de combustión a una temperatura de combustión particular para formar un producto de combustión, en donde la cámara 222 de combustión está configurada adicionalmente para dirigir el producto de combustión hacia la porción 222 B de salida. Un dispositivo 2350 de eliminación de calor (véase, por ejemplo, la Figura 2) puede estar asociado con el miembro 2338 de contención de la presión y configurado para controlar una temperatura del mismo. En casos particulares, el dispositivo 2350 de eliminación de calor puede comprender una camisa de transferencia de calor definida al menos parcialmente por una pared 2336 opuesta al miembro 2338 de contención de la presión, en donde un líquido puede hacerse circular en camisas 2337 de circulación de agua definidas entre ellos. En una realización, el líquido circulante puede ser agua.

En un aspecto particular, el miembro 2332 de transpiración interno poroso es configurado así para dirigir el fluido de transpiración hacia la cámara 222 de combustión, de tal manera que la sustancia 210 de transpiración entra en la cámara 222 de combustión en un ángulo sustancialmente recto (90°) con respecto a la superficie interna del miembro 2332 de transpiración interno. Entre otras ventajas, la introducción de la sustancia 210 de transpiración en el ángulo sustancialmente recto con respecto al miembro 2332 de transpiración interno puede facilitar o de alguna manera potenciar el efecto de dirigir gotitas de líquido o sólidos de desecho u otros contaminantes o vórtices de fluidos de combustión calientes lejos de la superficie interna del miembro 2332 de transpiración interno. La carencia de contacto entre las gotitas líquidas o sólidas de desecho puede prevenir la coalescencia de dichas gotitas en gotas o masas más grandes, lo cual es conocido que ocurre en la técnica anterior por contacto entre las gotitas o partículas y las paredes sólidas. La introducción de la sustancia 210 de transpiración en el ángulo sustancialmente recto con respecto al miembro 2332 de transpiración interno puede facilitar o potenciar de alguna otra manera el efecto de prevenir la formación de vórtices de fluido de combustión con velocidad suficiente perpendicular a y en proximidad del miembro de transpiración interno los cuales podrían impactar y dañar el miembro de transpiración interno. En tales casos, el miembro 2331 de transpiración externo, el miembro 2338 de contención de la presión, la camisa 2336 de transferencia de calor y/o la capa 2339 de aislamiento pueden ser configurados, bien sea individualmente o en combinación, para proporcionar un efecto de "colector" (esto es, proporcionar un suministro distribuido uniformemente de manera sustancial) con respecto al suministro de la sustancia/fluido 210 de transpiración hacia y a través del miembro 2332 de transpiración interno y hacia la cámara 222 de combustión. Esto es, un suministro sustancialmente uniforme (en términos de rata de flujo, presión o cualquier otra medición adecuada y apropiada) de la sustancia 210 de transpiración hacia dentro de la cámara 222 de combustión puede lograrse configurando el miembro 2331 de transpiración externo, el miembro 2338 de contención de la presión, la camisa 2336 de transferencia de calor y/o la capa 2339 de aislamiento para proporcionar un suministro uniforme de la sustancia 210 de transpiración al miembro 2332 de transpiración interno, o el suministro de la sustancia 210 de transpiración alrededor de la superficie externa del miembro 2332 de transpiración interno puede ser diseñado de manera particular y configurada de tal forma que se logre una distribución sustancialmente uniforme de la sustancia 210 de transpiración dentro de la cámara 222 de combustión. Tal distribución sustancialmente uniforme puede evitar la formación de vórtices de fluido de combustión calientes que pueden de alguna manera formar una interacción del flujo de transpiración no uniforme con el flujo de fluido de combustión y cuyos vértices pueden impactar y dañar el miembro de transpiración interno.

La disposición 250 de mezcla (cuando está presente) puede ser configurada para mezclar un combustible 254 carbonáceo con oxígeno 242 enriquecido y un fluido 236 circulante para formar una mezcla 200 de combustible. El

combustible 254 carbonáceo puede ser provisto en la forma de un combustible carbonáceo sólido, un combustible carbonáceo líquido, y/o un combustible carbonáceo gaseoso. El oxígeno 242 enriquecido puede ser oxígeno que tiene una pureza molar de más de aproximadamente 85%. El oxígeno 242 enriquecido puede ser suministrado, por ejemplo, por cualquier sistema/técnica de separación de aire conocido en el arte, tal como, por ejemplo, podría implementarse un proceso de separación de aire criogénico, o un proceso de separación de oxígeno por membrana de transporte iónico a alta temperatura (desde el aire). El fluido 236 circulante puede ser dióxido de carbono, tal como se describe aquí. En caso en donde el combustible 254 carbonáceo es un sólido en partículas, tal como carbón 254A pulverizado, la disposición 250 de mezcla puede estar configurada adicionalmente para mezclar el combustible 254A carbonáceo sólido en partículas con una sustancia 255 fluidizante. De acuerdo con un aspecto, el combustible 254A carbonáceo sólido en partículas puede tener un tamaño de partícula promedio de entre aproximadamente 50 micrones y aproximadamente 200 micrones. De acuerdo con aún otro aspecto, la sustancia 255 fluidizante puede comprender agua y/o CO<sub>2</sub> líquido con una densidad de entre aproximadamente 450 kg/m<sup>3</sup> y aproximadamente 1100 kg/m<sup>3</sup>. Más particularmente, la sustancia 255 fluidizante puede cooperar con el combustible 254A carbonáceo sólido en partículas para formar un lodo 250A que tiene, por ejemplo, entre aproximadamente 25% en peso y aproximadamente 55% en peso del combustible 254A carbonáceo sólido en partículas. Aunque el oxígeno 242 se muestra en la Figura 1 como mezclado con el combustible 254 y el fluido 236 circulante antes de la introducción a la cámara 222 de combustión, una persona experimentada en la técnica apreciaría que, en algunos casos, el oxígeno 242 puede ser introducido separadamente en la cámara 222 de combustión, según sea necesario o deseado.

La disposición 250 de mezcla, en algunos aspectos, puede comprender, por ejemplo, un arreglo de boquillas de inyección separadas entre sí (no mostrada) dispuestas alrededor de una pared 223 de extremo de miembro 230 de transpiración asociada con la porción 222A de entrada de la cámara 222 de combustión cilíndrica. Inyectando el combustible/mezcla de combustible en la cámara 222 de combustión de esta manera puede proporcionarse, por ejemplo, un área superficial grande de la corriente de entrada de mezcla de combustible inyectada la cual puede, a su vez, facilitar la rápida transferencia de calor a la corriente de entrada de la mezcla de combustible inyectada por radiación. La temperatura de la mezcla combustible inyectada puede así incrementarse 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 rango de, por ejemplo, entre aproximadamente 10 m/segundo a aproximadamente 40 m/segundo, aunque estos valores pueden depender de muchos factores, tales como la configuración de las boquillas de inyección particulares. Tal arreglo de inyección puede en general tomar muchas formas diferentes. Por ejemplo, la disposición de la inyección puede comprender una disposición de orificios, por ejemplo, del rango de entre aproximadamente 0.5 mm y aproximadamente 3 mm de diámetro, en donde el combustible inyectado sería inyectado a través de una velocidad de entre aproximadamente 10 m/s y aproximadamente 40 m/s.

Como se muestra más particularmente en la Figura 2, la cámara 222 de combustión puede ser definida por el miembro 230 de transpiración, el cual puede estar al menos parcialmente rodeado por un miembro 2338 de contención de presión. En algunos casos, el miembro 3238 de contención de presión puede estar adicionalmente al menos rodeado parcialmente por una camisa 2336 de transferencia de calor, en donde la camisa 2336 de transferencia de calor puede operar con el miembro 2338 de contención de presión para definir uno o más canales 2337 entre ellos, a través de los cuales pueda circular una corriente de agua a baja presión. A través de un mecanismo de evaporación, el agua circulante puede ser utilizada para controlar y/o mantener una temperatura seleccionada del miembro 2338 de contención de presión, por ejemplo, en un rango de aproximadamente 100 °C a aproximadamente 250 °C. En algunos aspectos, la capa 2339 de aislamiento puede ser dispuesta entre el miembro 230 de transpiración y el miembro 2338 de contención de la presión.

En algunos casos, el miembro 230 de transpiración puede comprender, por ejemplo, un miembro 2331 de transpiración externo y un miembro 2332 de transpiración interno, estando dispuesto el miembro 2332 de transpiración interno opuesto al miembro 2331 de transpiración externo desde el miembro 2338 de contención de presión, y definiendo la cámara 222 de combustión. El miembro 2331 de transpiración externo puede estar compuesto de cualquier material resistente a la alta temperatura adecuado tal como, por ejemplo, acero y aleaciones de acero, incluyendo acero inoxidable y aleaciones de níquel. En algunos casos, el miembro 2331 de transpiración externo puede estar configurado para definir primeros pasos 2333A de suministro de fluido de transpiración que extienden a través del mismo desde la superficie del mismo adyacente a la capa 2339 aislante a la superficie del mismo adyacente al miembro 2332 de transpiración interno. Los primeros pasos 2333A de suministro de fluido de transpiración pueden, en algunos casos, corresponder con los segundos pasos 2333B y suministro de fluido de transpiración definidos por el miembro 2338 de contención de presión, a la camisa 2336 para transferencia de calor y/o la capa 2339 de aislamiento. Los primero y segundo pasos 2333A, 2333B de suministro de fluidos de transpiración pueden estar así configurados para cooperar en dirigir un fluido de transpiración a través de los mismos hacia el miembro 2332 de transpiración interno. En algunos casos, como se muestra, por ejemplo, en la Figura 1, el fluido 210 de transpiración puede comprender el fluido 236 circulante, y puede ser obtenido de la misma fuente asociada con el mismo. Los primeros y segundos pasos 2333A, 2333B de suministro de fluido de transpiración pueden ser aislados, según sea necesario, para suministrar el fluido 210 de transpiración (esto es, CO<sub>2</sub>) en suministro suficiente y a una presión suficiente de tal manera que el fluido 210 de transpiración es dirigido a través del miembro 2332 de transpiración interno y hacia dentro de la cámara 222 de combustión. Tales medidas que involucran el miembro 230 de transpiración y el fluido 210 de transpiración asociado, tal como se divulgan aquí,

pueden permitir que el aparato 220 de combustión opere a las presiones relativamente altas y a las temperaturas relativamente altas diferentes a las divulgadas aquí.

En este aspecto, el miembro 2332 de transpiración interno puede estar compuesto de, por ejemplo, un material cerámico poroso, un material perforado, un material laminado, un material poroso compuesto de fibras orientadas aleatoriamente en dos dimensiones y ordenadas en la tercera dimensión, o cualquier otro material o combinaciones de los mismos que exhiba las características requeridas del mismo según se divulgan aquí, a saber múltiples pasos o poros de flujo u otras aberturas 2335 adecuadas para recibir y dirigir el fluido de transpiración a través del miembro 2332 de transpiración interno. Ejemplos no limitantes de materiales cerámicos y otros porosos adecuados para tales sistemas de enfriamiento por transpiración incluyen óxido de aluminio, óxido de circonio, circonio endurecido por transformación, cobre, molibdeno, tungsteno, tungsteno infiltrado con cobre, molibdeno recubierto con tungsteno, cobre recubierto con tungsteno, diversas aleaciones de níquel de alta temperatura, y materiales envainados o recubiertos con renio. Fuentes de materiales adecuados incluyen, por ejemplo, CoorsTek, Inc., (Golden, CO) (zirconio); UltraMet Advanced Materials Solutions (Pacoima, CA) (recubrimientos metálicos refractarios); Orsam Sylvania (Danvers, MA) (tungsteno/cobre); y MarkeTech International, Inc. (Port Townsend, WA) (tungsteno). Ejemplos de materiales perforados adecuados para sistemas de enfriamiento por transpiración incluyen todos los materiales y proveedores anteriores (donde las estructuras finales perforadas pueden ser obtenidas, por ejemplo, perforando una estructura inicialmente no porosa utilizando métodos conocidos en el arte de la manufactura). Ejemplos de materiales laminados adecuados incluyen todos los materiales y proveedores anteriores (en donde las estructuras finales laminadas pueden ser obtenidas, por ejemplo, laminando estructuras no porosas o parcialmente porosas de manera tal que se alcance la porosidad final deseada utilizando métodos conocidos en el arte de la manufactura).

Las Figuras 3A y 3B ilustran que, en un aspecto de un aparato 220 de combustión, la estructura que define la cámara 220 de combustión puede ser formada a través de un ajuste de interferencia “caliente” entre el miembro 230 de transpiración y la estructura circundante, tal como el miembro 2338 de contención de presión o la capa 23339 de aislamiento dispuesta entre el miembro 230 de transpiración y el miembro 2338 de contención de la presión. Por ejemplo, cuando está relativamente “frio” el miembro 230 de transpiración puede ser dimensionado para que sea más pequeño, radial y/o axialmente con respecto al miembro 2338 de contención de presión circundante. Como tal, cuando se inserta dentro del miembro 2338 de contención de presión, una brecha radial y/o axial puede estar presente dentro del mismo (véase, por ejemplo Figura 3A). Desde luego, tales diferencias en dimensiones pueden facilitar la inserción del miembro 230 de transpiración dentro del miembro 2338 de contención de la presión. Sin embargo, cuando se calienta, por ejemplo, hacia la temperatura operacional, el miembro 230 de transpiración puede ser configurado para expandirse radialmente y/o axialmente para reducir o eliminar las brechas anotadas (véase, por ejemplo, la Figura 3B). Al hacerlo así, puede formarse un ajuste de interferencia axial y/o radial entre el miembro 230 de transpiración y el miembro 2338 de contención de la presión. En casos que involucran un miembro 230 de transpiración con un miembro 2331 de transpiración externo y un miembro 2332 de transpiración interno, tal ajuste de interferencia puede colocar el miembro 2332 de transpiración interno bajo compresión. Como tal, pueden utilizarse materiales resistentes a la ruptura a alta temperatura, tales como cerámica porosa, para formar el miembro 2332 de transpiración interno.

Con el miembro 2332 de transpiración interno configurado de esa manera, la sustancia 210 de transpiración puede comprender, por ejemplo, dióxido de carbono (esto es, de la misma fuente que el fluido 236 circulante) dirigido a través del miembro 2332 de transpiración interna de tal manera que la sustancia 210 de transpiración forma una capa 231 amortiguadora (esto es, una “pared de vapor”) inmediatamente adyacente al miembro 2332 de transpiración interno dentro de la cámara 222 de combustión, en donde la capa 231 amortiguadora puede ser configurada para amortiguar la interacción entre el miembro 2332 de transpiración interno y los elementos incombustibles licuados y asociados al calor con el producto de la combustión. Esto es, en algunos casos, el fluido 210 de transpiración podría ser suministrado a través del miembro 2332 de transpiración interno, por ejemplo, al menos a la presión dentro de la cámara 222 de combustión, en donde la rata de flujo del fluido 210 de transpiración (esto es, corriente de CO<sub>2</sub>) hacia la cámara 222 de combustión es suficiente para que el fluido 210 de transpiración se mezcle con y enfríe los productos de combustión para formar una mezcla de fluido de salida a una temperatura suficiente con respecto al requerimiento de entrada del proceso corriente abajo subsecuente (esto es, una turbina puede requerir una temperatura de entrada, por ejemplo, de aproximadamente 1225 °C), pero en donde la mezcla de fluido de salida permanece suficientemente alta para mantener gotitas de residuos u otros contaminantes en el combustible en un estado fluido o líquido. El estado líquido de los elementos incombustibles del combustible puede facilitar, por ejemplo, la separación de tales contaminantes del producto de combustión en forma líquida, preferiblemente en una forma de flujo libre, de baja viscosidad, la cual menos probablemente se aglomerara o dañara de alguna otra manera cualquier sistema de eliminación implementado para tal separación. En la práctica, tales requerimientos pueden depender de diversos factores tales como el tipo de combustible carbonáceo sólido (por ejemplo, carbón) empleado y las características particulares del residuo formado en el proceso de combustión. Esto es, la temperatura de combustión dentro de la cámara 222 de combustión puede ser tal que cualquier elemento incombustible en el combustible carbonáceo es licuado dentro del producto de combustión.

En aspectos particulares, el miembro 2332 de transpiración interno poroso es configurado así para dirigir el fluido de transpiración y hacia dentro de la cámara 222 de combustión en un forma radialmente hacia adentro de manera que se forme una pared de barrera fluida o una capa amortiguadora 231 alrededor de la superficie de miembro 2332 de

transpiración interno definiendo que define la cámara 222 de combustión (véase, por ejemplo, la Figura 2). La superficie del miembro 2332 de transpiración interno también es calentada por el producto de combustión. De tal forma, el miembro 2332 de transpiración interno poroso puede ser configurado para tener una conductividad térmica adecuada tal que el fluido 210 de transpiración que pasa a través del miembro 2332 de transpiración interno es calentado, mientras que el miembro 2332 de transpiración interno poroso es enfriado simultáneamente, dando como resultado que la temperatura de la superficie del miembro 2332 de transpiración interno que define la cámara 222 de combustión sea, por ejemplo, alrededor de 1000 °C en la región de la temperatura de combustión más alta. La pared de barrera fluida o capa amortiguadora 231 formada por el fluido de transpiración, 210 en cooperación con el miembro 2332 de transpiración interno amortigua así la interacción entre el miembro 2332 de transpiración interno y los productos de combustión a alta temperatura y los residuos u otras partículas contaminantes y, de esa forma, amortigua el miembro 2332 de transpiración interno frente al contacto, fractura u otro daño.

Adicionalmente, el fluido 210 de transpiración puede ser introducido en la cámara 222 de combustión a través del miembro 2332 de transpiración interno de manera tal que regule una mezcla de salida del fluido 210 de transpiración y el producto de combustión alrededor de la porción 222B de salida de la cámara 222 de combustión a una temperatura deseada (por ejemplo, aproximadamente 500 °C hasta aproximadamente 2000 °C).

En realizaciones específicas, el aparato 220 de combustión puede ser así configurado como un aparato de combustión enfriado por transpiración, de alta eficiencia capaz de proporcionar una combustión relativamente completa de un combustible 254 a una temperatura de operación relativamente alta según se describe aquí. Tal aparato 220 de combustión puede, en algunos casos, implementar uno o más fluidos de enfriamiento, y/o uno o más fluidos 210 de transpiración. En asociación con el aparato 220 de combustión, pueden implementarse también componentes adicionales. Por ejemplo, puede proporcionarse una unidad de separación de aire para separar N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, y puede proporcionarse un dispositivo inyector de combustible para recibir O<sub>2</sub> de 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 combustible gaseoso, líquido, en fluido supercrítico o en partículas sólidas disperso en un fluido de CO<sub>2</sub> de alta densidad.

En otro aspecto, el aparato 220 de combustión enfriado por transpiración puede incluir un inyector de combustible para inyectar una corriente de combustible presurizada dentro de la cámara 222 de combustión del aparato 220 de combustión, en donde la corriente de combustible puede comprender un combustible 254 carbonáceo procesado, un medio 255 fluidizante (el cual puede comprender el fluido 236 circulante, según se discute aquí), y oxígeno 242. El oxígeno 242 (enriquecido y el fluido 236 circulante de CO<sub>2</sub> pueden ser combinados en forma de una mezcla supercrítica homogénea. La cantidad de oxígeno presente puede ser suficiente para someter a combustión el combustible producir productos de combustión que tienen una composición deseada. El aparato 220 de combustión también puede incluir una cámara 222 de combustión, configurada como un volumen de combustión a alta temperatura, alta presión, para recibir la corriente de combustible, así como un fluido 210 de transpiración que entra al volumen de combustión a través de las paredes de un miembro 230 de transpiración poroso que define la cámara 222 de combustión. La rata de alimentación del fluido 210 de transpiración puede ser utilizada para controlar la temperatura de la porción de salida/porción de entrada de la turbina del aparato de combustión hasta un valor deseado y/o enfriar el miembro 230 de transpiración hasta una temperatura compatible con el material que forma el miembro 230 de transpiración. El fluido 210 de transpiración dirigido a través del miembro 230 de transpiración proporciona una capa fluida/amortiguadora en la superficie del miembro 230 de transpiración que define la cámara 220 de combustión, en donde la capa fluida/amortiguadora puede evitar que partículas de residuos de ceniza o líquidas resultante de cierta combustión de combustible interactúen con las paredes expuestas del miembro 230 de transpiración.

La cámara 222 de combustión puede ser configurada adicionalmente de tal manera que la corriente de combustible (y el fluido 236 circulante) puedan ser inyectados o de alguna otra manera introducidos en la cámara 222 de combustión a una presión mayor que la presión a la cual ocurre la combustión. El aparato 220 de combustión puede incluir un miembro 2338 de contención de la presión que al menos circunda parcialmente el miembro 230 de transpiración que define la cámara 230 de combustión, en donde un miembro 2339 de aislamiento puede estar dispuesto entre el miembro 2338 de contención de la presión y el miembro 230 de transpiración. En algunos casos, un dispositivo 2350 de eliminación de calor, tal como un sistema de enfriamiento de agua encamisada que define camisas 2337 de circulación de agua, puede ser acoplado con el miembro 2338 de contención de la presión (esto es, externamente al miembro 2338 de contención de la presión que forma la "coraza" del aparato 220 de combustión). El fluido 210 de transpiración implementado en conexión con el miembro 230 de transpiración del aparato 220 de combustión 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 230 de transpiración puede comprender, por ejemplo, un metal poroso, una cerámica, una matriz compuesta, un colector en capas, cualquier otra estructura adecuada, o combinaciones de los mismos. En algunos aspectos, la combustión dentro de la cámara 222 de combustión puede producir una corriente de producto de combustión a alta temperatura, alta presión, la cual puede ser subsecuentemente dirigida a un aparato productor de potencia, tal como una turbina, para expansión en relación con la misma, y que se describe más completamente aquí.

Las presiones relativamente altas incrementadas por las realizaciones de un aparato de combustión según se divulga aquí, pueden funcionar para concentrar la energía producida por el mismo hasta una intensidad relativamente alta en un volumen mínimo, esencialmente dando como resultado una densidad de energía relativamente alta. La densidad de energía relativamente alta permite que procesamiento corriente debajo de esta

energía sea llevado a cabo de una manera más eficiente que a presiones más bajas, así proporciona un factor de viabilidad para la tecnología. Aspectos de la presente divulgación pueden proporcionar así una densidad de energía en órdenes de magnitud superiores a las plantas de potencia existentes (esto es, de 10-100 veces). La densidad de energía más alta incrementa la eficiencia del proceso, pero también reduce el coste del equipamiento necesario para implementar la transformación de energía desde energía térmica a electricidad, reduciendo el tamaño y la masa del equipo, y así el coste del equipamiento.

Como se discute de otra manera aquí, el aparato de combustión utilizado en los métodos de la invención puede ser útil para combustión de una variedad de diferentes fuentes de combustible que contienen carbono. En realizaciones específicas, el combustible que carbono puede ser sometido a combustión completamente de manera tal que no se incluyan materiales líquidos o sólidos incombustibles en la corriente de producto de combustión. En algunas realizaciones, sin embargo, un combustible que contiene carbono sólido (por ejemplo carbón) que puede ser utilizado en la invención puede dar como resultado la presencia de materiales incombustibles. En realizaciones específicas, el aparato de combustión puede incluir la capacidad de alcanzar una temperatura de combustión que haga que los elementos incombustibles en el combustible que contiene carbono sean licuados durante el proceso de combustión. En tales casos, pueden ser aplicadas las provisiones para eliminar los elementos incombustibles licuados. La eliminación puede ser lograda, por ejemplo, utilizando separadores ciclónicos, separadores por impacto, o lechos de filtros granulares refractarios graduados dispuestos en configuración anular, o combinaciones de los mismos. En realizaciones particulares, las gotitas pueden ser removidas de la corriente de fluido circulante a alta temperatura mediante una serie de separadores ciclónicos tales como, por ejemplo, un aparato 2340 separador como se muestra en la Figura 4. En general, aspectos de tal separador ciclónico implementado por la presente divulgación pueden comprender una pluralidad de dispositivos 100 separadores centrífugos dispuestos en serie, incluyendo un dispositivo 100A separador centrífugo de entrada configurado para recibir el producto de combustión/corriente de fluido de salida y los elementos incombustible licuados asociados con los mismos, y un dispositivo 100B separador centrífugo de salida configurado para expulsar el producto de combustión/corriente de fluido de salida que tiene los elementos incombustibles licuados sustancialmente removidos del mismo. Cada dispositivo 100 separador centrífugo incluye una pluralidad de elementos separadores centrífugos o ciclones 1 dispuestos operativamente en paralelo alrededor de una tubería 2 colectora central, en donde cada elemento de separación centrífugo, o ciclón 1, configurado para eliminar al menos una porción de los elementos incombustibles licuados del producto de combustión/corriente de fluido de salida, y para dirigir la porción removida de los elementos incombustibles licuados a un cárter 20. Tal aparato 2340 separador puede ser configurado para operar a una presión elevada, y como tal puede comprender adicionalmente una carcasa 125 que contiene presión configurada para alojar los dispositivos del separar centrífugo y el cárter, De acuerdo con tales aspectos, el alojamiento 125 que contiene presión puede ser una extensión del miembro 2338 de contención de presión que también rodea el aparato 220 de combustión, o el alojamiento 125 que contiene la presión puede ser un miembro separado capaz de acoplarse el miembro 2338 de contención de presión asociado con el aparato 220 de combustión. En cualquier caso, debido a la elevada temperatura experimentada por el aparato 2340 separador 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 circulante dentro de sí (no mostrado), acoplado operativamente con el mismo para eliminar el calor del mismo. En algunos aspectos, un dispositivo de recuperación de calor (no mostrado) puede ser acoplado operativamente con la camisa de transferencia de calor, en donde el dispositivo de recuperación de calor puede ser configurado para recibir el líquido que circula en la camisa de transferencia de calor y recuperar la energía térmica de ese líquido.

En realizaciones particulares, el aparato 2340 separador (eliminación de residuos), mostrado en la Figura 4 puede ser configurado para estar dispuesto en serie con el aparato 220 de combustión alrededor de la porción 222B de salida del mismo para recibir la corriente de fluido/productos de combustión de salida del mismo. La corriente de fluido de salida enfriada por transpiración del aparato 220 de combustión, con el residuo líquido con la gotitas de residuo (elementos incombustible) en el mismo, pueden ser dirigidos para entrar a una provisión 2A de colector central del dispositivo 100A separador centrífugo de entrada a través de reductor 10 cónico. En un aspecto, el aparato 2340 separado puede incluir tres dispositivos 100A, 100B, 100C separadores centrífugos (aunque una persona experimentada en la técnica apreciara que tal aparato separador puede 1, 2, 3 o más dispositivos separadores centrífugos, según sea necesario o deseado). En este caso, los tres dispositivos 100A, 100B, 100C separadores centrífugos dispuestos operativamente en serie proporcionan una unidad de separación ciclónica de tres etapas. Cada dispositivo separador centrífugo incluye, por ejemplo, una pluralidad de elementos separadores centrífugos (ciclones 1) dispuestos alrededor de la circunferencia de la tubería 2 colectora central correspondiente. Las provisiones 2A colectoras centrales y las tuberías 2 colectoras centrales del dispositivo 100A separador centrífugo de entrada, y el dispositivo 100C separador centrífugo están sellados cada uno en el extremo de salida de los mismos. En esto casos, la corriente de fluido de salida es dirigida hacia canales 11 de ramificación correspondientes a cada uno de los elementos separadores centrífugos (ciclones 1) del dispositivo 100 separador centrífugo respectivo. Los canales 11 de ramificación están configurados para acoplarse con el extremo de entrada del respectivo ciclón 1 para formar una entrada tangencial para el mismo (lo cual produce, por ejemplo, que la corriente fluida de salida que entra al ciclón 1 interactúe con la pared del ciclón 1 en un flujo espiral). El canal 3 de salida de cada ciclón 1 es dirigido entonces hacia la porción de entrada de la tubería 2 colectora central del dispositivo 100 separador centrífugo respectivo. En el dispositivo 100B separador centrífugo de salida, la corriente de fluido de salida (que tiene los elementos incombustibles sustancialmente separados del mismo) es dirigida desde

la tubería colectora central del dispositivo 100B separador centrífugo de salida y a través de una tubería 12 colectora y una boquilla 5 de salida, de tal manera que la corriente de fluido de salida "limpia" puede ser dirigida entonces a un proceso subsecuente, tal como el asociado con los aparatos de transformación. La disposición de separación ciclónica de tres etapas de ejemplo permite la eliminación de residuos hasta, por ejemplo, por debajo de 5 ppm en peso en la corriente fluida de salida.

En cada etapa del aparato 2340 separador, el residuo líquido separado es dirigido desde cada uno de los ciclones 1 a través de tubos 4 de salida que se extienden hacia un cárter 20. El residuo líquido separado es dirigido entonces hacia una boquilla de salida o tubería 14 que se extiende desde el cárter y la carcasa 125 que contiene presión para eliminación y/o recuperación de los componentes del mismo. Al lograr la eliminación de los residuos, el residuo líquido puede ser dirigido a través de una sección 6 enfriada por agua o de alguna otra manera a través de una sección que tiene una alta presión, conexión de agua fría, en donde la interacción con el agua hace que el residuo líquido se solidifique y/o granule. La mezcla de residuos solidificados y agua puede ser separado en un recipiente 7 (provisión de recolección) en una mezcla fluida residuo/agua en la cual puede ser removida, particularmente después de la reducción de presión, a través de una válvula 9 adecuada, mientras que cualquier gas residual puede ser removido a través de una línea 8 separada. Un par de recipientes con sistemas asociados que operan en secuencia pueden permitir la operación continua del sistema en algunas realizaciones.

Puesto que el aparato 2340 separador puede ser implementado en conjunción con la corriente del producto de combustión a temperatura relativamente alta (esto es, a una temperatura suficiente para mantener los elementos incombustibles en forma líquida con una viscosidad relativamente baja), puede ser deseable, en algunos casos, que las superficies del aparato 2340 separador expuestas a una corriente del producto de combustión/fluido de salida y los elementos incombustibles licuados asociados con la misma estén compuestos de un material configurado para tener al menos una de una resistencia a alta temperatura, resistencia a alta corrosión y una conductividad térmica baja. Ejemplos de tales materiales pueden incluir óxido de circonio y óxido de aluminio, aunque tales ejemplos no pretenden ser limitantes de manera alguna. Como tal, en ciertos aspectos, el aparato 2340 separador puede ser configurado para eliminar sustancialmente los elementos incombustibles licuados de la corriente de producto de combustión/fluido de salida y mantener los elementos incombustibles en una forma líquida de baja viscosidad al menos hasta la eliminación de los mismos del cárter 20. Desde luego, en realizaciones donde se usa un combustible no sólido y no hay incluidos materiales incombustibles en la corriente del producto de combustión, la adición del separador de residuos puede ser innecesaria.

En algunas realizaciones, el aparato 2340 separador puede ser utilizado para separar residuos de cenizas sólidas en partículas de la combustión de cualquier combustible que produce residuos sólidos incombustibles, tal como carbón. Por ejemplo, el carbón puede ser triturado hasta un tamaño deseado (por ejemplo, un tamaño tal como menos de 1% en peso del carbón en partículas o pulverizado comprende partículas mayores de 100  $\mu\text{m}$  en tamaño) y suspendido con  $\text{CO}_2$  líquido. En realizaciones específicas, el  $\text{CO}_2$  líquido podría estar a una temperatura de aproximadamente  $-40^\circ\text{C}$  hasta aproximadamente  $-18^\circ\text{C}$ . El lodo puede comprender aproximadamente 40% hasta aproximadamente 60% en peso de carbón. El lodo puede ser presurizado entonces hasta la presión de combustión requerida. Con referencia a la Figura 1, la corriente 236 recirculada puede ser dividida en relación con el modo de entrada a la cámara 220 de combustión. Una primera porción (corriente 236a) puede ser introducida a la cámara 220 de combustión a través del dispositivo 250 de mezcla, y una segunda porción (corriente 236b) podría ser introducida a la cámara 220 de combustión pasándola a través de la capa 230 de enfriamiento por transpiración. Como se describió anteriormente es posible operar el quemador 220 con una relación de  $\text{O}_2$  a combustible que da como resultado la formación de una mezcla gaseosa reductora (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 a la cámara de combustión a través de la capa 230 de enfriamiento por transpiración puede ser utilizada para enfriar la mezcla de los gases de combustión y el fluido circulante de  $\text{CO}_2$  hasta una temperatura sustancialmente por debajo de la temperatura de solidificación de las cenizas (por ejemplo, en el rango de aproximadamente  $500^\circ\text{C}$  hasta aproximadamente  $900^\circ\text{C}$ ). La corriente 5 de gas total del aparato 2340 separador puede ser pasada a través de una unidad de filtración, la cual reduce el nivel de partículas de cenizas sólidas residuales hasta un valor muy bajo (por ejemplo, por debajo de aproximadamente  $2\text{ mg/m}^3$  de gas que pasa a través del filtro). Este gas limpio puede ser entonces sometido a combustión en una segunda cámara de combustión en donde puede ser diluido con una porción adicional de la corriente 236 de fluido recirculado. En tales realizaciones, la corriente 236 de fluido recirculado puede ser repartida entre los dos cámaras de combustión, según sea necesario.

Cualquier material que contenga carbono puede ser utilizado como combustible de acuerdo con la presente invención. En particular, debido a las altas presiones y altas temperaturas mantenidas por el aparato de combustión alimentado con oxígeno usado en los métodos y sistemas de la invención, los combustibles útiles incluyen, pero no se limitan a, diversos grados y equipos de carbón, petróleo, aceite combustible, gas natural, gas combustible de carbón, alquitrán de arenas alquitranadas, bitumen, biomasa, algas, desechos residuales de sólidos combustibles grado A2, material carbonáceo, etanol, biocombustibles sólidos y líquidos. Esto puede ser considerado como una separación importante de los sistemas y métodos de la técnica anterior. Por ejemplo, sistemas conocidos en el arte para la combustión de combustibles sólidos, tales como carbón, requieren considerablemente diseños diferentes que los sistemas de combustibles no sólidos, como el gas natural.

Los combustibles pueden ser procesados de manera adecuada para permitir una inyección en el aparato de combustión a ratas y a presiones suficientes por encima de la presión dentro de la cámara de combustión. Tales

combustibles pueden estar en forma líquida, de suspensión, gel o pasta con fluidez y viscosidad apropiadas a temperaturas ambiente o a temperaturas elevadas. Por ejemplo, el combustible puede ser provisto a una temperatura de aproximadamente 30 °C hasta aproximadamente 500 °C, aproximadamente 40 °C hasta aproximadamente 450 °C, aproximadamente 50 °C hasta aproximadamente 425 °C, o aproximadamente 75 °C hasta aproximadamente 400 °C. Cualquier material combustible sólido puede ser triturado o desecho de alguna otra manera procesado para reducir los tamaños de partículas, según sea apropiado. Puede agregarse un medio de fluidización o de suspensión, según sea necesario, para alcanzar una forma adecuada y para satisfacer los requerimientos de flujo para un bombeo a alta presión. Desde luego, un medio de fluidización puede no ser necesario dependiendo de la forma del combustible (esto es, líquido o gaseoso). De la misma manera, el fluido circulante que circula puede ser utilizado como medio de fluidización, en algunas realizaciones.

Fluidos de transpiración adecuados en una cámara de combustión útiles de acuerdo con la invención pueden incluir cualquier fluido capaz de fluir en cantidad y presión suficiente a través del recubrimiento interno para formar la pared de vapor. En la presente realización, el CO<sub>2</sub> puede ser un fluido de transpiración ideal en cuanto la pared de vapor formada tiene buenas propiedades de aislamiento técnico así como propiedades de absorción de luz visible UV. El CO<sub>2</sub> puede ser utilizado como un fluido supercrítico. Otros ejemplos de fluidos de transpiración incluyen H<sub>2</sub>O, gases producidos por la combustión enfriados recirculados corriente abajo, oxígeno, hidrógeno, gas natural, metano, u otros hidrocarburos livianos. Los combustibles pueden ser utilizados especialmente como fluidos de transpiración durante el arranque de la cámara de combustión para alcanzar temperaturas y presiones de operación adecuadas en la cámara de combustión antes de la inyección de la principal fuente de combustible. Los combustibles pueden ser usados también como fluidos de transpiración para ajustar la temperatura y presión de operación de la cámara de combustión durante la conmutación entre fuentes de combustible principales, tales como la conmutación de carbón a biomasa como combustible primario. En algunas realizaciones, pueden utilizarse dos o más fluidos de transpiración. Adicionalmente, pueden utilizarse deferentes fluidos de transpiración en diferentes posiciones a lo largo de la cámara de combustión. Por ejemplo, un primer fluido de transpiración puede ser utilizado en una zona de intercambio de calor a alta temperatura y un segundo fluido de transpiración puede ser utilizado en una zona de intercambio de calor a temperatura más baja. El fluido de transpiración puede ser utilizado 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> recirculado precalentado.

En un aspecto, la presente invención proporciona métodos para generación de potencia. Específicamente, los métodos hacen uso de un fluido circulante de CO<sub>2</sub> que es recirculado preferiblemente a través del método, según se describe aquí. Los métodos de la invención también hacen uso de cámaras de combustión de alta eficiencia tales como una cámara de combustión enfriada por transpiración, tal como se describió más arriba. En ciertas realizaciones, los métodos en general pueden ser descritos en relación con el diagrama de flujo mostrado en la Figura 5. Como se ve allí, se proporciona una cámara 220 de combustión y se proporcionan en el mismo diversas entradas. Un combustible 254 que contiene carbono y O<sub>2</sub> 242 (según sea necesario) pueden ser introducidos en la cámara 220 de combustión junto con un fluido 236 circulante (CO<sub>2</sub> en la presente realización). Una disposición 250 de mezcla ilustrada por una línea punteada indica que este componente está presente opcionalmente. Específicamente, puede combinarse cualquier combinación de dos o tres materiales (combustible, O<sub>2</sub> y fluido circulante de CO<sub>2</sub>) en la disposición 250 de mezcla antes de la introducción en la cámara 220 de combustión.

En diversas realizaciones, puede ser deseable que los materiales que entran a la cámara de combustión exhiban características físicas específicas que puedan facilitar una operación deseable eficiente del método de generación de potencia. Por ejemplo, en ciertas realizaciones, puede ser deseable que el CO<sub>2</sub> en el fluido circulante 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 realizaciones adicionales, 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, al menos aproximadamente 25 MPa. En otras realizaciones, la presión puede ser aproximadamente 8 MPa hasta aproximadamente 50 MPa, aproximadamente 12 MPa hasta aproximadamente 50 MPa, aproximadamente 15 MPa hasta aproximadamente 50 MPa, aproximadamente 20 MPa hasta aproximadamente 50 MPa, aproximadamente 22 MPa hasta aproximadamente 50 MPa, aproximadamente 22 MPa hasta aproximadamente 45 MPa, aproximadamente 22 MPa hasta aproximadamente 40 MPa, aproximadamente 25 MPa hasta aproximadamente 40 MPa, aproximadamente 25 MPa hasta aproximadamente 40 MPa, aproximadamente 25 MPa hasta aproximadamente 35 MPa. Adicionalmente, puede ser beneficioso que el CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión tenga una temperatura de al menos 200 °C. En realizaciones adicionales, el CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión puede 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, al menos aproximadamente 900 °C.

En algunas realizaciones, puede ser deseable que el combustible introducido en la cámara de combustión sea provisto bajo condiciones específicas. Por ejemplo, en ciertas realizaciones, 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 realizaciones, el combustible que contiene carbono puede ser introducido en la cámara de combustión bajo condiciones que sean idénticas sustancialmente similares a las condiciones de fluido circulante de CO<sub>2</sub>. La expresión "condiciones sustancialmente similares" puede significar un parámetro de condiciones que está dentro de un 5%, dentro de un 4%, dentro de un 3%, dentro de un 2% o dentro de un 1% del parámetro de condición referenciado descrito aquí (por ejemplo, el parámetro de condición para el fluido circulante de CO<sub>2</sub>). En ciertas realizaciones, el combustible que contiene carbono puede ser mezclado con el fluido circulante de CO<sub>2</sub> antes de la introducción en la cámara de combustión. En tales realizaciones, se esperaría que el combustible que contiene carbono y el fluido circulante de CO<sub>2</sub> estén bajo condiciones idénticas o sustancialmente similares (las cuales específicamente pueden abarcar las condiciones descritas en relación con el fluido circulante de CO<sub>2</sub>). En otras realizaciones, el combustible que contiene carbono puede ser introducido a la cámara de combustión separadamente del fluido circulante de CO<sub>2</sub>. En tales casos, el combustible que contiene carbono puede ser introducido todavía a una presión tal como se describe en relación con el fluido circulante de CO<sub>2</sub>. En algunas realizaciones, puede ser útil mantener el combustible que contiene carbono a una temperatura que es diferente de la temperatura del fluido circulante de CO<sub>2</sub> antes de la introducción a la cámara de combustión. Por ejemplo, el combustible que contiene carbono podría ser introducido a la cámara de combustión a una temperatura de aproximadamente 30 °C a aproximadamente 800 °C, aproximadamente 35 °C a aproximadamente 700 °C, aproximadamente 40 °C a aproximadamente 600 °C, aproximadamente 45 °C a aproximadamente 500 °C, aproximadamente 50 °C a aproximadamente 400 °C, aproximadamente 55 °C a aproximadamente 300 °C, aproximadamente 60 °C a aproximadamente 200 °C, aproximadamente 65 °C a aproximadamente 175 °C, o aproximadamente 70 °C a aproximadamente 150 °C.

En otras realizaciones, puede ser deseable que el O<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión sea provisto bajo condiciones específicas. Tales condiciones pueden ser incidentes en el método de proporcionar el O<sub>2</sub>. Por ejemplo, puede ser deseable proporcionar los dos a una presión específica. Específicamente, puede ser beneficioso para el O<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión tener una presión de al menos aproximadamente 8 MPa. En realizaciones adicionales, 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, al menos aproximadamente 50 MPa. La provisión del O<sub>2</sub> puede abarcar 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 ambiente. Separadamente o en combinación con el mismo, la provisión del O<sub>2</sub> puede incluir la presurización del O<sub>2</sub> para alcanzar la presión deseada, tal como se describió más arriba. Tal acción puede producir el calentamiento del O<sub>2</sub>. En algunas realizaciones, puede ser deseable que el O<sub>2</sub> este a una temperatura deseada que es diferente de la temperatura alcanzada inherentemente por la presurización del gas. Por ejemplo, puede ser deseable que el O<sub>2</sub> sea provisto a la cámara de combustión a una temperatura de 30 °C hasta aproximadamente 900 °C, aproximadamente 35 °C hasta aproximadamente 800 °C, aproximadamente 40 °C hasta aproximadamente 700 °C, aproximadamente 45 °C hasta aproximadamente 600 °C, aproximadamente 50 °C hasta aproximadamente 500 °C, aproximadamente 55 °C hasta aproximadamente 400 °C, aproximadamente 60 °C hasta aproximadamente 300 °C, aproximadamente 65 °C hasta aproximadamente 250 °C, o aproximadamente 70 °C hasta aproximadamente 200 °C. Además, en algunas realizaciones, el O<sub>2</sub> puede ser introducido en la cámara de combustión bajo condiciones que son idénticas o sustancialmente similares a las condiciones del fluido circulante de CO<sub>2</sub> y/o del combustible que contiene carbono. Esto puede surgir de la mezcla de diversos componentes antes de la introducción en la cámara de combustión o puede surgir de métodos específicos de preparación del O<sub>2</sub> para introducción en la cámara de combustión. En realizaciones particulares, el O<sub>2</sub> puede ser combinado con una cantidad de CO<sub>2</sub> en una proporción molar definida de tal manera que el O<sub>2</sub> puede ser provisto en la misma temperatura que la corriente fluida circulante de CO<sub>2</sub>. Por ejemplo, la combinación podría ser llevada a cabo a una temperatura por debajo de 100 °C mientras que el CO<sub>2</sub> está a una presión crítica. Esto elimina el riesgo de la combustión asociado con el calentamiento del O<sub>2</sub> puro solo debido al efecto diluyente del CO<sub>2</sub>. Tal mezcla podría estar a una relación de CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> de aproximadamente 1:2 hasta aproximadamente 5:1, aproximadamente 1:1 hasta aproximadamente 4:1, o aproximadamente 1:1 hasta aproximadamente 3:1.

En algunas realizaciones, puede ser útil que el O<sub>2</sub> suministrado a la cámara de combustión este sustancialmente purificado (esto es, mejorado en términos de contenido molar de O<sub>2</sub> en relación con otros componentes presentes de manera natural en el aire). En ciertas realizaciones, el O<sub>2</sub> puede tener una pureza de más de aproximadamente 50% molar, más de aproximadamente 60% molar, más de aproximadamente 70% molar, más de aproximadamente 80% molar, más de aproximadamente 85% molar, más de aproximadamente 90% molar, más de aproximadamente 95% molar, más de aproximadamente 96% molar, más de aproximadamente 97% molar, más de aproximadamente 98% molar, más de aproximadamente 99% molar, más de aproximadamente 99.5% molar. En otras realizaciones, el O<sub>2</sub> puede tener una pureza molar de aproximadamente 85% a aproximadamente 99.6% molar, aproximadamente 85% a aproximadamente 99% molar, aproximadamente 90% a aproximadamente 99% molar, aproximadamente 90% a aproximadamente 98% molar, aproximadamente 90% a aproximadamente 97% molar. La recuperación global de

CO<sub>2</sub> del carbono en el combustible favorece el uso de purezas mayores en el rango de al menos aproximadamente 99.5% molar.

5 El fluido circulante de CO<sub>2</sub> puede ser introducido en la cámara de combustión en la entrada de la cámara de  
 combustión junto con el O<sub>2</sub> y el combustible que contiene carbono. Como se describió más arriba en relación con  
 una cámara de combustión enfriada por transpiración, sin embargo, el fluido circulante de CO<sub>2</sub> también puede ser  
 introducido a la cámara de combustión enfriada por transpiración como todo o parte del fluido de enfriamiento de  
 transpiración dirigido hacia el miembro de transpiración a través de uno o más pasos de suministro de fluido de  
 transpiración formados en la cámara de combustión enfriada por transpiración. En algunas realizaciones de acuerdo  
 10 con la invención, el fluido circulante de CO<sub>2</sub> puede ser introducido en la cámara de combustión a la entrada de la  
 cámara de combustión (esto es, junto con el O<sub>2</sub> y el combustible), y el fluido circulante de CO<sub>2</sub> también puede ser  
 introducido en la cámara de combustión a través del miembro de transpiración como todo o parte del fluido de  
 enfriamiento por transpiración. En otras realizaciones, el fluido circulante de CO<sub>2</sub> puede ser introducido en la cámara  
 15 de combustión solamente a través del miembro de transpiración como todo o parte del fluido de enfriamiento por  
 transpiración (esto es, sin introducción de CO<sub>2</sub> en la entrada de de la cámara de combustión con el O<sub>2</sub> y el  
 combustible).

En algunas realizaciones, la invención puede ser caracterizada en relación con la relación entre los diversos  
 componentes introducidos en la cámara de combustión. Con el fin de alcanzar una eficiencia máxima de combustión  
 puede ser útil someter a combustión el combustible que contiene carbono a una alta temperatura. La temperatura de  
 20 combustión y la temperatura de la corriente del producto de combustión que sale de la cámara de combustión, sin  
 embargo, pueden necesitar ser controladas dentro de parámetros definidos. Con este fin, puede ser útil proporcionar  
 el fluido circulante de CO<sub>2</sub> en una relación específica al combustible de tal manera que la temperatura de combustión  
 y/o la temperatura de entrada a la turbina puedan ser controladas dentro del rango deseado mientras que también  
 se maximiza la cantidad de energía que puede ser convertida en potencia. En realizaciones específicas, esto puede  
 25 lograrse ajustando la relación de la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> al carbono en el combustible. La relación  
 deseada puede ser influenciada por la temperatura de entrada a la turbina deseada así como la diferencia de  
 temperatura entre las corrientes de entrada y salida en el extremo caliente del intercambiador de calor, como se  
 describe en más detalle aquí. La relación puede ser descrita específicamente como la relación molar del CO<sub>2</sub> en el  
 fluido circulante de CO<sub>2</sub> con respecto al carbono presente en el combustible que contiene carbono. Para determinar  
 30 la cantidad molar de CO<sub>2</sub> introducida en la cámara de combustión, en algunas realizaciones, el contenido completo  
 de CO<sub>2</sub> provisto a la cámara de combustión (esto es, introducido en la entrada con el combustible y el O<sub>2</sub>, así como  
 cualquier CO<sub>2</sub> usado como fluido de enfriamiento por transpiración) está incluida en el cálculo. En realizaciones  
 específicas, sin embargo, el cálculo puede estar basado solamente en la cantidad molar de CO<sub>2</sub> introducida en la  
 35 entrada de la cámara de combustión (esto es, excluyendo cualquier CO<sub>2</sub> utilizado como fluido de enfriamiento por  
 transpiración). En realizaciones en donde el CO<sub>2</sub> es introducido en la cámara de combustión solamente como un  
 fluido de enfriamiento por transpiración, el cálculo se basa en el contenido de CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de  
 combustión como fluido de enfriamiento por transpiración. Así, la relación puede ser descrita como el contenido  
 molar de CO<sub>2</sub> introducido en la entrada de la cámara de combustión en relación con el carbono en el combustible  
 40 introducido a la cámara de combustión. Alternativamente, la relación puede ser descrita como el contenido molar de  
 CO<sub>2</sub> introducido a la cámara de combustión a través del fluido de enfriamiento por transpiración en relación con el  
 carbono en el combustible introducido a la cámara de combustión.

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

La relación molar del CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión con respecto al carbono presente en el  
 combustible que contiene carbono puede tener un impacto importante sobre la eficiencia térmica global del sistema.  
 Este impacto sobre la eficiencia también puede ser impactado por el diseño y funcionamiento de los componentes  
 adicionales del sistema, incluyendo el intercambiador de calor, el separador de agua, y la unidad de presurización.  
 60 La combinación de los diversos elementos del sistema y método descrito aquí lleva a la capacidad de lograr una  
 eficiencia térmica alta en las relaciones CO<sub>2</sub>/C específicas descritas aquí. Sistemas y métodos previamente

conocidos que no incluyen los diversos elementos descritos aquí requerirían típicamente una relación molar  $\text{CO}_2/\text{C}$  que es significativamente inferior a la utilizada en la presente invención para alcanzar eficiencias que se aproximen a las alcanzadas aquí. La presente invención, sin embargo, ha identificado sistemas y métodos altamente efectivos para recircular  $\text{CO}_2$  que permiten el uso de relaciones molares  $\text{CO}_2/\text{C}$  que exceden grandemente las que pueden ser utilizadas en la técnica conocida. El uso de altas relaciones molares  $\text{CO}_2/\text{C}$  de acuerdo con la presente invención es ventajoso adicionalmente para diluir impurezas en la corriente de combustión. Los efectos corrosivos o erosionantes de las impurezas (por ejemplo, cloruros y sulfuro) sobre los componentes del sistema son disminuidos entonces grandemente. Actualmente no pueden utilizarse carbones con alto contenido de cloruro y/o azufre en sistemas conocidos porque los productos de combustión de tales carbones (los cuales incluyen  $\text{HCl}$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) son demasiado corrosivos y erosionantes para que los resistan los componentes de las plantas de potencia. Muchas otras impurezas (por ejemplo, partículas de ceniza sólidas y materiales volátiles que contienen elementos tales como el plomo, yodo, antimonio y mercurio) también pueden causar daños internos severos a los componentes de las planta de potencia a temperaturas altas. El efecto diluyente del  $\text{CO}_2$  recirculado puede mejorar o eliminar grandemente los efectos nocivos de tales impurezas sobre los componentes de las plantas de potencia. La selección de las relaciones molares  $\text{CO}_2/\text{C}$ , pueden entonces involucrar una consideración compleja de los efectos sobre la eficiencia y erosión y corrosión de los componentes de la planta y del diseño de los componentes del sistema de reciclaje de  $\text{CO}_2$  y su funcionamiento. La presente invención posibilita el reciclaje altamente eficiente de  $\text{CO}_2$  y así las relaciones molares incrementadas de  $\text{CO}_2/\text{C}$  con una alta eficiencia térmica que no podrían ser predichos por la técnica conocida. Las relaciones molares altas de  $\text{CO}_2/\text{C}$  conllevan al menos las ventajas antes mencionadas.

De la misma manera, puede ser útil controlar el contenido de  $\text{O}_2$  introducido en la cámara de combustión. Esto puede depender particularmente de la naturaleza de la operación de la cámara de combustión. Como se describe más completamente aquí, los métodos y sistemas de la invención pueden permitir la operación en un modo completamente de oxidación, un modo completamente de reducción, o variaciones de ambos. En un modo completamente de oxidación, la cantidad de  $\text{O}_2$  provista a la cámara de combustión sería preferiblemente al menos una cantidad estequiométrica necesaria para alcanzar una oxidación completa del combustible que contiene carbono. En ciertas realizaciones, la cantidad de  $\text{O}_2$  provista estaría en exceso de la cantidad estequiométrica anotada en 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 realizaciones, la cantidad de  $\text{O}_2$  provista estaría en exceso de la cantidad estequiométrica anotada en aproximadamente 0.1% hasta aproximadamente 5% molar, aproximadamente 0.25% hasta aproximadamente 4% molar, o aproximadamente 0.5% hasta aproximadamente 3 % molar. En un modo completamente reductor, la cantidad de  $\text{O}_2$  provista a la cámara de combustión estaría preferiblemente en una cantidad estequiométrica necesaria para convertir el combustible que contiene carbono a los componentes  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{NH}_3$  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 realizaciones, la cantidad de  $\text{O}_2$  provista estaría en exceso de la cantidad estequiométrica anotada en aproximadamente 0.1% hasta aproximadamente 5% molar, aproximadamente 0.25% hasta aproximadamente 4% molar, o aproximadamente 0.5% hasta aproximadamente 3 % molar.

Los métodos de la invención, en algunas realizaciones, pueden ser caracterizados en relación con el estado físico del  $\text{CO}_2$  a lo largo de las diversas etapas en el proceso. El  $\text{CO}_2$  es reconocido como existente en diversos estados dependiendo de las condiciones físicas del material. El  $\text{CO}_2$  tiene un punto triple a 0.518 MPa y  $-56.6^\circ\text{C}$ , pero el  $\text{CO}_2$  también tiene una presión y temperatura supercríticas del 7.38 MPa y  $31.1^\circ\text{C}$ . Más allá de este punto crítico, el  $\text{CO}_2$  existe como un fluido supercrítico, y la presente invención ha hecho realidad la capacidad de maximizar la eficiencia en la generación de potencia manteniendo el  $\text{CO}_2$  en un estado especificado en puntos específicos del ciclo. En realizaciones específicas, el  $\text{CO}_2$  introducido en la cámara de combustión está preferiblemente en la forma de un fluido supercrítico.

La eficiencia de un sistema o método generador de potencia se entiende típicamente para describir la relación de generación de energía por parte del sistema o método con respecto a la entrada de energía en el sistema o método. En el caso de un sistema o método para la producción de potencia, la eficiencia se describe frecuentemente como la relación de electricidad o potencia (por ejemplo, en megavatios o Mw) generada a la red de consumo con respecto al valor de calentamiento inferior total de energía térmica del combustible sometido a combustión para generar electricidad (o potencia). Esta relación puede entonces denominarse como la eficiencia neta del sistema o método (sobre una base de LHV). Esta eficiencia puede tener en cuenta toda la energía requerida para los procesos internos del sistema o métodos, incluyendo la producción de oxígeno purificado (por ejemplo, a través de una unidad de separación de aire), presurización de  $\text{CO}_2$  para transporte a una tubería presurizada, y otras condiciones del sistema o método que requieren ingreso de energía.

En diversas realizaciones, los sistemas y métodos de la presente invención pueden hacer uso de  $\text{CO}_2$  predominantemente como un fluido de trabajo en un ciclo en el cual el combustible que contiene carbono es sometido a combustión (esto es, en una cámara de combustión) en  $\text{O}_2$  sustancialmente puro a una presión en exceso de la presión crítica de  $\text{CO}_2$  para producir una corriente de producto de combustión. Esta corriente es

5 expandida a través de una turbina y luego es pasada a través de un intercambiador de calor recuperador. En el intercambiador de calor, el desfogue de la turbina precalienta un fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculado en un estado supercrítico. Este fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculado, precalentado, es introducido en la cámara de combustión en donde se mezcla con los productos de la combustión de combustible que contiene carbono para dar un flujo total a una temperatura de entrada a la turbina máxima definida. La invención puede proporcionar una excelente eficiencia al menos en parte debido al reconocimiento de los beneficios de minimizar la diferencia de temperatura en el extremo caliente del intercambiador de calor recuperador. Esta minimización puede lograrse utilizando una fuente de calor de nivel de temperatura bajo para proporcionar un CO<sub>2</sub> recirculado antes de la introducción a la cámara de combustión. A estos niveles de temperatura más bajos, el calor específico y la densidad del CO<sub>2</sub> supercrítico son muy altos, y este extracalentamiento puede permitir que el desfogue de la turbina fluya para precalentar el CO<sub>2</sub> a una temperatura mucho más alta, y esto puede reducir significativamente la diferencia de temperatura en el extremo caliente del intercambiador de calor recuperador. Fuentes de calor de temperatura baja útiles en realizaciones específicas son los compresores de aire utilizados en la planta de separación de aire criogénico operada adiabáticamente o en el flujo de desfogue caliente de una turbina de gas convencional. En realizaciones específicas de la presente invención, la diferencia de temperatura en el extremo caliente del intercambiador de calor recuperador es menor de aproximadamente 50°C, y preferiblemente en el rango de aproximadamente 10°C a aproximadamente 30°C. El uso de una relación de presión baja (por ejemplo, por debajo de aproximadamente 12) es un factor adicional que puede incrementar la eficiencia. El uso de CO<sub>2</sub> como fluido de trabajo acoplado con la relación de presión baja reduce la pérdida de energía en la elevación de presión del desfogue de turbina enfriado a la presión de reciclaje. Una ventaja adicional es la capacidad para producir la cantidad de carbono en el combustible convertida a CO<sub>2</sub> en el fluido a alta presión por encima de la presión supercrítica de CO<sub>2</sub> a presión de tubería (típicamente aproximadamente 10 MPa hasta aproximadamente 20 MPa) con muy poco consumo de potencia parásito adicional a cerca de 100% de captura de carbono del combustible. Tales parámetros del sistema y método son descritos aquí adicionalmente en mayor detalle.

25 Regresando a la Figura 5, el combustible 254 que contiene carbono introducido en la cámara 220 de combustión junto con el O<sub>2</sub> 242 y el fluido 236 circulante de CO<sub>2</sub> se somete a combustión para proporcionar una corriente 40 de producto de combustión. En realizaciones específicas, la cámara 220 de combustión es una cámara de combustión enfriada por transpiración, tal como se describió más arriba. La temperatura de combustión puede variar dependiendo de los parámetros específicos del proceso - por ejemplo, el tipo de combustible que contiene carbono usado, la relación molar de CO<sub>2</sub> con respecto a carbono en el combustible tal como es introducido en la cámara de combustión, y/o la relación molar de CO<sub>2</sub> a O<sub>2</sub> introducidos en la cámara de combustión. En realizaciones específicas, la temperatura de combustión es una temperatura como se describió más arriba en relación con la descripción de la cámara de combustión enfriada por transpiración. En realizaciones particularmente preferidas, las temperaturas de combustión en exceso de aproximadamente 1300°C, según como se describe aquí, pueden ser ventajosas.

También puede ser útil controlar la temperatura de combustión de tal manera que la corriente de producto de combustión que sale de la cámara de combustión tiene una temperatura deseada. Por ejemplo, puede ser útil para la corriente de producto de combustión que sale de la cámara de combustión tener 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 1050°C, al menos aproximadamente 1100°C, al menos aproximadamente 1200°C, al menos aproximadamente 1300°C, al menos aproximadamente 1400°C, al menos aproximadamente 1500°C, o al menos aproximadamente 1600°C. En algunas realizaciones, la corriente de producto de combustión puede tener una temperatura desde aproximadamente 700°C hasta aproximadamente 1600°C, aproximadamente 800°C hasta 1600°C, aproximadamente 850°C hasta 1500°C, aproximadamente 900°C hasta aproximadamente 1400°C, aproximadamente 950°C hasta aproximadamente 1350°C, o aproximadamente 1000°C hasta aproximadamente 1300°C.

Como se describió más arriba, la presión del CO<sub>2</sub> a lo largo del ciclo de producción de potencia puede ser un parámetro crítico para maximizar la eficiencia del ciclo de potencia. Mientras que puede ser importante que los materiales introducidos en la cámara de combustión tengan una presión definida específicamente, probablemente puede ser importante que la corriente del producto de combustión tenga una presión definida. Específicamente, la presión de la corriente del producto de combustión puede estar relacionada con la presión del fluido circulante de CO<sub>2</sub> que es introducido en la cámara de combustión. En realizaciones específicas la presión de la corriente del producto de combustión puede ser al menos aproximadamente 90% de la presión del CO<sub>2</sub> introducido en la cámara de combustión - esto es, en el fluido circulante. En realizaciones adicionales, la presión de la corriente de producto de combustión puede ser al menos aproximadamente de 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.

60 La constitución química de la corriente de producto de combustión que sale de la cámara de combustión puede variar dependiendo del tipo de combustible que contiene carbono usado. De manera importante, la corriente de producto de combustión comprenderá CO<sub>2</sub> que será recirculado y reintroducido en la cámara de combustión o en

ciclos adicionales, como se describe completamente más adelante. Además, el exceso de CO<sub>2</sub> (incluyendo el CO<sub>2</sub> producido por la combustión del combustible) puede ser extraído del fluido circulante de CO<sub>2</sub> (particularmente a una presión adecuada para la transferencia directa a una tubería de CO<sub>2</sub>) para retención u otro tipo de desecho que no incluye la liberación a la atmósfera. En realizaciones adicionales, la corriente de producto de 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, O<sub>2</sub> en exceso, N<sub>2</sub>, Ar, y posiblemente otros contaminantes que pueden estar presentes en el combustible que es sometido a combustión. Estos materiales presentes en la corriente de producto de combustión pueden persistir en la corriente del fluido circulante de CO<sub>2</sub> a menos que se remuevan, tal como por procesos descritos aquí. Tales materiales presentes además del CO<sub>2</sub> pueden ser denominados aquí como "componentes secundarios".

Como se ve en la Figura 5, la corriente 40 de producto de combustión puede ser dirigida a una turbina 320 en donde la corriente 40 de producto de combustión es expandida para generar potencia (por ejemplo, a través de un generador para producir electricidad, el cual no es mostrado en la ilustración). La turbina 320 puede tener una entrada para recibir la corriente 40 de producto de combustión y una salida para liberar la corriente 50 de descarga de turbina que comprende CO<sub>2</sub>. Aunque se muestra una turbina 320 individual en la Figura 5, se entiende que pueden utilizarse más de una turbina, estando conectadas las múltiples turbinas en serie o separadas opcionalmente por uno o más componentes adicionales, tales como componentes de combustión adicionales, un componente de compresión, un componente separador, o similares.

De nuevo, pueden controlarse cercanamente los parámetros del proceso en esta etapa para maximizar la eficiencia del ciclo. La eficiencia de las plantas de potencia de gas natural existentes es dependiente críticamente de las temperaturas de entrada a la turbina. Por ejemplo, se han hecho trabajos extensos a gran coste para alcanzar una tecnología de turbina que permite temperaturas de entrada tan altas como aproximadamente 1350°C. Cuanto mayor sea la temperatura de entrada a la turbina, mayor es la eficiencia de la planta, pero también más costosa es la turbina, y potencialmente, más corta su vida útil. Algunas instalaciones se resisten a pagar los precios más altos y tener el riesgo de vida más corta también. Aunque la presente invención puede hacer uso de tales turbinas para incrementar adicionalmente incluso la eficiencia en algunas realizaciones, tal cosa no se requiere. En realizaciones específicas, los sistemas y métodos presentes pueden alcanzar la eficiencia deseada durante utilizando una temperatura de turbina en un rango muy inferior, como se describe más arriba. Así, la invención puede estar caracterizada en términos de alcanzar una eficiencia específica, según se describe aquí, a la vez que proporciona una corriente de producto de combustión a una entrada de turbina a una temperatura definida, según se describe aquí, la cual puede ser significativamente menor que las temperaturas reconocidas en la técnica como necesarias para alcanzar la misma eficacia con el mismo combustible.

Como se anotó más arriba, la corriente 40 de producto de combustión que sale de la cámara 220 de combustión tiene preferiblemente una presión que está cercanamente alineada con la presión del fluido 236 circulante de CO<sub>2</sub> que entra a la cámara 220 de combustión. En realizaciones específicas, la corriente 40 de producto de combustión es así a una temperatura y presión tal que el CO<sub>2</sub> presente en la corriente está en un estado de fluido supercrítico. Cuando la corriente 40 de producto de combustión es expandida a través de la turbina 320, la presión de la corriente se reduce. Preferiblemente, esta caída de presión es controlada de tal manera que la presión de la corriente 40 de producto de combustión está en una relación definida con la presión de la corriente 50 de descarga de turbina. En ciertas realizaciones, la relación de la presión de la corriente de producto de combustión en la entrada de la turbina en comparación con la corriente de descarga de turbina a la salida de la turbina es menos de aproximadamente 12. Esta puede ser definida como la relación de la presión de entrada ( $I_p$ ); a la presión de salida ( $O_p$ ) (esto es,  $I_p/O_p$ ). En realizaciones adicionales, la relación de presión puede ser menor de aproximadamente 11, menor de aproximadamente 10, menor de aproximadamente 9, menor de aproximadamente 8, o menor de aproximadamente 7. En otras realizaciones, la relación de presión de entrada a presión de salida en una turbina puede ser aproximadamente 1.5 a aproximadamente 12, aproximadamente 2 a aproximadamente 12, aproximadamente 3 a aproximadamente 12, aproximadamente 4 a aproximadamente 12, aproximadamente 2 a aproximadamente 11, aproximadamente 2 a aproximadamente 10, aproximadamente 2 a aproximadamente 9, aproximadamente 2 a aproximadamente 8, aproximadamente 3 a aproximadamente 11, aproximadamente 3 a aproximadamente 10, aproximadamente 3 a aproximadamente 9, aproximadamente 3 a aproximadamente 9, aproximadamente 4 a aproximadamente 11, aproximadamente 4 a aproximadamente 10, aproximadamente 4 a aproximadamente 9, o aproximadamente 4 a aproximadamente 8.

En realizaciones específicas, puede ser deseable que la corriente de descarga de turbina esté bajo condiciones tales que el CO<sub>2</sub> en la corriente no está más tiempo en un estado de fluido supercrítico, sino más bien en un estado gaseoso. Por ejemplo, al proporcionar el CO<sub>2</sub> en un estado gaseoso se puede facilitar la eliminación de cualquier componente secundario. En algunas realizaciones, la corriente de descarga de turbina tiene una presión que está por debajo de la presión en donde el CO<sub>2</sub> estaría en un estado supercrítico. Preferiblemente, la corriente de descarga de turbina tiene una presión que es menor de aproximadamente 7.3 MPa, es menor o igual a aproximadamente 7 MPa, menos que o igual a aproximadamente 6,5 MPa, menos que o igual a aproximadamente 6 MPa, menos que o igual a aproximadamente 5,5 MPa, menos que o igual a aproximadamente 5 MPa, menos que o igual a aproximadamente 4,5 MPa, menos que o igual a aproximadamente 4 MPa, menos que o igual a aproximadamente 3,5 MPa, menos que o igual a aproximadamente 3 MPa, menos que o igual a aproximadamente 2,5 MPa, menos que o igual a aproximadamente 2 MPa, or menos que o igual a aproximadamente 1,5 MPa. En

5 otras realizaciones, la presión de la corriente de descarga de turbina puede ser aproximadamente 1.5 MPa hasta aproximadamente 7 MPa, aproximadamente 3 MPa hasta aproximadamente 7 MPa, o 4 MPa hasta aproximadamente 7 MPa. Preferiblemente, la presión de la corriente de descarga de turbina es menor que la presión de condensación del CO<sub>2</sub> a las temperaturas de enfriamiento que se van a ser encontradas por la corriente (por ejemplo, enfriamiento al ambiente). Así, es preferible de acuerdo con la invención que la corriente debajo de CO<sub>2</sub> de la turbina 320 (y preferiblemente corriente arriba de la unidad 620 de presurización) se mantenga en un estado gaseoso y no se permita alcanzar las condiciones en donde se puede formar CO<sub>2</sub> líquido.

10 Aunque el paso de la corriente de producto de combustión a través de la turbina puede llevar a alguna cantidad de descenso en la temperatura, la corriente de descarga de turbina típicamente tendrá una temperatura que podría impedir la eliminación de cualquier componente secundario presente en la corriente de producto de combustión. Por ejemplo, la corriente de descarga de turbina puede tener una temperatura de aproximadamente 500°C a aproximadamente 1000°C, aproximadamente 600 °C hasta aproximadamente 1000 °C, aproximadamente 700 °C hasta aproximadamente 1000 °C, o 800 °C hasta aproximadamente 1000 °C. Debido a la temperatura relativamente alta de la corriente de producto de combustión, puede ser beneficioso que la turbina esté formada de materiales capaces de soportar tales temperaturas. También puede ser útil que la turbina comprenda un material que provea buena resistencia química al tipo de materiales secundarios que puedan estar presentes en la corriente de producto de combustión.

20 En algunas realizaciones, puede ser útil pasar la corriente 50 de descarga de turbina a través de al menos un intercambiador 420 de calor que enfría la corriente 50 de descarga de turbina y provea una corriente 60 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> que tiene una temperatura en un rango definido. En realizaciones específicas, el fluido 60 circulante de CO<sub>2</sub> que sales del intercambiador 420 de calor (o el intercambiador final en la serie en donde se utilizan dos o más intercambiadores de calor) tiene una temperatura de menos de aproximadamente 200°C, menos de aproximadamente 150°C, menos de aproximadamente 125 °C, menos de aproximadamente 100 °C, menos de aproximadamente 95 °C, menos de aproximadamente 90 °C, menos de aproximadamente 85 °C, menos de aproximadamente 80 °C, menos de aproximadamente 75 °C, menos de aproximadamente 70 °C, menos de aproximadamente 65 °C; menos de aproximadamente 60 °C, menos de aproximadamente 55 °C, menos de aproximadamente 50 °C, menos de aproximadamente 45 °C, o menos de aproximadamente 40 °C.

30 Como se anotó anteriormente, puede ser beneficioso que la presión se descargue para tener una presión en una relación específica con la presión de la corriente de producto de combustión. En realizaciones específicas, la corriente de descarga de turbina será pasada directamente a través del uno o más intercambiadores de calor descritos aquí sin pasar a través de ningún componente del sistema. Así, la relación de presión también puede ser descrita en relación con la relación de la presión de la corriente del producto de combustión a medida que sale de la cámara de combustión en comparación con la presión de la corriente que entra al 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 presión preferiblemente es menor de aproximadamente 12. En realizaciones adicionales, la relación de presión de la corriente de producto de combustión a la corriente que entra al intercambiador de calor puede ser menor de aproximadamente 11, menor de aproximadamente 10, menor de aproximadamente 9, menor de aproximadamente 8, o menor de aproximadamente 7. En otras realizaciones, esta relación de presión puede ser de aproximadamente 1.5 a aproximadamente 10, aproximadamente 2 a aproximadamente 9, aproximadamente 2 a aproximadamente 8, aproximadamente 3 a aproximadamente 8, o de aproximadamente 4 a aproximadamente 8.

45 Mientras que el uso de una cámara de combustión enfriada por transpiración permite combustión a alto calor, los sistemas y métodos de la presente invención pueden ser caracterizados por la capacidad de proporcionar también una corriente de descarga de turbina a un intercambiador de calor (o una serie de intercambiadores de calor) a una temperatura que es suficientemente baja para reducir los costes asociados con el sistema, incremento de la vida útil del intercambiador o intercambiadores de calor, y mejorar el rendimiento y confiabilidad del sistema. En realizaciones específicas, la temperatura de trabajo más caliente para un intercambiador de calor en un sistema o método de acuerdo con la presente invención es menor de aproximadamente 1100°C, menor de aproximadamente 1000°C, menor de aproximadamente 975°C, menor de aproximadamente 950° C, menor de aproximadamente 925°C o menor de aproximadamente 900°C.

50 En ciertas realizaciones, puede ser particularmente útil que el intercambiador 420 de calor comprenda al menos dos intercambiadores de calor en serie para recibir la corriente 50 de descarga de turbina y la enfríe hasta una temperatura deseada. El tipo de intercambiador de calor usado puede variar dependiendo de las condiciones de la corriente que entra al intercambiador de calor. Por ejemplo, la corriente 50 de descarga de turbina puede estar a una temperatura relativamente alta, como se describe más arriba, y así puede ser útil que el intercambiador de calor que recibe directamente la corriente 50 de descarga de turbina este formado de materiales de alto rendimiento diseñados para soportar condiciones extremas. Por ejemplo, el primer intercambiador de calor en la serie de intercambiadores de calor puede comprender una aleación INCONEL® o material similar. Preferiblemente, el primer intercambiador de calor en la serie comprende un materia capaz de soportar 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 1100 °C, o al menos aproximadamente 1200 °C. También puede ser útil que uno o más de los intercambiadores de calor comprendan un material que provea buena resistencia química al tipo de materiales secundarios que pueden estar presentes en la corriente de producto de combustión. Las aleaciones INCONEL® están disponibles en Special Metals Corporation, y algunas realizaciones pueden incluir aleaciones austeníticas basadas en níquel-cromo. 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 favorable al intercambiador de calor es un intercambiador de calor de placa compacta unida de difusión con material fino químicamente molido en las placas manufacturados en un material de alta temperatura, tal como una de las aleaciones descritas anteriormente. Los intercambiadores de calor adecuados pueden incluir los disponibles bajo la marca comercial HEATRIC® (disponible de Meggitt USA, Houston, TX).

El primer intercambiador de calor en la serie preferiblemente puede transferir suficientemente calor desde al corriente de descarga de turbina de tal manera que uno o más intercambiadores de calor adicionales presentes en la serie puedan estar formados de materiales más convencionales—por ejemplo, acero inoxidable. En realizaciones específicas, se usan al menos dos intercambiadores de calor o al menos tres intercambiadores de calor en una serie para enfriar la corriente de descarga de turbina hasta la temperatura deseada. En la utilidad de utilizar múltiples intercambiadores de calor en una serie puede verse particularmente en la descripción más abajo con respecto a la transferencia de calor desde la corriente de descarga de turbina al fluido circulante de CO<sub>2</sub> para recalentar el fluido circulante antes de introducirlo a la cámara de combustión.

En algunas realizaciones, los métodos y sistemas pueden ser caracterizados por ser un método o sistema de combustión de una etapa sencilla. Esto puede lograrse para hacer uso de una cámara de combustión de alta eficiencia, tal como una cámara de combustión enfriada por transpiración descrito más arriba. Esencialmente, el combustible puede ser sustancialmente sometido de manera completa a combustión en la cámara de combustión simple de tal forma que es innecesario proporcionar una serie de cámaras de combustión para someter a combustión completamente el combustible. De acuerdo con lo anterior, en algunas realizaciones, los métodos y sistemas de la invención pueden ser descritos de tal manera que la cámara de combustión enfriada por transpiración es la única cámara de combustión. En realizaciones adicionales, los métodos y sistemas pueden ser descritos de tal manera que la combustión ocurre solamente en la cámara de combustión sencilla enfriada por transpiración antes del paso de la corriente de descarga al intercambiador de calor. Todavía en realizaciones adicionales, los métodos y sistemas pueden ser descritos de tal manera que la corriente de descarga de turbina es pasada directamente al intercambiador de calor sin paso a través de una cámara de combustión adicional.

Después del enfriamiento, la corriente 60 de fluido de circulante de CO<sub>2</sub> que sale del al menos un intercambiador 420 de calor puede experimentar un procesamiento adicional para separar cualquier componente secundario que permanezca en la corriente 60 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> del combustible. Como se muestra en la Figura 5, la corriente 60 de fluido circulante puede ser dirigida a una o más unidades 520 de separación. Como se discute en mayor detalle más adelante, la presente invención puede ser caracterizada particularmente por la capacidad de proporcionar un método de alta eficiencia para generar potencia a partir de la combustión de un combustible que contiene carbono sin liberación atmosférica de CO<sub>2</sub>. Esto puede lograrse, al menos en parte, utilizando el CO<sub>2</sub> formado en la combustión del combustible que contiene carbono como fluido circulante en el ciclo de producción de potencia. En algunas realizaciones, sin embargo, la combustión continua y el reciclaje de CO<sub>2</sub> como fluido circulante puede producir una acumulación de CO<sub>2</sub> en el sistema. En tales casos, puede ser útil retirar al menos una porción del CO<sub>2</sub> del fluido circulante (por ejemplo una cantidad aproximadamente equivalente a la cantidad de CO<sub>2</sub> derivada de la combustión del combustible que contiene carbono). Tal CO<sub>2</sub> extraído puede ser dispuesto por cualquier método adecuado. En realizaciones específicas, el CO<sub>2</sub> puede ser dirigido a una tubería para retención o forma de desecho por medios adecuados, como se describe adicionalmente más adelante.

Puede ser un requerimiento de la especificación del sistema de tubería para CO<sub>2</sub> que el CO<sub>2</sub> que entra en la tubería este sustancialmente libre de agua para evitar la corrosión del acero al carbono usado en la tubería. Aunque el CO<sub>2</sub> “húmedo” puede ser introducido directamente en una tubería de CO<sub>2</sub> de acero inoxidable, no siempre es posible, y en efecto, puede ser más deseable utilizar una tubería de acero al carbono debido a las preocupaciones por el coste. De acuerdo con lo anterior, en ciertas realizaciones, el agua presente en el fluido circulante de CO<sub>2</sub> (por ejemplo agua formada durante la combustión del combustible que contiene carbono y persistente en la corriente del producto de combustión, la corriente de descarga de turbina, y la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub>) puede ser retirada principalmente como una fase líquida desde la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> enfriada. En realizaciones específicas, esto puede lograrse proveyendo el fluido circulante de CO<sub>2</sub> (por ejemplo en un estado gaseoso) a una presión que es menor que el punto al cual el CO<sub>2</sub> presente en la mezcla gaseosa es licuado cuando la mezcla de gaseosa es enfriada hasta la temperatura más baja alcanzada con medios de enfriamiento a temperatura ambiente. Por ejemplo, el fluido circulante de CO<sub>2</sub> particularmente puede ser provisto a una presión de menos de 7.38 MPa durante la separación de componentes secundarios del mismo. Una presión incluso inferior puede ser requerida si se utilizan los miembros de enfriamiento a una temperatura en el rango de ambiente bajo o

sustancialmente menos que el ambiente. Esto permite la separación de agua como un líquido y también minimiza la contaminación de la corriente 65 circulante de CO<sub>2</sub> purificada que sale de la unidad de separación. Esto también puede limitar la presión de descarga de la turbina a un valor que es menor que la presión crítica del gas de desfogue de la turbina. La presión real puede depender de la tempera de los medios de enfriamiento ambiente disponible. Por ejemplo, si la separación de agua tiene lugar a 30%, entonces una presión de 7 MPa permite un margen de 0.38 MPa para a la presión de condensación de CO<sub>2</sub>. En algunas realizaciones, el fluido circulante de CO<sub>2</sub> que sale del intercambiador de calor y entra en la unidad de separación puede ser provisto a una presión de aproximadamente 2 MPa hasta aproximadamente 7 MPa, aproximadamente 2.25 a aproximadamente 7 MPa, aproximadamente 2.5 a aproximadamente 7 MPa. Aproximadamente 2.75 MPa a aproximadamente 7 MPa, aproximadamente 3 MPa a aproximadamente 7 MPa, aproximadamente 3.5 MPa a aproximadamente 7 MPa, aproximadamente 4 MPa a aproximadamente 7 MPa, o aproximadamente 4 MPa a aproximadamente 6 MPa. En otras realizaciones, la presión puede ser sustancialmente la misma de la presión a la salida de la turbina.

En realizaciones específicas, la corriente 65 circulante de CO<sub>2</sub> purificada después de la separación de agua no comprende vapor de agua o sustancialmente no tiene vapor de agua. En algunas realizaciones, la corriente circulante de CO<sub>2</sub> purificada puede ser caracterizada por comprender vapor en una cantidad de solamente menos de 1.5% en base molar, menos de 1.25% en base molar, menos de 1% en base molar, menos de 0.9% en base molar, menos de 0.8% en base molar, menos de 0.7% en base molar, menos de 0.6% en base molar, menos de 0.5% de base molar, menos de 0.4% de base molar, menos de 0.3% en base molar, menos de 0.2% en base molar, menos de 0.1% en base molar. En algunas realizaciones, la corriente fluida circulante de CO<sub>2</sub> purificada puede comprender vapor de agua solamente en una cantidad de aproximadamente 0.01% a aproximadamente 1.5% en base molar, aproximadamente 0.01% a aproximadamente 1% en base molar, aproximadamente 0.01% a aproximadamente 0.75% en base molar, aproximadamente 0.01% a aproximadamente 0.5% en base molar, aproximadamente 0.01% a aproximadamente 0.25% en base molar, aproximadamente 0.05% a aproximadamente 0.5% en base molar, o aproximadamente 0.05% a aproximadamente 0.25% en base molar.

Puede ser altamente ventajoso proporcionar el fluido circulante de CO<sub>2</sub> a las condiciones de temperatura y presión arriba definidas para facilitar la separación de los componentes secundarios, tales como agua. En otras palabras, la presente invención puede proporcionar particularmente el mantenimiento del fluido circulante de CO<sub>2</sub> bajo condiciones deseadas de tal manera que el CO<sub>2</sub> y el agua en el fluido circulante de CO<sub>2</sub> antes de la separación estén en los estados deseados que faciliten la separación. Proveyendo el fluido circulante de CO<sub>2</sub> a una presión como se describe más arriba, la temperatura de la corriente fluida puede disminuirse hasta un punto en donde el agua en la corriente estará en estado líquido y así será más fácilmente separable del CO<sub>2</sub> gaseoso.

En ciertas realizaciones, puede ser deseable proporcionar condiciones de secado adicionales de tal manera que el fluido circulante de CO<sub>2</sub> purificado está completa o sustancialmente libre de agua. Como se anotó anteriormente, la separación del agua del fluido circulante de CO<sub>2</sub> con base en diferencias de fase en los materiales puede dejar una porción menor (esto es, baja concentración) de agua remanente en el fluido circulante de CO<sub>2</sub>. En algunas realizaciones, puede ser aceptable continuar de manera que el fluido circulante de CO<sub>2</sub> tenga la menor porción de agua remanente en el mismo. En otras realizaciones, puede ser útil someter el fluido circulante de CO<sub>2</sub> a tratamiento adicional para facilitar la eliminación de toda o parte del agua remanente. Por ejemplo, una baja concentración de agua puede ser removida por secadores de secantes con ese u otros medios que sean adecuados a la luz de la presente divulgación.

Proveyendo el fluido circulante de CO<sub>2</sub> a las unidades de separación a la presión definida puede ser particularmente beneficioso para de nuevo maximizar la eficiencia del ciclo de potencia. Específicamente, proveyendo el fluido circulante de CO<sub>2</sub> al rango de presión definida puede permitir que el fluido circulante de CO<sub>2</sub> en la fase gaseosa sea comprimido hasta una alta presión con mínimo consumo de potencia total. Como se describe más adelante, tal presurización pueda ser requerida de tal manera que parte del fluido circulante de CO<sub>2</sub> pueda ser recirculada a la cámara de combustión y parte pueda ser suministrada a la presión de tubería requerida (por ejemplo, aproximadamente 10 MPa hasta aproximadamente 20 MPa). Esto ilustra adicionalmente los beneficios de minimizar la relación de presión de entrada a salida de la turbina de expansión, como se describe más arriba. Esto funciona para implementar la eficiencia global del ciclo y también para permitir la presión que la descargue de presión de la turbina sea en el rango deseable descrito más arriba para la separación de agua y otros componentes secundarios del fluido circulante de CO<sub>2</sub>.

Una realización del flujo del fluido circulante de CO<sub>2</sub> a través de una unidad 520 de separación se ilustra en la Figura 6. Como se ve allí, la corriente 60 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> del intercambiador de calor puede ser pasada a través de un intercambiador 530 de calor con agua fría que utiliza agua para eliminar adicionalmente calor del fluido 60 circulante de CO<sub>2</sub> (o cualquier dispositivo de funcionamiento similar) y descarga un fluido 61 circulante de CO<sub>2</sub> en fase mixta en donde el CO<sub>2</sub> permanece como gas y el agua en el fluido circulante de CO<sub>2</sub> es convertida a una fase líquida. Por ejemplo, el paso del fluido 60 circulante CO<sub>2</sub> a través del intercambiador 530 de calor con agua fría puede enfriar el fluido circulante de CO<sub>2</sub> a una temperatura de menos de aproximadamente 50 °C, menos de aproximadamente 55 °C, menos de aproximadamente 40 °C, menos de aproximadamente 45 °C, menos de aproximadamente 40 °C, menos de aproximadamente 35 °C, menos de aproximadamente 30 °C. Preferiblemente, la presión del fluido circulante de CO<sub>2</sub> se mantiene sin cambios sustancialmente por el paso a través del

intercambiador 530 de calor con agua fría. El fluido 61 circulante de CO<sub>2</sub> en fase mixta es dirigido a una unidad 540 de separación de agua en donde una corriente 62a de agua líquida es descargada desde el separador 520. También saliendo de la unidad 540 de separación de agua está la corriente 62b de fluido circulante de CO<sub>2</sub> enriquecida. Esta corriente enriquecida puede salir directamente del separador 520 igual que la corriente 65 fluida circulante de CO<sub>2</sub> purificada. En realizaciones alternativas (como lo ilustran las corrientes y componentes representados por líneas punteadas), la corriente 62b fluida circulante de CO<sub>2</sub> enriquecida puede ser dirigida a una o más unidades 550 de separación adicional para la eliminación de componentes secundarios adicionales, como se describe más completamente más adelante. En realizaciones específicas, cualquier componente secundario adicional del fluido circulante de CO<sub>2</sub> puede ser removido después de la eliminación de agua. El fluido circulante de CO<sub>2</sub> sale entonces de las unas o más unidades separadoras adicionales como el fluido 65 circulante de CO<sub>2</sub> purificado. En algunas realizaciones, sin embargo, el fluido 61 circulante de CO<sub>2</sub> en fase mixta puede ser dirigido primero para eliminación de uno o más componentes secundarios antes de la eliminación de agua, y la corriente parcialmente purificada puede ser entonces dirigida a la unidad 540 de separación de agua. Una persona de experiencia con el conocimiento de la presente divulgación sería capaz de prever las diversas combinaciones de separadores que pueden ser deseables, y se pretende que todas tales combinaciones estén incorporadas en la presente invención.

Como se anotó más arriba, además de agua, el fluido circulante de CO<sub>2</sub> puede contener otros componentes secundarios tales como, impurezas derivadas del combustible, derivados de la combustión y derivados del oxígeno. Tales componentes secundarios también pueden ser removidos del fluido circulante de CO<sub>2</sub> gaseoso, enfriado y aproximadamente al mismo tiempo que la separación de agua. Por ejemplo, además del vapor de agua, componentes secundarios tales como SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, CHI, NO, NO<sub>2</sub>, Hg, y O<sub>2</sub> en exceso, N<sub>2</sub> y Ar pueden ser removidos. Estos componentes secundarios del fluido circulante de CO<sub>2</sub> (frecuentemente reconocidos como impurezas y contaminantes) pueden ser todos removidos del fluido circulante de CO<sub>2</sub> enfriado utilizando métodos apropiados (por ejemplo, métodos definidos en la publicación solicitud de Patente los Estados Unidos No 2008/0226515 y las solicitudes de Patente Europea Nos EP 1952874 y EP 1953486). El SO<sub>2</sub> y el SO<sub>3</sub> pueden ser convertidos al 100% en ácido sulfúrico, mientras que mayor que el 95% del NO y NO<sub>2</sub> pueden ser convertidos en ácido nítrico. Cualquier O<sub>2</sub> en exceso presente en el fluido circulante de CO<sub>2</sub> puede ser separado como una corriente enriquecida para recirculación opcional a la cámara de combustión. Cualquiera de los gases inertes presentes (por ejemplo, N<sub>2</sub> y Ar) pueden ser expulsados a baja presión a la atmósfera. En ciertas realizaciones, el fluido circulante de CO<sub>2</sub> puede ser purificado así de tal manera que el CO<sub>2</sub> derivado del carbono en el combustible que es sometido a combustión puede ser entregado finalmente como una corriente pura, de alta densidad. En realizaciones específicas, el fluido circulante 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 99.8% molar. Además del CO<sub>2</sub>, el fluido circulante puede ser provisto a una presión deseada para entrada directa a una tubería de CO<sub>2</sub>-por ejemplo al menos aproximadamente a 10 MPa, al menos aproximadamente 15 MPa, o al menos aproximadamente 20 MPa.

Para resumir lo anterior, la combustión del combustible 254 que contiene carbono en la presencia de O<sub>2</sub> 242 y un fluido 236 circulante de CO<sub>2</sub> en una cámara 220 de combustión enfriada por transpiración puede formar una corriente 40 de producto de combustión que tiene una temperatura y presión relativamente altas. Esta corriente 40 de producto de combustión que comprende una cantidad relativamente grande de CO<sub>2</sub> puede ser pasada a través de una turbina 320 para expandir la corriente 40 de producto de combustión, haciendo disminuir por tanto la presión de la corriente generando potencia. La corriente 50 de descarga de turbina que sale de la salida de la turbina 320 esta a una presión disminuida pero todavía retiene una temperatura relativamente alta. Debido a los contaminantes e impurezas en la corriente de producto de combustión, es beneficioso separar tales contaminantes e impurezas antes de recircular el fluido circulante de CO<sub>2</sub> de regreso al sistema. Para lograr esta separación, la corriente 50 de descarga de turbina es enfriada por 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) puede lograrse como se describió más arriba. Con el fin de recircular el fluido circulante de CO<sub>2</sub> de regreso a la cámara de combustión, es necesario tanto recalentar como represurizar el fluido circulante de CO<sub>2</sub>. En ciertas realizaciones, la presente invención puede ser caracterizada particularmente por la implementación de etapas de proceso específicas para maximizar la eficiencia del ciclo de generación de potencia a la vez que simultáneamente se evita la descarga de contaminantes (por ejemplo, CO<sub>2</sub>) a la atmósfera. Esto puede verse particularmente en relación con el recalentamiento y represurización del fluido circulante de CO<sub>2</sub> enfriado y purificado que sale de la unidad de separación.

Como se ilustra adicionalmente en la Figura 5, el fluido circulante 65 de CO<sub>2</sub> purificado que sale de la una o más unidades de separación 520 puede ser pasada a través de una o más unidades 620 de presurización (por ejemplo, bombas, compresores o similares) para incrementar la presión del fluido 65 circulante de CO<sub>2</sub> purificado. En ciertas realizaciones, el fluido 65 circulante de CO<sub>2</sub> purificado puede ser comprimido hasta una presión de al menos aproximadamente 7.5 MPa o al menos aproximadamente 8 MPa. En algunas realizaciones, una unidad de presurización sencilla puede ser utilizada para incrementar la presión del fluido circulante de CO<sub>2</sub> hasta la presión deseada descrita aquí para introducción a la cámara 220 de combustión.

En realizaciones específicas, la presurización puede llevarse a cabo utilizando una serie de dos o más compresores (por ejemplo, bomba) en la unidad 620 de presurización. Una tal realización se muestra en la Figura 7, en donde el fluido 65 circulante de CO<sub>2</sub> purificado es pasado a través de un primer compresor 630 para comprimir el fluido 65 circulante de CO<sub>2</sub> purificado hasta una primera presión (la cual preferiblemente está por encima de la presión crítica

del CO<sub>2</sub>) y formar así la corriente 66. La corriente 66 puede ser dirigida a un intercambiador 640 de calor con agua fría que retira calor (por ejemplo, el calor formado por la acción presurizante del primer compresor) y forma la corriente 67, la cual preferiblemente está a una temperatura que es cercana a la temperatura ambiente. La corriente 67 puede ser dirigida a un segundo compresor 650 que se utiliza para presurizar el fluido circulante de CO<sub>2</sub> hasta una segunda presión que es mayor que la primera presión. Como se describe más abajo, la segunda presión puede ser sustancialmente similar a la presión deseada para el fluido circulante de CO<sub>2</sub> cuando se introduce (o recicla) a la cámara de combustión.

En realizaciones específicas, el primer compresor 630 puede ser utilizado para incrementar la presión del fluido 65 circulante de CO<sub>2</sub> purificado de tal forma que el fluido circulante de CO<sub>2</sub> purificado es transformado desde un estado gaseoso hasta un estado supercrítico. En realizaciones específicas, el fluido circulante de CO<sub>2</sub> purificado puede ser presurizado en el primer compresor 630 hasta una presión de aproximadamente 7.5 MPa hasta aproximadamente 20 MPa, aproximadamente 7,5 MPa hasta aproximadamente 15 MPa, aproximadamente 7,5 MPa hasta aproximadamente 12 MPa, aproximadamente 7,5 MPa hasta aproximadamente 10 MPa, o 8 MPa hasta aproximadamente 10 MPa. La corriente 66 que sale del primer compresor 630 (el cual está en un estado de fluido supercrítico) es pasada entonces a través del intercambiador 640 de calor con agua fría (o cualquier dispositivo de funcionamiento similar) que pueda enfriar al fluido circulante de CO<sub>2</sub> hasta una temperatura suficiente para formar un fluido de alta densidad que puede ser bombeado más eficientemente hasta una presión incluso mayor. Esto puede ser significativo a la luz del gran volumen de CO<sub>2</sub> que está siendo recirculado para uso como fluido circulante. Bombear un gran volumen de CO<sub>2</sub> en el estado de fluido supercrítico puede ser un drenaje significativo de energía sobre el sistema. La presente, sin embargo, hace realidad el incremento beneficioso en la eficiencia que puede ser provisto por la densificación del CO<sub>2</sub> y reducción así del volumen total del CO<sub>2</sub> supercrítico que es bombeado de regreso a la cámara de combustión para reciclaje. En realizaciones específicas, el fluido circulante de CO<sub>2</sub> puede ser provisto a una densidad de al menos aproximadamente 200 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 del intercambiador 640 con agua fría el intercambiador 640 de calor con agua fría (y antes de paso a través de la unidad 420 de intercambio de calor para calentamiento). En realizaciones adicionales, la densidad puede ser aproximadamente 150 kg/m<sup>3</sup> hasta aproximadamente 1100 kg/m<sup>3</sup> aproximadamente 200 kg/m<sup>3</sup> hasta aproximadamente 1000 kg/m<sup>3</sup>, aproximadamente 400 kg/m<sup>3</sup> hasta aproximadamente 950 kg/m<sup>3</sup>, aproximadamente 500 kg/m<sup>3</sup> hasta aproximadamente 900 kg/m<sup>3</sup>, o 500 kg/m<sup>3</sup> hasta aproximadamente 800 kg/m<sup>3</sup>.

En realizaciones específicas, el paso de la corriente 66 a través del intercambiador 640 de calor con agua fría puede enfriar el fluido circulante de CO<sub>2</sub> hasta una temperatura de menos de aproximadamente 60 °C, menos de aproximadamente 50 °C, menos de aproximadamente 40 °C o menos de aproximadamente 30 °C. En otras realizaciones, la temperatura del fluido circulante de CO<sub>2</sub> que sale del intercambiador 640 de calor con agua fría como corriente 67 puede ser aproximadamente 15 °C hasta 50 °C, aproximadamente 20 °C hasta aproximadamente 45 °C o aproximadamente 20 °C hasta aproximadamente 40 °C. El fluido circulante de CO<sub>2</sub> en la corriente 67 que entra al segundo compresor 650 está preferiblemente bajo condiciones que facilitan el bombeo eficiente en energía de la corriente a una presión deseada según se describe aquí para introducción del fluido circulante de CO<sub>2</sub> en la cámara de combustión. Por ejemplo, la corriente 70 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> supercrítica puede ser presurizada adicionalmente hasta una presión de al menos aproximadamente 12 MPa, al menos 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 realizaciones, la corriente 70 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> supercrítico puede ser presurizada hasta una presión de aproximadamente 15 MPa hasta aproximadamente 50 MPa, aproximadamente 20 MPa hasta aproximadamente 45 MPa, o 25 MPa hasta aproximadamente 40 MPa. Cualquier tipo de compresor capaz de trabajar bajo las temperaturas anotadas y capaz de alcanzar las presiones descritas puede ser utilizado, tal como una bomba multietapa se alta presión.

La corriente 70 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada que sale de una o más de las unidades 620 de presurización puede ser dirigida de regreso a los intercambiadores de calor utilizados previamente para enfriar la corriente 50 de descarga de turbina 50. Como se muestra en la figura 5, la corriente 70 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada puede ser pasada primero a través de un divisor 720 de corriente que forma la corriente 80 de fluido de tubería de CO<sub>2</sub> y la corriente 85 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> (la cual puede ser sustancialmente idéntica a la corriente 70 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> excepto por la cantidad real de CO<sub>2</sub> presente en la corriente). Así, en algunas realizaciones, al menos una porción del CO<sub>2</sub> en la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada es introducida en una tubería presurizada para retención. La cantidad de CO<sub>2</sub> retirada de la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> y dirigida a la tubería (u otro medio de retención o de forma de desecho) puede variar dependiendo del contenido deseado de CO<sub>2</sub> para ser introducido en la cámara de combustión para controlar la temperatura de combustión y el contenido real de CO<sub>2</sub> presente en la corriente de descarga de combustión que sale de la cámara de combustión. En algunas realizaciones, la cantidad de CO<sub>2</sub> extraída como se describió 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 alcanzar una operación de alta eficiencia, puede ser beneficioso que el fluido circulante de CO<sub>2</sub> que sale de la unidad 620 de presurización sea calentado hasta una temperatura a la cual el fluido supercrítico tenga un calor específico mucho más bajo. Esto es equivalente a proporcionar una entrada de calor muy grande sobre un rango 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 a una porción del fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculado permite que la unidad 420 de intercambio de calor opere con una pequeña diferencia de temperatura entre la corriente 50 de desfogue de turbina y la corriente 236 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculada en el extremo caliente de la unidad 420 intercambiadora de calor (o el primer intercambiador de calor cuando se usa una serie de dos o más intercambiadores de calor). En realizaciones específicas, el paso del fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizado a través del uno o más intercambiadores de calor puede ser útil para calentar la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada hasta una temperatura deseada para entrada de la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada en la cámara de combustión. En ciertas realizaciones, la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada es calentada 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 circulante de CO<sub>2</sub> a la cámara de combustión. En algunas realizaciones, el calentamiento puede ser a una temperatura de aproximadamente 500°C hasta aproximadamente 1,200 °C, aproximadamente 550 °C hasta aproximadamente 1000 °C, o 600 °C hasta aproximadamente 950 °C.

La Figura 8 ilustra una realización de una unidad 420 de intercambio de calor en donde tres intercambiadores de calor individuales son utilizados en serie para retirar calor de la corriente 50 de descarga de turbina para proporcionar una corriente 60 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> bajo condiciones adecuadas para eliminación de componentes secundarios y simultáneamente agregar calor a la corriente 70 (u 85) de fluido circulante de CO<sub>2</sub> supercrítica, presurizada antes de recircular y de la introducción de la corriente 236 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> en la cámara de combustión. Como se describe adicionalmente más adelante, los sistemas y métodos presentes pueden ser retroajustados a sistemas de potencia convencionales (por ejemplo, plantas de potencia por quema de carbón) para incrementar la eficiencia y/o el rendimiento de las mismas. En algunas realizaciones, la unidad 420 de intercambio de calor descrita como sigue puede ser denominada entonces como la unidad de intercambio de calor primaria en tal retroajuste en donde también se utiliza una unidad de intercambio de calor secundaria (como se ilustra en la Figura 12). La unidad de intercambio de calor secundaria podría ser así uno o más intercambiadores 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 debe considerarse como limitantes del alcance de la invención y solamente se usan para proporcionar claridad a la descripción.

En las realizaciones abarcadas por la Figura 8, la corriente 50 de descarga de turbina entra en la serie 420 de intercambiador de calor pasando primero a través del primer intercambiador 430 de calor para proporcionar la corriente 52, la cual tendrá una temperatura más baja que la temperatura de la corriente 50 de descarga de turbina. El primer intercambiador 430 de calor puede ser descrito como un intercambiador de calor a alta temperatura puesto que recibe la corriente más caliente en la serie – esto es, la corriente 50 de descarga de turbina - y así transfiere calor en el rango de temperatura más alto en la serie 420 de intercambiadores de calor. Como se describió más arriba, el primer intercambiador 430 de calor que recibe la corriente 50 de descarga de turbina de temperatura relativamente alta puede comprender aleaciones especiales u otros materiales útiles para hacer el intercambiador de calor adecuado para soportar las temperaturas anotadas. La temperatura de la corriente 50 de descarga de la turbina puede ser reducida significativamente mediante por paso a través del primer intercambiador 430 de calor (lo cual también puede ser aplicado a otras realizaciones en donde se usa menos de tres o más de tres intercambiadores de calor individuales). En ciertas realizaciones, la temperatura de la corriente 52 que sale del primer intercambiador 430 de calor puede ser inferior a la temperatura de la corriente 50 de descarga de turbina 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 realizaciones específicas, la temperatura de la corriente 52 puede ser aproximadamente 100°C a aproximadamente 800 °C, aproximadamente 150 °C hasta aproximadamente 600 °C, o aproximadamente 200 °C hasta aproximadamente 500 °C. En realizaciones preferidas, la presión de la corriente 52 que sale del primer intercambiador 430 de calor es sustancialmente similar a la presión de la corriente 50 de descarga de turbina. Específicamente, la presión de la corriente 52 que sale del primer intercambiador 430 de calor 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 el 99.8% de la presión de la corriente 50 de descarga de turbina.

La corriente 52 que sale del primer intercambiador 430 de calor pasa a través del segundo intercambiador 440 de calor para producir la corriente 56, la cual tiene una temperatura que es menor que la temperatura de la corriente 52 que entra al segundo intercambiador 440 de calor. El segundo intercambiador 440 de calor puede ser descrito como un intercambiador de calor de temperatura intermedia, puesto que transfiere calor en el rango de temperatura intermedio (esto es, un rango menor que el primer intercambiador 430 de calor, pero mayor que el tercer intercambiador 450 de calor). En algunas realizaciones, la diferencia de temperatura entre la primera corriente 52 y la segunda corriente 56 puede ser sustancialmente menor que la diferencia de temperatura entre la corriente 50 de descarga de turbina y la corriente 52 que sale del primer intercambiador 430 de calor. En algunas realizaciones, la

temperatura de la corriente 56 que sale del segundo intercambiador 440 de calor puede ser inferior que la temperatura de la corriente 52 que entra al segundo intercambiador 440 de calor 440 en aproximadamente 10 °C hasta aproximadamente 200 °C, aproximadamente 20 °C hasta aproximadamente 175 °C, aproximadamente 30 °C hasta aproximadamente 150 °C, o aproximadamente 40 °C hasta aproximadamente 140 °C. En realizaciones específicas, la temperatura de la corriente 56 puede ser aproximadamente 75 °C hasta aproximadamente 600 °C, aproximadamente 100 °C hasta aproximadamente 400 °C, o aproximadamente 100 °C hasta aproximadamente 300 °C. De nuevo, puede ser preferible que la presión de la corriente 56 que sale del segundo intercambiador 440 de calor sea sustancialmente similar a la presión de la corriente 52 que entra al segundo intercambiador 440 de calor. Específicamente, la presión de la corriente 56 que sale del segundo intercambiador 440 de calor 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 el 99.8% de la presión de la corriente 52 que entra al segundo intercambiador 440 de calor.

La corriente 56 que sale del segundo intercambiador 440 de calor es pasada a través del tercer intercambiador 450 de calor para producir la corriente 60 de fluido circulante de CO<sub>2</sub>, la cual tiene una temperatura que es menor que la temperatura de la corriente 56 que entra al tercer intercambiador 450 de calor. El tercer intercambiador 450 de calor puede ser descrito como un intercambiador de calor a baja temperatura puesto que transfiere calor en el rango de temperatura más bajo de la serie 420 de transferencia de calor. En algunas realizaciones, la temperatura de la corriente 60 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> que sale del tercer intercambiador 450 de calor 450 puede ser inferior que la temperatura de la corriente 56 que entra al tercer intercambiador 450 de calor en aproximadamente 10 °C hasta aproximadamente 250 °C, aproximadamente 15 °C hasta aproximadamente 200 °C, aproximadamente 20 °C hasta aproximadamente 175 °C, o aproximadamente 25 °C hasta aproximadamente 150 °C. En realizaciones específicas, la temperatura de la corriente 60 puede ser aproximadamente 40 °C hasta aproximadamente 200 °C, aproximadamente 40 °C hasta aproximadamente 100 °C, o aproximadamente 40 °C hasta aproximadamente 90 °C. De nuevo, puede ser preferible que la presión de la corriente 60 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> que sale del tercer intercambiador 450 de calor sea sustancialmente similar a la presión de la corriente 56 que entra al tercer intercambiador 450 de calor. Específicamente, la presión de la corriente 60 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> que sale del tercer intercambiador 450 de calor 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 al tercer intercambiador 450 de calor.

La corriente 60 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> que sale del tercer intercambiador 450 de calor (y que sale así de la unidad 420 de intercambiadores de calor en general) puede ser dirigida a una o más unidades 520 de separación, como se describió más arriba. También tal como se describió más arriba, la corriente de fluido de CO<sub>2</sub> puede experimentar uno o más tipos de separación para eliminar componentes secundarios de la corriente, la cual es presurizada entonces para regresar a la cámara de combustión como fluido circulante recirculado (que tiene opcionalmente una porción del CO<sub>2</sub> separado para entrar en una tubería de CO<sub>2</sub> u otros medios de retención o de forma de desecho sin ventilación a la atmósfera).

Regresando a la Figura 8, la corriente 70 (o la 85 si pasa primero a través de un aparato de separación, como se muestra en la Figura 5) de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada, puede ser dirigida de regreso a través de la misma serie de tres intercambiadores de calor de tal manera que el calor extraído originalmente a través de los intercambiadores de calor puede ser utilizado para impartir calor a la corriente 70 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada antes de entrar en la cámara 220 de combustión. Típicamente, el calor impartido a la corriente 70 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada por paso a través de los tres intercambiadores de calor (450, 440, y 430) pueden ser relativamente proporcional a la cantidad de calor extraída por los intercambiadores de calor como se describió más arriba.

En ciertas realizaciones, la invención puede ser caracterizada por la diferencia de temperatura de las corrientes que salen y entran en el extremo frío del intercambiador de calor (o del último intercambiador de calor en una serie). Con referencia a la Figura 8, esto puede relacionarse específicamente con la diferencia de temperatura en las corrientes 60 y 70. Esta diferencia de temperatura de las corrientes en el extremo frío del intercambiador de calor (del último intercambiador de calor en una serie) es específicamente mayor que cero y puede estar en el rango de aproximadamente 2 °C a aproximadamente 50 °C, aproximadamente 3 °C a aproximadamente 40 °C, aproximadamente 4 °C a aproximadamente 30 °C, o aproximadamente 5 °C a aproximadamente 20 °C.

En algunas realizaciones, la corriente 70 de fluido circulante CO<sub>2</sub> presurizada puede ser pasada directamente a través de los tres intercambiadores de calor en serie. Por ejemplo, la corriente 70 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada (esto es, a una temperatura relativamente baja) puede pasar a través del tercer intercambiador 450 de calor para formar la corriente 71 a una temperatura incrementada, la cual puede ser pasada directamente a través del segundo intercambiador 440 de calor para formar la corriente 73 a una temperatura incrementada, la cual puede ser pasada directamente a través del primer intercambiador 430 de calor para formar la corriente 236 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada a alta temperatura que puede ser dirigida a la cámara 220 de combustión.

La presente invención está caracterizada por el uso de una fuente de calor externa para incrementar adicionalmente la temperatura del fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculado. Por ejemplo, como se ilustra en la Figura 8, después del paso

de la corriente 70 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada a través del tercer intercambiador 450 de calor, la corriente 71 formada, en vez de pasar directamente al segundo intercambiador 440 de calor puede ser pasada a través de un componente 460 de división que divide la corriente 70 en dos corrientes 71b y 72a. La corriente 71b puede ser pasada a través del segundo intercambiador 440 de calor como se describe de otra manera más arriba. La corriente 72a puede ser pasada a través de un calentador 470 lateral que puede ser utilizado para impartir una cantidad adicional de calor a la corriente 70 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada además del calor impartido por los intercambiadores de calor mismos.

Las cantidades relativas del fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizado de la corriente 71 que son dirigidas al segundo intercambiador 440 de calor y al calentador 470 lateral pueden variar dependiendo de las condiciones de trabajo del sistema y de la temperatura final deseada de la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada para entrar en la cámara 220 de combustión. En ciertas realizaciones, la relación molar de CO<sub>2</sub> en la corriente 71b dirigida al segundo intercambiador 440 de calor y la corriente 72a dirigida al calentador 470 lateral puede ser aproximadamente 1:2 a aproximadamente 20:1 (esto es, aproximadamente 1 mol de CO<sub>2</sub> en corriente **71b** per 2 moles de CO<sub>2</sub> en corriente **72a** hasta aproximadamente 20 moles de CO<sub>2</sub> en corriente **71b** per 1 mol de CO<sub>2</sub> en corriente **72a**). En realizaciones adicionales, la relación molar de CO<sub>2</sub> en la corriente 71b dirigida al segundo intercambiador 440 de calor y la corriente 72a dirigida al calentador 470 lateral puede ser aproximadamente 1:1 hasta aproximadamente 20:1, aproximadamente 2:1 hasta aproximadamente 16:1, aproximadamente 2:1 hasta aproximadamente 12:1, aproximadamente 2:1 hasta aproximadamente 10:1, aproximadamente 2:1 hasta aproximadamente 8:1, o 4:1 hasta aproximadamente 6:1.

El calentador lateral puede comprender cualquier aparato útil para impartir calor al fluido circulante de CO<sub>2</sub>. En algunas realizaciones, la energía (esto es, calor) provista por el calentador lateral puede ser introducida en el sistema desde una fuente externa. En realizaciones particulares de acuerdo con la invención, sin embargo, la eficiencia del ciclo puede ser incrementada utilizando calor residual que es generado en uno o más puntos en el ciclo. Por ejemplo, la producción de O<sub>2</sub> para entrada en la cámara de combustión puede producir calor. Las unidades de separación de aire conocidas pueden generar calor como subproducto del proceso de separación. Además, puede ser útil que el O<sub>2</sub> sea provisto a una presión incrementada, tal como se describió más arriba, y tal presurización del gas también puede generar calor como subproducto. Por ejemplo, el O<sub>2</sub> puede ser producido mediante la operación de un proceso de separación de aire criogénico en el cual el oxígeno es presurizado en el proceso bombeando oxígeno líquido que es calentado eficientemente hasta temperatura ambiente conservando la refrigeración. Tal planta de oxígeno de bombeo criogénico puede tener dos compresores de aire, ambos de los cuales pueden ser operados adiabáticamente sin enfriamiento entre las etapas de tal manera que el aire caliente, presurizado puede ser enfriado hasta una temperatura que es cercana y/o mayor que la temperatura de la corriente que es calentada por la fuente externa (por ejemplo, corriente 72a en la Figura 8). En condiciones conocidas en la técnica, tal calor es inutilizado o puede ser realmente una pérdida en el sistema puesto que se requieren sistemas de enfriamiento secundario para eliminar el subproducto de calor. En la presente invención, sin embargo, puede utilizarse un enfriante para retirar el calor generado del proceso de separación de aire y proporcionar el calor al calentador lateral ilustrado en la Figura 8. En otras realizaciones, el calentador lateral podría por sí mismo ser la unidad de separación de aire (o un dispositivo asociado), y el fluido circulante de CO<sub>2</sub> (por ejemplo, la corriente 72a en la Figura 8) podría ser circulada directamente por sí misma a través de un sistema enfriante o asociada con la unidad de separación de aire para retirar el calor generado en el proceso de separación de aire. Más específicamente, el calor agregado puede ser obtenido operando el compresor de CO<sub>2</sub> adiabáticamente y removiendo el calor de compresión en enfriadores posteriores contra un fluido de transferencia de calor circulante el cual transfiere el calor de compresión a la parte del fluido circulante de CO<sub>2</sub> a alta presión o por transferencia de calor directa a la corriente de fluido circulante (por ejemplo, la corriente 72a en la Figura 8), de CO<sub>2</sub> recirculada a alta presión. Adicionalmente, la adición de tal calor no está limitada necesariamente a la posición descrita en relación con la Figura 8 sino que podría ser una entrada al ciclo en cualquier punto después de la separación de los componentes secundarios del fluido circulante de CO<sub>2</sub> (pero preferiblemente antes de paso del fluido circulante de CO<sub>2</sub> a través del intercambiador de calor directamente corriente arriba desde la entrada a la cámara de combustión). Desde luego, cualquier método similar para la utilización de los residuos generados en el ciclo de producción de potencia también estaría abarcado por la presente divulgación, tal como el uso de un suministro de vapor a una temperatura de condensación adecuada o el gas de desfogue caliente de una turbina de gas de ciclo abierto convencional.

La cantidad de calor impartida por el calentador 470 lateral puede variar dependiendo de los materiales y aparatos utilizados, así como de la temperatura final que debe ser alcanzada para la corriente 236 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> para entrada en la cámara 220 de combustión. En algunas realizaciones, el calentador 470 lateral 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 realizaciones, el calentador 470 lateral incrementa efectivamente la temperatura de la corriente 72a en aproximadamente 10 °C hasta aproximadamente 200 °C, aproximadamente 50 °C hasta aproximadamente 175 °C, o aproximadamente 75 °C hasta aproximadamente 150 °C. En realizaciones específicas, el calentador 470 lateral incrementa la temperatura de la corriente 72a hasta entre al menos 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 15 °C, en al menos aproximadamente 12 °C, en al menos aproximadamente 10 °C, en al menos aproximadamente 7 °C, or en al menos aproximadamente 5 °C de la temperatura de la corriente 73 que sale de intercambiador 440 de calor.

5 Mediante esta adición de una fuente de calor adicional, la corriente 71 que sale del tercer intercambiador 450 de calor puede ser sobrecalentada más allá de la capacidad de calor disponible en el segundo intercambiador 440 de calor para calentar la corriente 71, si la cantidad completa de CO<sub>2</sub> en la corriente fue dirigida hacia el segundo intercambiador 440 de calor. Al dividir la corriente, el calor disponible en el segundo intercambiador 440 de calor puede ser impartido completamente al contenido parcial del fluido circulante de CO<sub>2</sub> en la corriente 71b mientras que el calor disponible del calentador 470 lateral puede ser impartido completamente al contenido parcial del fluido circulante de CO<sub>2</sub> en la corriente 72a. Así, puede verse que la temperatura de las corrientes combinadas que entran al primer intercambiador 430 de calor cuando se utilizan los métodos de división alternativos puede ser mayor que la temperatura de la corriente 73 que sale del segundo intercambiador 440 de calor si la cantidad total del fluido circulante de CO<sub>2</sub> en la corriente 71 es dirigida al segundo intercambiador 440 de calor en vez de ser dividida y calentada separadamente, como se describió más arriba. En algunas realizaciones, el calor incrementado ganado por el método de división puede ser significativamente suficiente para limitar si la corriente 236 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> es o no suficientemente calentada antes de entrar a la cámara de combustión.

20 Como se ve en la Figura 8, la corriente 71b que sale del divisor 460 es pasada a través del segundo intercambiador 440 de calor para formar la corriente 73, la cual es dirigida al mezclador 480 que combina la corriente 73 con la corriente 72b descargada del calentador 470 lateral. La corriente 74 combinada es pasada entonces a través del primer intercambiador 430 de calor para calentar el fluido circulante de CO<sub>2</sub> hasta una temperatura que es sustancialmente cercana a la temperatura de la corriente de descarga de turbina cuando entra en el primer intercambiador 430 de calor. Esta cercanía en temperaturas de las corrientes fluidas en el extremo caliente del primer intercambiador de calor puede aplicarse a realizaciones adicionales de la invención en donde se usan menos de tres o más de tres intercambiadores de calor y puede aplicarse al primer intercambiador de calor a través del cual el fluido circulante CO<sub>2</sub> es pasado después de la descarga de la turbina. La capacidad para alcanzar esta cercanía en temperatura de las corrientes fluidas 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 realizaciones, la diferencia entre la temperatura de la corriente de descarga de turbina que entra al primer intercambiador de calor en línea desde la turbina (esto es, después de expandirse en la turbina) y la temperatura de la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> que sale del intercambiador de calor para recircularse en la cámara de combustión puede ser menor de aproximadamente 80 °C, menos de aproximadamente 75 °C, menos de aproximadamente 70 °C, menos de aproximadamente 65 °C, menos de aproximadamente 60 °C, menos de aproximadamente 55 °C, menos de aproximadamente 50 °C, menos de aproximadamente 45 °C, menos de aproximadamente 40 °C, menos de aproximadamente 35 °C, menos de aproximadamente 30 °C, menos de aproximadamente 25 °C, menos de aproximadamente 20 °C, or menos de aproximadamente 15 °C.

40 Como puede verse a partir de lo anterior, la eficiencia de los sistemas y métodos de la presente invención puede ser facilitada grandemente por el control preciso de la diferencia de temperatura en el extremo caliente del intercambiador 420 de calor (o del primer intercambiador 430 de calor en la serie ilustrada en la Figura 8) entre la corriente 50 de descarga de turbina y la corriente 236 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculada. En realizaciones preferidas, esta diferencia de temperatura es menos de 50 °C. Aunque no se desea estar limitado por la teoría, se ha encontrado de acuerdo con la presente invención que el calor disponible para calentar el fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculado (por ejemplo, el calor extraído de la corriente de descarga de turbina en el uno o más intercambiadores de calor) puede ser inadecuado para calentar suficientemente la corriente total de fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculado. La presente invención ha hecho realidad el que esto puede superarse dividiendo la corriente 71 de tal manera que la corriente 71b entra en el intercambiador 440 de calor y la corriente 72a entra en la fuente 470 de calor externa que proporciona la fuente de calor externa adicional que eleva la temperatura de la corriente 72b que sale de la fuente 470 de calor externa para estar sustancialmente cerca a la temperatura de la corriente 73 que sale del intercambiador 440 de calor, como ya se describió más arriba. Las corrientes 72b y 73, se combinan entonces para formar la corriente 74. La rata de flujo de la corriente 71b (y también de la corriente 72a) puede ser controlada por la diferencia de temperatura en el extremo frío del intercambiador 440 de calor. La cantidad de calor externo requerida para superar la insuficiencia de calor descrita anteriormente puede ser minimizada haciendo que la temperatura de la corriente 56 sea tan baja como sea posible y luego minimizando la diferencia de temperatura en el extremo frío del intercambiador 440 de calor. El vapor de agua presente en la corriente 56 que surge de los productos de 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 de agua incrementa grandemente la mCP efectiva de la corriente 56 a la corriente 60 y proporciona todo el calor requerido para calentar la corriente 70 de reciclaje total a la corriente 71. La temperatura de la corriente 56 que sale del intercambiador 400 de calor puede preferiblemente estar alrededor de 5 °C en el punto de rocío de la corriente 56. La diferencia de temperatura en el extremo frío del intercambiador 440 de calor entre las corrientes 56 y 71 puede estar preferiblemente al menos alrededor de 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.

Regresando a la Figura 5, el fluido 236 circulante de CO<sub>2</sub> puede ser precalentado antes de ser recirculado en hacia la cámara 220 de combustión, tal como se describe en relación con el al menos un intercambiador 420 de calor, el cual recibe la corriente 50 de descarga de turbina caliente después del paso a través de la turbina 320 de expansión. Para maximizar la eficiencia del ciclo, puede ser útil operar la turbina 320 de expansión a una temperatura de entrada tan alta como sea posible consistente con los materiales disponibles para la construcción del camino de entrada del gas caliente y de las cuchillas de la turbina sometidas a alta tensión, así como la temperatura máxima permisible en el intercambiador 420 de calor consistente con las presiones de operación del sistema. El camino de entrada caliente de la corriente de entrada a la turbina y las primeras filas de cuchillas de turbina pueden ser enfriados por cualquier medio útil. En algunas realizaciones, la eficiencia puede ser maximizada utilizando parte del fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculado, a alta presión. Específicamente, el fluido circulante de CO<sub>2</sub> a temperatura más baja (por ejemplo, en el rango de aproximadamente 50 °C hasta aproximadamente 200 °C) puede ser extraído del ciclo antes del extremo frío del intercambiador 420 de calor o desde un punto intermedio en el intercambiador 420 de calor cuando se utiliza una serie de unidades de intercambio de calor múltiples (por ejemplo, de las corrientes 71, 72a, 71b, 72b, 73, o 74 en la Figura 8). El fluido de enfriamiento de las cuchillas puede ser descargado desde orificios en la cuchilla de la turbina y ser introducido directamente en el flujo de la turbina.

La operación de un quemador de alta eficiencia, tal como una cámara de combustión enfriada por transpiración descrito aquí, puede producir un gas de combustión el cual es un gas oxidante con concentración de oxígeno en exceso (tal como en el rango de aproximadamente 0.1% a aproximadamente 5% molar). Alternativamente, la cámara de combustión puede producir un gas de combustión el cual es un gas reductor con ciertas concentraciones de uno o más de H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, y NH<sub>3</sub>. Esto es particularmente beneficioso puesto que hace posible de acuerdo con la invención utilizar una turbina de potencia con solamente una unidad de turbina o una serie de unidades de turbina (por ejemplo, 2, 3, o más unidades). De manera beneficiosa, en realizaciones específicas, utilizando una serie de unidades, todas las unidades pueden operar con la misma temperatura de entrada, y esto permite maximizar la generación de potencia para una relación de presión de alimentación a la primera turbina y presión global dada.

Un ejemplo de una unidad 320 de turbina que utiliza dos turbinas 330, 340, operadas en serie en el modo de reducción se muestra en la Figura 9. Como se ve aquí, la corriente 40 de producto de combustión es dirigida a la primera turbina 330. En tales realizaciones, la corriente 40 de producto de combustión está diseñada (por ejemplo, a través del control del combustible usado, la cantidad de O<sub>2</sub> usada, y las condiciones de operación de la cámara de combustión) para ser un gas reductor con uno o más componentes combustibles en el mismo, como se describió más arriba. La corriente 40 de producto de combustión se expande a través de la primera turbina 330 para producir potencia (tal como en asociación con un generador eléctrico, no mostrado en la ilustración) y formar una primera corriente 42 de descarga. Antes de la introducción en la segunda turbina 340, puede agregarse una cantidad predeterminada de O<sub>2</sub> a la primera corriente 42 de descarga de turbina para someter a combustión los componentes inflamables presentes en la primera corriente 42 de descarga de turbina. Esto deja un exceso de oxígeno a la vez que se eleva la temperatura de entrada en la segunda unidad 340 de turbina hasta sustancialmente el mismo valor que la temperatura de entrada de la primera unidad 330 de turbina. Por ejemplo, la temperatura de la corriente 42 de descarga a partir de la primera unidad 330 de turbina puede estar en el rango de aproximadamente 500 °C hasta aproximadamente 1000 °C. Cuando está en el modo reductor, la adición del O<sub>2</sub> a la corriente 42 de descarga a esta temperatura puede hacer que el gas en la corriente sea calentado por combustión del exceso de gas combustible hasta una temperatura en el rango de aproximadamente 700 °C hasta aproximadamente 1600 °C, el cual es sustancialmente el mismo rango de temperatura de la corriente 40 de producto de combustión que sale de la cámara 220 de combustión antes de entrar en la primera unidad 330 de turbina. En otras palabras, la temperatura de operación en la entrada de cada una de las dos turbinas es sustancialmente la misma. En realizaciones específicas, la temperatura de operación en la entrada de las turbinas difiere en no más de aproximadamente 10%, no más de aproximadamente 9%, no más de aproximadamente 8%, no más de aproximadamente 7%, o no más de aproximadamente 6%, no más de aproximadamente 5%, no más de aproximadamente 4%, no más de aproximadamente 3%, no más de aproximadamente 2%, o no más de aproximadamente 1%. Podrían cumplirse etapas de recalentamiento similares para unidades de turbina adicionales hasta que permanezca el nivel de combustible residual. La combustión puede ser potenciada mediante el uso de un catalizador adecuado en el espacio de combustión de alimentación de oxígeno, si se requiere.

En ciertas realizaciones, un ciclo de potencia como se describe aquí puede ser utilizado para retroajustar estaciones de potencia existentes, por ejemplo por la introducción un fluido de calentamiento a alta temperatura como a alta presión (por ejemplo, "la corriente de descarga de turbina descrito aquí) en el ciclo de sobrecalentamiento de vapor de una estación de potencia de ciclo Rankine convencional. Esta podría ser una estación de potencia de quema de carbón o nuclear con un ciclo de calor de reactor de agua en ebullición (BWR) o un reactor de agua presurizada (PWR). Esto incrementa efectivamente la eficiencia y la generación de potencia de la estación de potencia Rankine de vapor sobrecalentándolo a una temperatura bastante más alta que la temperatura máxima del vapor sobrecalentado producido en el sistema existente. En el caso de una caldera de quema de carbón pulverizado, las temperaturas de vapor frecuentemente llegan hasta un máximo de aproximadamente 600°C mientras que las condiciones del vapor en una estación de potencia nuclear generalmente llegan hasta aproximadamente 320°C. Utilizando el sobrecalentamiento posible con el intercambio de calor en los sistemas y métodos de la presentes invención, la temperatura del vapor puede ser elevada a por encima de 700°C. Esto lleva a una conversión directa

- de la energía calorífica a potencia de eje extra puesto que el combustible adicional quemado para sobrecalentar el vapor es convertido en potencia extra en la estación de potencia basada en vapor sin incrementar la cantidad de vapor condensado. Esto puede ser logrado proveyendo una unidad de intercambio de calor secundaria. Por ejemplo, la corriente de descarga de turbina descrita en relación con los presentes métodos y sistemas de la invención podría ser dirigida a través de la unidad de intercambio de calor secundaria antes de pasar a través de la unidad de intercambio de calor primaria, como se describe de otra manera aquí. El calor obtenido en la unidad de intercambio de calor secundaria puede ser utilizado para sobrecalentar el vapor de la caldera, como se describe más arriba. El vapor sobrecalentado podría ser dirigido a una o más turbinas para generar potencia. La corriente de descarga de turbina, después de pasar a través de la unidad de intercambio de calor secundaria, podría ser entonces dirigida a la unidad de intercambio de calor primaria, como se describe aquí de otra manera. Tal sistema y método está descrito en el Ejemplo 2 y se ilustra en la Figura 12. Además, es posible tomar el vapor a baja presión de la entrada de turbina de vapor final y utilizarlo para calentar parte del fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculado, como se describe más arriba. En realizaciones específicas, el condensado de la estación de potencia de vapor puede ser calentado a una temperatura intermedia antes de la desaireación utilizando la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub>, lo cual sale del extremo frío de la unidad intercambiadora de calor (por ejemplo, a una temperatura de aproximadamente 80°C en algunas realizaciones). Este calentamiento normalmente utiliza vapor desviado tomado de la entrada a la etapa de la turbina de vapor LP final de tal manera que el efecto neto sobre la eficiencia la estación de potencia de vapor del déficit por el presente calentamiento de corriente lateral es compensado por el precalentamiento de condensado, el cual que conserva el vapor desviado.
- El método general descrito más arriba para la producción de potencia (esto es, un ciclo de potencia) puede ser implementado de acuerdo con la invención utilizando un sistema de producción de potencia adecuado como se describe aquí. En general, un sistema de producción de potencia utilizado en el método de acuerdo con la invención puede comprender cualquiera de los componentes descritos aquí en relación con el método de producción de potencia. Por ejemplo, un sistema de producción de potencia puede comprender una cámara de combustión para someter a combustión un combustible que contiene carbono en la presencia de O<sub>2</sub> y un fluido circulante de CO<sub>2</sub>. Específicamente, la cámara de combustión puede ser una cámara de combustión enfriada por transpiración, como se describe aquí; sin embargo, también pueden usarse aquí otras cámaras de combustión capaces de operar bajo las condiciones descritas de otra manera. La cámara de combustión específicamente puede ser caracterizada en relación con las condiciones de combustión bajo las cuales opera, así como por los componentes específicos de la cámara de combustión misma. En algunas realizaciones, el sistema puede comprender uno o más inyectores para proporcionar el combustible que contiene carbono (y opcionalmente un medio fluidizante) el O<sub>2</sub>, y el fluido circulante de CO<sub>2</sub>. El sistema puede incluir componentes para la eliminación de residuos líquidos. La cámara de combustión puede producir un gas combustible a una temperatura a la cual las partículas de cenizas sólidas pueden ser filtradas efectivamente del gas, y el gas puede ser mezclado con el CO<sub>2</sub> enfriado y ser quemado en una segunda cámara de combustión. La cámara de combustión puede incluir al menos una etapa de combustión que somete a combustión el combustible que contiene carbono en la presencia del fluido circulante de CO<sub>2</sub> para proporcionar una corriente de producto de combustión que comprende CO<sub>2</sub> a una presión y temperatura como las que se describen aquí.
- El sistema puede comprender adicionalmente una turbina de producción de potencia en comunicación fluida con la cámara de combustión. La turbina puede tener una entrada para recibir la corriente del producto de combustión y una salida para liberar una corriente de descarga de turbina que comprende CO<sub>2</sub>. La potencia puede ser producida como a medida que la corriente fluida se expande, estando diseñada la turbina para mantener la corriente fluida a una relación de presión deseada ( $I_p/O_p$ ), tal como se describe aquí.
- El sistema puede comprender adicionalmente al menos un intercambiador de calor en comunicación fluida con la turbina para recibir la corriente de descarga de turbina y enfriar la corriente para formar una corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> enfriada. De la misma manera, el al menos un intercambiador de calor puede ser utilizado para calentar el fluido circulante de CO<sub>2</sub> que es ingresado a la cámara de combustión. El o los intercambiadores de calor específicamente pueden ser caracterizados en relación con los materiales de los cuales están construidos que permiten la operación bajo condiciones específicas como se describe aquí.
- El sistema también puede comprender uno o más dispositivos para separar la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> que sale del intercambiador de calor hacia el CO<sub>2</sub> y uno o más componentes adicionales para recuperación o desecho. Específicamente, el sistema puede comprender medios para separar agua (u otras impurezas descritas aquí) de la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub>.
- El sistema puede comprender adicionalmente uno o más dispositivos (por ejemplo, compresores) en comunicación fluida con el al menos un intercambiador de calor (y/o en comunicación fluida con uno o más de los dispositivos de separación) para comprimir el fluido circulante de CO<sub>2</sub> purificado. Además, el sistema puede comprender medios para separar el fluido circulante de CO<sub>2</sub> en dos corrientes, una corriente para paso a través del intercambiador de calor y hacia la cámara de combustión y una segunda corriente para suministrar a una tubería presurizada (u otros medios para retención y/o forma de desecho del CO<sub>2</sub>).
- En algunas realizaciones, pueden incluirse incluso componentes adicionales en el sistema. Por ejemplo, el sistema puede comprender una unidad de separación de O<sub>2</sub> para administrar O<sub>2</sub> a la cámara de combustión (o en un inyector

o dispositivo similar para mezclar el O<sub>2</sub> con uno o más materiales adicionales). En algunas realizaciones, la unidad de separación de aire puede generar calor. Así, puede ser útil para el sistema comprender adicionalmente uno o más componentes de transferencia de calor que transfieran calor desde la unidad de separación de aire a la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> corriente arriba de la cámara de combustión. En realizaciones adicionales, un sistema de acuerdo con la invención puede comprender cualquiera y todos los componentes descritos de otra manera aquí en relación con el ciclo de generación de potencia y los métodos de generación de potencia.

En realizaciones adicionales, la invención abarca métodos particularmente útiles en la producción de potencia utilizando un combustible (tal como carbón) que deja un residuo incombustible en la combustión. En ciertas realizaciones, tales materiales incombustibles pueden ser removidos de la corriente de producto de combustión a través del uso de un dispositivo apropiado, tal como un aparato de eliminación de contaminantes ilustrado en la Figura 4. En otras realizaciones, sin embargo, puede ser útil manejar los materiales incombustibles a través del uso de un sistema y método con cámaras de combustión múltiples, tal como se ilustra en la Figura 10.

Como se muestra en la Figura 10, el combustible 254 de carbón puede ser pasado a través de un aparato 900 de molienda para proporcionar un carbón pulverizado. En otras realizaciones, el combustible 254 de carbón podría ser provisto en una condición en forma de partículas. En realizaciones específicas, el carbón puede tener un tamaño de partícula promedio de aproximadamente 10 µm hasta aproximadamente 500 µm, aproximadamente 25 µm hasta aproximadamente 400 µm, o aproximadamente 50 µm hasta aproximadamente 200 µm. En otras realizaciones, el carbón puede ser descrito en 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 promedio de menos de aproximadamente 500 µm, 450 µm, 400 µm, 350 µm, 300 µm, 250 µm, 200 µm, 150 µm o 100 µm. El carbón pulverizado puede ser mezclado con una sustancia fluidizante para proporcionar el carbón en la forma de un lodo. En la Figura 10, el carbón pulverizado es combinado en el mezclador 910 con una extracción 68 lateral de CO<sub>2</sub> del fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculado. En la Figura 10, la extracción 68 lateral de CO<sub>2</sub> es extraída de la corriente 67, la cual ha sufrido el procesamiento para proporcionar el fluido circulante de CO<sub>2</sub> en un estado de alta densidad supercrítico. En realizaciones específicas, el CO<sub>2</sub> utilizado para formar el lodo 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 extracción 68 lateral de CO<sub>2</sub> puede cooperar con el carbón en partículas para formar un lodo 255 que tiene, por ejemplo, entre 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> de la extracción lateral 68 usado para formar el lodo puede estar a una temperatura de menos de aproximadamente 0 °C, menos de aproximadamente -10 °C, menos de aproximadamente -20 °C, o menos de aproximadamente -30 °C. En realizaciones adicionales, el CO<sub>2</sub> de la extracción 68 lateral utilizado para formar el lodo puede estar a una temperatura de aproximadamente 0 °C hasta aproximadamente -60 °C, aproximadamente -10 °C hasta aproximadamente -50 °C, o aproximadamente -18 °C hasta aproximadamente -40 °C.

El lodo 255 carbón pulverizado/CO<sub>2</sub> es transferido desde el mezclador 910 a través de la bomba 920 a una cámara de combustión 930 de oxidación parcial. Se forma una corriente de O<sub>2</sub> utilizando una unidad 30 de separación de aire que separa el aire 241 en O<sub>2</sub> purificado, como se describe aquí. La corriente de O<sub>2</sub> es dividida en la corriente 243 de O<sub>2</sub>, la cual es dirigida a la cámara de combustión 930 de oxidación parcial, y la corriente 242 de O<sub>2</sub>, la cual es dirigida a la cámara 220 de combustión. En la realización de la Figura 10, una corriente 86 de CO<sub>2</sub> es extraída de la corriente 85 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculada para uso en el enfriamiento de la cámara de combustión 930 de oxidación parcial. En realizaciones adicionales, el CO<sub>2</sub> para uso en el enfriamiento de la cámara de combustión 930 de oxidación parcial puede ser tomado de la corriente 236 en vez de la corriente 86 o, el CO<sub>2</sub> puede ser tomado tanto de la corriente 86 como de la corriente 236. Preferiblemente, la cantidad de CO<sub>2</sub> extraído es suficiente para enfriar la temperatura de la corriente 256 de tal manera que la ceniza está presente en forma sólida y puede ser removida con seguridad. Como se describe de otra manera aquí, el CO<sub>2</sub>, el carbón y el O<sub>2</sub> son provistos a la cámara de combustión 930 de oxidación parcial en relaciones tales que el carbón es oxidado solo parcialmente para producir una corriente 256 de producto de combustión 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<sub>3</sub>. El CO<sub>2</sub>, el carbón y el O<sub>2</sub> también son introducidos en la cámara de combustión 930 de oxidación parcial en relaciones necesarias de tal manera que la temperatura de la corriente 256 de producto de combustión oxidado parcialmente es suficiente más baja de forma que toda la ceniza presente en la corriente 256 está en la forma de partículas sólidas que pueden ser removidas fácilmente por uno o más separadores ciclónicos y/o filtros. La realización de la Figura 10 ilustra la eliminación de cenizas a través del filtro 940. En realizaciones específicas, la temperatura de la corriente 256 de combustión oxidada parcialmente puede ser menos de aproximadamente 1100 °C, menos de aproximadamente 1000 °C, menos de aproximadamente 900 °C; menos de aproximadamente 800 °C, o menos de aproximadamente 700 °C. En realizaciones adicionales, la temperatura de la corriente 256 de combustión oxidada parcialmente puede ser aproximadamente 300 °C hasta aproximadamente 1000 °C, aproximadamente 400 °C hasta aproximadamente 950 °C, o aproximadamente 500 °C hasta aproximadamente 900 °C.

La corriente 257 de combustión oxidada parcialmente, filtrada puede ser ingresada directamente en la segunda cámara 220 de combustión, el cual puede ser una cámara de combustión enfriada por transpiración, como se describe de alguna otra manera aquí. Este ingreso es provisto junto con la corriente 242 de O<sub>2</sub>, y la corriente 236 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculada. La combustión en este punto puede proceder de manera similar a como se ha

descrito de otra manera aquí. Los materiales combustibles en la corriente 256 de combustión oxidada parcialmente son sometidos a combustión en la cámara 220 de combustión en la presencia de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> para proporcionar la corriente 40 de combustión. Esta corriente es expandida a través de una turbina 320 para producir potencia (por ejemplo, a través del generador 1209). La corriente 50 de descarga de turbina es pasada a través de una unidad 420 de intercambio de calor (la cual puede ser una serie de intercambiadores de calor, tal como se describe en relación con la Figura 8). La corriente 60 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> 60 es pasada a través del intercambiador 530 de calor enfriado por agua para formar la corriente 61, la cual es pasada al separador 540 para eliminación 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 con la Figura 12 más abajo. Preferiblemente, el separador 540 comprende un reactor que proporciona un contactor con suficientes tiempos de residencia de tal manera que las impurezas puedan reaccionar con el agua para formar materiales (por ejemplo, ácidos) que son removidos fácilmente. La corriente 65 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> purificada es pasada a través de un primer compresor 630 para formar la corriente 66, la cual es enfriada con el intercambiador 640 de calor enfriado por agua para proporcionar el fluido 67 circulante de CO<sub>2</sub> de alta densidad, supercrítico. Como se describió más arriba, una porción de la corriente 67 puede ser extraída como corriente 68 para uso como medio fluidizante en el mezclador 910 para formar la corriente 255 de suspensión de carbón. La corriente 67 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> de alta densidad, supercrítica es de otra manera presurizada adicionalmente en el compresor 650 para formar la corriente 70 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> de alta densidad, presurizada. Una porción del CO<sub>2</sub> en la corriente 70 puede ser extraída en el punto 720, según se describe aquí en relación con la Figura 5 y la Figura 11 para proporcionar la corriente 80 a una tubería de CO<sub>2</sub> u otros medios de retención. La porción remanente de CO<sub>2</sub> procede como corriente 85 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> de alta densidad, supercrítica, una porción de la cual puede ser extraída como corriente 86 para utilizarla para el enfriamiento de la cámara de combustión 930 de oxidación parcial, como se describió más arriba. De otra manera, la corriente 85 es pasada de regreso a través del intercambiador 420 de calor (o serie de intercambiadores de calor, como se describe en relación con la Figura 8) para calentar la corriente y finalmente desde la corriente 236 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculada para ingresar en la cámara 220 de combustión. Como se describió más arriba, puede utilizarse una fuente de calor externa en combinación con la unidad 420 intercambiadora de calor para proporcionar la eficiencia necesaria. De la misma manera, pueden aplicarse otros parámetros de sistema y método como los descritos aquí de otra forma al sistema y método de acuerdo con la Figura 10, tales como temperaturas y presiones de corriente, así como otras condiciones de operación para la unidad 320 de turbina, la unidad 420 intercambiadora de calor 420, la unidad 520 de separación, y la unidad 630 compresora.

#### Parte experimental

La invención es descrita adicionalmente a continuación en relación con ejemplos específicos. Los ejemplos se proporcionan para ilustrar ciertas realizaciones de la invención y no deben considerarse como limitantes de la invención.

#### Ejemplo 1

Método para la producción de potencia con combustión de metano utilizando un fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculado

Un ejemplo específico de un método de acuerdo con la presente invención está ilustrado en la Figura 11. La siguiente descripción describe el sistema en relación con un ciclo específico bajo condiciones específicas utilizando modelación por ordenador.

En este modelo, una corriente 254 de combustible metano (CH<sub>4</sub>) a una temperatura de 134 °C y una presión de 30.5 MPa es combinada con una corriente 236 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculada a una temperatura de 860 °C y una presión de 30.3 MPa (y así en un estado de fluido supercrítico) en un mezclador 252 antes de introducirla en una cámara 220 de combustión enfriada por transpiración. Una unidad 30 de separación de aire es utilizada para proporcionar O<sub>2</sub> 242 concentrado a una temperatura de 105 °C y una presión de 30.5 MPa. La unidad de separación de aire también produce calor (Q) que es extraído para uso en el proceso. El O<sub>2</sub> 242 es combinado en la cámara 220 de combustión con la corriente 254 de combustible de metano y el fluido 236 circulante de CO<sub>2</sub> donde ocurre la combustión para proporcionar la corriente 40 de producto de combustión a una temperatura de 1189 °C y una presión de 30 MPa. El CO<sub>2</sub>, el O<sub>2</sub> y el metano son provistos en una relación molar de aproximadamente 35:2:1 (esto es, lbmol/hr - libras moles por hora). La combustión en esta realización utiliza entrada de energía a una tasa de 363932 kJ/hr (344 935 Btu/hr).

La corriente 40 del producto de combustión es expandida a través de la turbina 320 para producir la corriente 50 de descarga de turbina a una temperatura de 885 °C y una presión de 5 MPa (estando el CO<sub>2</sub> en la corriente 50 de descarga de turbina en un estado gaseoso). La expansión de la corriente 40 de producto de combustión a través de la turbina 320 produce potencia a una tasa de 83.5 kilovatios por hora (kW/h).

La corriente 50 de descarga de turbina es pasada entonces a través de una serie de tres intercambiadores de calor que enfrían sucesivamente la corriente para eliminar componentes secundarios. El paso a través del primer intercambiador 430 de calor produce la corriente 52 a una temperatura de 237 °C y una presión de 5 MPa. La

corriente 52 es pasada a través del segundo intercambiador 440 de calor para producir la corriente 56 a una temperatura de 123 °C y a una presión de 5 MPa. La corriente 56 es pasada a través del tercer intercambiador 450 de calor para producir la corriente 60 a una temperatura de 80 °C y una presión de 5 MPa.

5 Después del paso del fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculado a través de la serie de intercambiadores de calor, la corriente 60 es incluso enfriada adicionalmente por paso a través de un intercambiador 530 enfriado con agua. El agua (C) a una temperatura de 24 °C es circulada a través del intercambiador 530 enfriado por agua para enfriar la corriente 60 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> a una temperatura de 27 °C y así condensa cualquier agua presente en la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub>. La corriente 61 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> enfriada es pasada entonces a través de una unidad 540 de separación de agua de tal manera que el agua líquida es removida y descargada como corriente 62a. La corriente 65 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> "seca" es descargada de la unidad 540 de separación de agua a una temperatura de 34 °C y una presión de 3 MPa

15 La corriente 65 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> seca (la cual está todavía en estado gaseoso) es pasada a continuación a través de una primera unidad 630 de compresión en un esquema de presurización de dos etapas. La corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> es presurizada a 8 MPa, lo cual probablemente eleva la temperatura de la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> a 78 °C. Esto requiere una entrada de potencia de 5.22 kW/hora. Esta corriente 66 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> en fluido supercrítico es pasada entonces a un segundo intercambiador 640 de calor enfriado por agua, en donde la 66 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> en fluido supercrítico es enfriada con agua a una temperatura de 24 °C para producir una corriente 67 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> en fluido supercrítico a una temperatura de 27 °C, una presión de 8 MPa y una densidad de 762 kg/m<sup>3</sup>. Esta corriente es pasada entonces a través de una segunda unidad 650 de compresión para formar la corriente 70 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizado a una temperatura de 69 °C y una presión de 30.5 MPa. Esto requiere una entrada de potencia de 8.23 kW/hora. Esta corriente es pasada a través de un divisor 720 de tubería mediante el cual 1 lbmol de CO<sub>2</sub> es dirigida a una tubería presurizada a través de la corriente 80, y 34.1 lbmol de CO<sub>2</sub> es dirigida a corriente 85 de regreso a través de la serie de tres intercambiadores de calor para recalentar la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> antes de entrar a la cámara 220 de combustión.

25 La corriente 85 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> presurizada es pasada a través del tercer intercambiador 450 de calor para formar la corriente 71 a una temperatura de 114 °C y una presión de 30.5 MPa. La corriente 71 es pasada a través del divisor 460 de tal manera que 27.3 lbmol de CO<sub>2</sub> son dirigidos como corriente 71b al segundo intercambiador 440 de calor, y 6.8 lbmol de CO<sub>2</sub> son dirigidos en la corriente 72a a través de un calentador 470 lateral. La corriente 71b y la corriente 72a tienen cada una una temperatura de 114 °C a una presión de 30.5 MPa. El calentador 470 lateral utiliza calor (Q) de la unidad 30 separadora de aire para proporcionar calor adicional a la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub>. El paso de la corriente 71b a través del segundo intercambiador 440 de calor 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 calentador 470 lateral forma la corriente 72b la cual de la misma manera está a una temperatura de 224 °C y una presión de 30.4 MPa. Las corrientes 73 y 72b son combinadas en el mezclador 480 para formar la corriente 74 a una temperatura de 224 °C y una presión de 30.3 MPa. La corriente 74 es pasada entonces a través del primer intercambiador 430 de calor para proporcionar la corriente 236 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculada a una temperatura de 860 °C y una presión de 30.0 MPa para entrada de regreso a la cámara 220 de combustión

40 La eficiencia del ciclo anterior modelado fue calculada con base en la energía generada en comparación con el LHV del combustible de metano y la entrada de energía adicional en el sistema, como se describió más arriba. Bajo las condiciones modeladas, se alcanzó una eficiencia de aproximadamente 53.9%. Esto es particularmente sorprendente porque puede lograrse una eficiencia tan excelente a la vez que simultáneamente se evita la descarga atmosférica de cualquier CO<sub>2</sub> (particularmente cualquier CO<sub>2</sub> que surge de la combustión del combustible que contiene carbono).

#### Ejemplo 2

45 Método para la producción de potencia con un retroajuste de una estación de potencia de carbón pulverizado para utilizar un fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculado

Otro ejemplo específico de un sistema y método de acuerdo con la presente invención está ilustrado en la Figura 12.

La siguiente descripción describe el sistema en relación con un ciclo específico bajo condiciones específicas utilizando una modelación matemática.

50 En este modelo, se ilustra la habilidad de retroajustar un sistema y método tal como se describe aquí a una estación de potencia de quema de carbón pulverizado convencional.

55 Una corriente 1056 de O<sub>2</sub> a una presión de 30.5 MPa es introducida en una cámara 220 de combustión enfriada por transpiración junto con un combustible 1055 que contiene carbono (por ejemplo, gas derivado de carbón producido por oxidación parcial) a una presión de 30.5 MPa y una corriente 1053 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> a una presión de 30.5 MPa. El O<sub>2</sub> puede ser recibido de un separador de aire o dispositivo similar que puede producir calor (Q), el cual puede ser extraído para uso en el sistema, tal como para producir vapor para expansión o para agregar calor a

la corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub>. La combustión del combustible en la cámara 220 de combustión produce una corriente 1054 de producto de combustión a una temperatura de 1150 °C y una presión de 30.0 MPa. Esta corriente es expandida a través de una turbina 320 (la cual en general puede denominarse como una turbina de producción de potencia primaria) para producir potencia impulsando un generador 1209 eléctrico. La corriente 1001 de descarga de turbina en expansión a una temperatura de 775 °C y una presión de aproximadamente 3.0 MPa es introducida en el extremo caliente de un intercambiador 1100 de calor, en donde el calor de la corriente 1001 de descarga de turbina se utiliza para sobrecalentar el flujo 1031 de vapor a alta presión y el flujo 1032 de vapor a presión intermedia producido en una estación 1800 de potencia por quema de carbón pulverizado convencional. El agua 1810 de alimentación de la caldera y el carbón 1810 son ingresados en la estación 1800 de potencia para producir los flujos 1031 y 1032 de vapor por combustión del carbón 1810. La transferencia de calor en el intercambiador sobrecalienta los flujos 1031 y 1032 de vapor desde una temperatura de aproximadamente 550 °C hasta una temperatura de aproximadamente 750 °C para formar los flujos 1033 y 1034 de vapor, los cuales son regresados a la estación de potencia como se describe más adelante. Este método alcanza temperaturas de vapor muy altas sin la necesidad de utilizar costosas aleaciones para alta temperatura en las grandes calderas de vapor de una estación de potencia convencional que quema carbón a casi la presión atmosférica. Los flujos 1033 y 1034 de vapor son expandidos en una turbina 1200 de tres etapas (la cual puede ser denominada generalmente como turbina de producción de potencia secundaria) que impulsa un generador 1210 eléctrico. El vapor 1035 que sale de la turbina 1200 es condensado en un condensador 1220. El condensado 1036 tratado es bombeado a alta presión con una bomba 1230 alimentada con agua y luego es vaporizada y sobrecalentada en la caldera 1800 de quema de carbón para descarga en el intercambiador 1100 de calor, como se describe más arriba. Este sistema se utiliza para incrementar la generación de potencia y la eficiencia de una estación de potencia de quema de carbón existente.

El intercambiador 100 de calor es un intercambiador de calor de placa unida de difusión tipo Heatric con pasos molidos químicamente contruidos típicamente con una aleación con contenido alto de níquel para alta temperatura, tal como aleación 617, la cual es capaz de manejar altas presiones y temperaturas permitiendo un significativo sobrecalentamiento y operación de vapor bajo condiciones de oxidación. Este intercambiador de calor es una unidad de transferencia de calor de alta eficiencia con coeficientes de transferencia de calor altos para todos los fluidos.

La porción remanente del sistema y el método ilustrado en la Figura 12 es similar en estructura y operación a los sistemas y métodos descritos de otra manera aquí. Específicamente, la corriente 1001 de descarga de turbina por expansión es enfriada en el intercambiador 1100 de calor y sale del extremo frío del intercambiador 1100 de calor como una corriente 1037 de descarga, la cual está a una temperatura de 575 °C. Esta corriente 1037 es pasada entonces a través de un segundo intercambiador 1300 de calor en donde es enfriada a una temperatura de 90 °C y a una presión de 2.9 MPa para formar la corriente 1038. Esta corriente es enfriada adicionalmente contra una porción del condensado 1057 del condensador 1230 de la estación de potencia en un tercer intercambiador 1310 de calor hasta una temperatura de 40 °C para formar la corriente 1039, la cual es enfriada adicionalmente hasta una temperatura de 27 °C de nuevo contra agua de enfriamiento en un intercambiador 1320 de calor con agua fría para formar la corriente 1040 a una presión de 2.87 MPa. El intercambiador 1300 de calor puede ser una unidad de difusión de acero inoxidable Heatric 310.

La corriente 1040 enfriada a 30 °C es alimentada a la base de una columna 1330 empacada, la cual está equipada con una bomba 1340 de circulación que proporciona una corriente circulación de ácido débil en contracorriente que da un contacto en contracorriente entre el gas que entra y ácido débil de limpieza. Los SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, NO, y NO<sub>2</sub> son convertidos 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 de la columna 1330 es removido en la línea 1042 y la presión es reducida a presión atmosférica y entra a un separador 1360. El CO<sub>2</sub> disuelto se libera en la línea 1043, es comprimido utilizando una bomba 1350 a una presión de 2,85 MPa, y fluye como la corriente 1044 para unirse con la corriente 1045 que sale de la parte superior de la columna 1330. Estas corrientes combinadas forman el fluido circulante de CO<sub>2</sub> que será recirculado de regreso a la cámara de combustión. El H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y HNO<sub>3</sub> diluidos en agua salen como la corriente 1046 de la base del separador 1360. Las concentraciones dependen de la composición del combustible y la temperatura en la columna 1330 de contacto. Nótese que el ácido nítrico preferiblemente está presente en la corriente 1046 ácida, y como ácido nítrico reaccionará con el mercurio presente y eliminará esta impureza completamente.

La corriente de fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculada que entra al compresor 1380 es secada primero a un punto de rocío de aproximadamente -60 °C en un secador desecante y luego purificada para eliminar O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar utilizando un esquema de separación a baja temperatura, tal como el mostrado en la solicitud de Patente Europea EP1952874 A1.

La corriente 1047 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculada, comprimida que sale del compresor 1380 a una presión de 8,5 MPa es enfriada contra agua de enfriamiento a 27 °C en un intercambiador de calor 1370 enfriado por agua formándose una corriente 1048 de fluido de CO<sub>2</sub> supercrítico, la cual es bombeada a una presión de 30,5 MPa y a una temperatura de 74 °C en la bomba 1390 para formar la corriente 1050 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculada a alta presión. Una porción del CO<sub>2</sub> es removida de la corriente 1050 como corriente 1049 de producto de CO<sub>2</sub> para ser retenida o de alguna otra manera sometida a desecho sin descarga a la atmósfera. En esta realización, la

corriente 1049 de producto de CO<sub>2</sub> es reducida en presión a la presión de tubería requerida de aproximadamente 20 MPa y pasada hacia una tubería de CO<sub>2</sub>.

5 La porción remanente de la corriente (ahora corriente 1051) de fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculada, a alta presión entra al extremo frío del intercambiador 1300 de calor. Esta corriente, que es un fluido supercrítico denso a 74 °C, debe recibir una cantidad considerable de calor de grado bajo para convertirse en un fluido con un calor específico mucho más bajo a una temperatura de 237 °C. En esta realización, tal calor de grado bajo es provisto por una corriente 1052 de vapor LP a una presión de 0,65 MPa tomada desde la corriente de vapor que entra a la turbina de vapor de baja presión de la estación de potencia convencional junto con el calor adiabático de compresión derivado de los compresores de aires en la planta de oxígeno criogénica que suministra la corriente 1056 de O<sub>2</sub>. El vapor a 10 baja presión sale del intercambiador 1300 de calor como corriente 1301. Opcionalmente, todo el calor puede ser provisto utilizando un cierto número de corrientes de vapor disponibles de la estación de potencia de quema de carbón a presiones de hasta 3,8 MPa. Esta energía también podría ser provista a partir del calor (Q) formado por la unidad de separación de aire, como se describió más arriba. El calentamiento de la corriente lateral de parte de la corriente de CO<sub>2</sub> recirculada proporciona una gran parte del calor requerido en el extremo frío del intercambiador 1300 de calor y permite una diferencia de temperatura pequeña de sólo aproximadamente 25 °C en el extremo caliente del intercambiador 1300 de calor, lo cual incrementa la eficiencia total.

20 La corriente 1053 de fluido circulante de CO<sub>2</sub> recirculada a alta temperatura, alta presión, sale del intercambiador 1300 de calor a una temperatura de 550 °C y entra en la cámara 220 de combustión, donde es usada para enfriar los gases de combustión derivados de la combustión de una corriente 1055 de gas natural (en esta realización) con la corriente 1056 de oxígeno de 97% molar para producir la corriente 1054 de producto de combustión, como se describe más arriba. En esta realización, el camino caliente a la turbina y las primeras filas de cuchillas de la turbina son enfriadas utilizando una corriente 1058 de CO<sub>2</sub> 1058 tomada de la corriente 1050 de descarga de bomba a una temperatura de 74 °C.

25 Si el sistema descrito más arriba es operado en una estación de potencia independiente con combustible de gas natural simulado por CH<sub>4</sub> puro, entonces la corriente 1053 de CO<sub>2</sub> recirculada entra a la cámara de combustión a una temperatura de aproximadamente 750 °C y el desfogue 1001 de la turbina entra en el intercambiador 1300 de calor a una temperatura de aproximadamente 775 °C.

30 La eficiencia del sistema de potencia separado en esta realización es 53.9% (LHV). Esta cifra incluye el consumo de potencia para la planta criogénica de O<sub>2</sub> y la alimentación de gas natural y los compresores de CO<sub>2</sub>. Si el combustible fuera un carbón simulado con un valor de calentamiento de 27.92 MJ/kg (por ejemplo, parcialmente oxidado con eliminación de cenizas en una primera cámara de combustión y unidad de filtración seguida por la combustión del gas combustible y la mezcla del 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 del carbono en el combustible sería producido a una presión de tubería de 20 MPa.

35 El método descrito anteriormente e ilustrado en la Figura 12 con combustible de carbón puede ser caracterizado por ser aplicado a una estación de potencia con parámetros específicos descritos a continuación. El efecto de convertir una estación de potencia con quema de carbón pulverizado de acuerdo con la presente invención se calcula como sigue:

Condiciones de 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.
	Generación de potencia neta:	493.7 Mw
	Carbón para estación existente:	1256.1 Mw
	Eficiencia (LHV) neta	39.31%
	% captura de CO <sub>2</sub> :	0

40 Planta convertida con mejora de la estación existente incorporando un sistema y método divulgado en el presente documento:

## ES 2 537 181 T3

Generación neta de potencia del sistema de potencia de CO <sub>2</sub> :	371.7 Mw
Potencia neta de la estación existente:	639.1 Mw
Potencia neta total:	1010.8Mw
Carbón para sistema de potencia con CO <sub>2</sub> :	1053.6 Mw
Carbón para estación existente:	1256.1 Mw
Eficiencia total neta (LHV):	43,76%
% captura de CO <sub>2</sub> :	45,6%*

---

\*Nótese que no se captura CO<sub>2</sub> de la estación existente en este ejemplo

Muchas modificaciones y otras realizaciones de la invención vendrán a la mente de los experimentados en la técnica a la cual es pertinente esta invención teniendo el beneficio de las enseñanzas presentadas en las descripciones anteriores y en los dibujos asociados.

## REIVINDICACIONES

1. Un método para generación de potencia que comprende:

- 5 introducir un combustible (254) que contiene carbono, O<sub>2</sub> (242) y un fluido (236) circulante de CO<sub>2</sub> en una cámara de combustión (220), siendo introducido el CO<sub>2</sub> a una presión de al menos aproximadamente 12 MPa y una temperatura de al menos aproximadamente 400 °C;
- 10 someter a combustión el combustible (242) que contiene carbono para proporcionar una corriente (40) de producto de combustión que comprende CO<sub>2</sub>, teniendo la corriente (40) de producto de combustión una temperatura de al menos aproximadamente 800 °C;
- 15 expandir la corriente (40) de producto de combustión a través de una turbina (320) para generar potencia, teniendo la turbina (320) una entrada para recibir la corriente (40) de producto de combustión y una salida para liberar una corriente (50) de descarga de turbina que comprende CO<sub>2</sub>, en donde la relación de la presión de la corriente (40) de producto de combustión en la entrada en comparación con la presión de la corriente (50) de descarga de turbina en la salida es menor de aproximadamente 12;
- 20 retirar calor de la corriente (50) de descarga de turbina pasando la corriente (50) de descarga de turbina a través de una unidad (420) de intercambio de calor primaria para proporcionar una corriente (60) de descarga de turbina enfriada;
- eliminar de la corriente (60) de descarga de turbina enfriada uno o más componentes secundarios que están presentes en la corriente (60) de descarga de turbina enfriada además de CO<sub>2</sub> para proporcionar una corriente (65) de descarga de turbina enfriada purificada;
- 25 comprimir la corriente (65) de descarga de turbina enfriada, purificada con un primer compresor (630) hasta una presión por encima de la presión crítica de CO<sub>2</sub> para proporcionar una corriente (66) fluida circulante de CO<sub>2</sub> supercrítico;
- enfriar la corriente (66) fluida circulante de CO<sub>2</sub> supercrítico hasta una temperatura donde su densidad es al menos aproximadamente 200 kg/m<sup>3</sup>;
- 30 pasar el fluido (67) circulante de CO<sub>2</sub> de alta densidad, supercrítico a través de un segundo compresor (650) para presurizar el fluido (70) circulante de CO<sub>2</sub> a la presión requerida para entrada a la cámara de combustión;
- pasar (70) circulante de CO<sub>2</sub> a alta presión, de alta densidad, supercrítico, a través de la misma unidad (420) de intercambio de calor primaria de tal manera que el calor extraído es utilizado para incrementar la temperatura de fluido (70) circulante de CO<sub>2</sub>;
- 35 suministrar una cantidad adicional de calor (Q) al fluido (70) circulante de CO<sub>2</sub> a alta presión, de alta densidad, supercrítico, para incrementar la temperatura del fluido (70) circulante de CO<sub>2</sub> de manera que la diferencia entre la temperatura del fluido (70) circulante de CO<sub>2</sub> que sale de la unidad (420) de intercambio de calor primaria para recircular a la cámara de combustión (220) y la temperatura de la corriente (50) de descarga de turbina es menor de aproximadamente 50 °C; y
- 40 recircular el fluido (70) circulante de CO<sub>2</sub> de alta densidad, supercrítico, calentado, hacia la cámara de combustión
2. El método de la reivindicación 1, en donde dicha etapa de eliminación comprende enfriar adicionalmente la corriente (50) de descarga de turbina (50) contra un medio de enfriamiento a temperatura ambiente, opcionalmente en donde dicho enfriamiento adicional condensa agua (62a) junto con uno o más componentes secundarios para formar una disolución que comprende uno o más de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, HCl, y mercurio.
- 45 3. El método de la reivindicación 1, en donde una corriente (80) de CO<sub>2</sub> producto es retirada de la corriente (70) de fluido circulante de CO<sub>2</sub> a alta presión, de alta densidad, supercrítica antes de pasar a través de la unidad (420) de intercambio de calor primaria, opcionalmente en donde la corriente (80) de CO<sub>2</sub> producto comprende sustancialmente todo el CO<sub>2</sub> formado por la combustión del carbono en el combustible (254) que contiene carbono, y/o opcionalmente en donde la corriente (80) de CO<sub>2</sub> producto está a una presión compatible con la entrada directa a una tubería de CO<sub>2</sub> a alta presión.
- 50 4. El método de la reivindicación 1, en donde combustible (254) que contiene carbono comprende una corriente (256) de productos de combustión parcial, opcionalmente en donde la corriente (256) de productos de combustión parcial es producida sometiendo a combustión un combustible (254) que contiene carbono con O<sub>2</sub> (243) en la presencia de un fluido (86) circulante de CO<sub>2</sub>, siendo provistos el combustible (254) que contiene carbono, O<sub>2</sub> (243), y fluido (86) circulante de CO<sub>2</sub> en relaciones tales que el combustible (254) que contiene carbono es oxidado sólo parcialmente para formar la corriente (256) 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>, y, opcionalmente en donde el combustible (254) que contiene carbono comprende carbón, lignito, o coque de petróleo, opcionalmente en donde el combustible (254) que contiene carbono está en forma de partículas y es provisto en forma de un lodo (255) con CO<sub>2</sub>.

5 El método de la reivindicación 4, en donde el combustible (254) que contiene carbono, O<sub>2</sub> (243), y fluido (86) circulante de CO<sub>2</sub> son provistos en relaciones tales que la temperatura de la corriente (256) de producto de combustión parcial es suficientemente baja de forma que todo el componente incombustible en la corriente (256) está en la forma de partículas sólidas,

10 opcionalmente en donde la temperatura de la corriente (256) de producto de combustión parcial es aproximadamente 500 °C a aproximadamente 900 °C; u opcionalmente que comprende adicionalmente pasar la corriente (256) de producto de combustión parcial a través de uno o más filtros (940), y opcionalmente de manera adicional en donde el filtro (940) reduce la cantidad residual de componente incombustible a menos de aproximadamente 2 mg/m<sup>3</sup> de la corriente (256) de producto combustión parcial.

6. El método de la reivindicación 1, en donde:

15 el fluido (236) circulante de CO<sub>2</sub> es introducido a una presión de al menos aproximadamente 15 MPa, opcionalmente a una presión de al menos aproximadamente 20 MPa;

o en donde el fluido (236) circulante de CO<sub>2</sub> es introducido a una temperatura de al menos aproximadamente 600 °C, opcionalmente al menos aproximadamente 700 °C.

7. El método de la reivindicación 1, en donde:

la corriente (40) de producto de combustión tiene una temperatura de al menos aproximadamente 1000 °C,

20 o en donde la corriente (40) de producto de combustión tiene una presión que es al menos aproximadamente 90% de la presión del CO<sub>2</sub> (236) introducido en la cámara de combustión (220), opcionalmente al menos aproximadamente 95% de la presión del CO<sub>2</sub> (236) introducido en la cámara de combustión (220).

25 8. El método de la reivindicación 1, en donde la relación de la presión de la corriente (40) de producto de combustión en la entrada comparada con la presión de la corriente (50) de descarga de turbina en la salida es de aproximadamente 1.5 a aproximadamente 10, de forma opcional aproximadamente 2 a aproximadamente 8.

30 9. El método de la reivindicación 1, en donde la relación de CO<sub>2</sub> en el fluido (236) circulante de CO<sub>2</sub> a carbono en el combustible (254) que contiene carbono introducido a la cámara de combustión, sobre una base molar, es aproximadamente 10 hasta aproximadamente 50; o en donde la relación de CO<sub>2</sub> en el fluido (236) circulante de CO<sub>2</sub> a O<sub>2</sub> (242) introducido en la cámara de combustión, sobre una base molar, es aproximadamente 10 hasta aproximadamente 30.

10. El método de la reivindicación 1, donde el CO<sub>2</sub> en la corriente (50) de descarga de la turbina está en un estado gaseoso; o en donde la corriente (50) de descarga de la turbina tiene una presión de menos de o igual a 7 MPa.

35 11. El método de la reivindicación 1, en donde la unidad (420) de intercambio de calor primaria comprende una serie de al menos tres intercambiadores de calor (430, 440, 450), opcionalmente en donde el primer intercambiador (430) de calor en la serie recibe la corriente (50) de descarga de turbina y reduce la temperatura de la misma, estando formado el primer intercambiador (430) de calor a partir de una aleación para alta temperatura que soporta una temperatura de al menos aproximadamente 700 °C.

40 12. El método de la reivindicación 1, en donde la corriente (70) de fluido circulante de CO<sub>2</sub> de alta densidad, supercrítico, después de pasar a través del segundo compresor (650) tiene una presión de al menos aproximadamente 15 MPa, opcionalmente al menos aproximadamente 25 MPa.

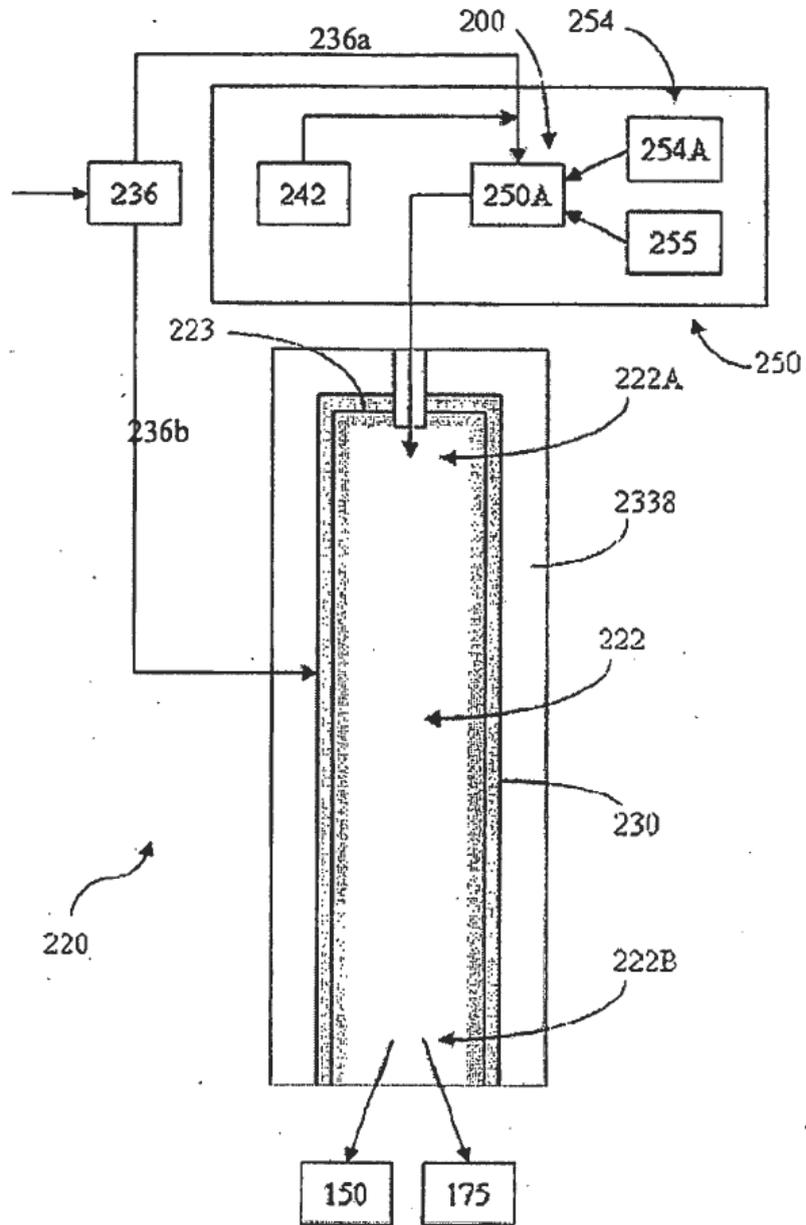
13. El método de la reivindicación 1, en donde la corriente (66) de fluido circulante de CO<sub>2</sub> supercrítico es enfriada a una temperatura en donde su densidad es al menos aproximadamente 400 kg/m<sup>3</sup>.

14. El método de la reivindicación 1, en donde dicha cantidad adicional de calor (Q) comprende el calor extraído de una unidad (30) de separación de O<sub>2</sub>.

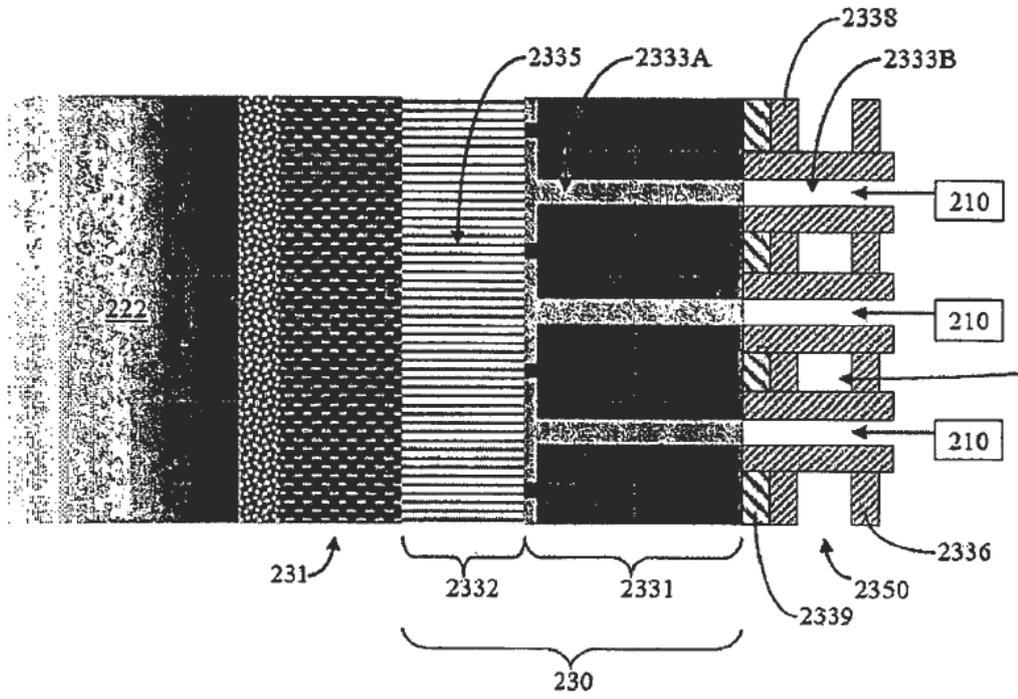
45 15. El método de la reivindicación 1, en donde el O<sub>2</sub> (242) es provisto en una cantidad tal que parte del combustible (254) que contiene carbono es oxidado a productos de oxidación que comprenden uno o más de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, y SO<sub>2</sub>, y la parte remanente del combustible (254) que contiene carbono es oxidada a uno o más componentes combustibles seleccionados del grupo consistente de H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, y combinaciones de los mismos; opcionalmente en donde la turbina (320) comprende dos unidades (330, 340) teniendo cada una una entrada y una salida, y en donde  
50 la temperatura de operación en la entrada de cada unidad (330, 340) es sustancialmente la misma; y de forma

adicional opcionalmente en donde el método comprende agregar una cantidad de O<sub>2</sub> a la corriente (42) de fluido a la salida de la primera unidad (330) de turbina.

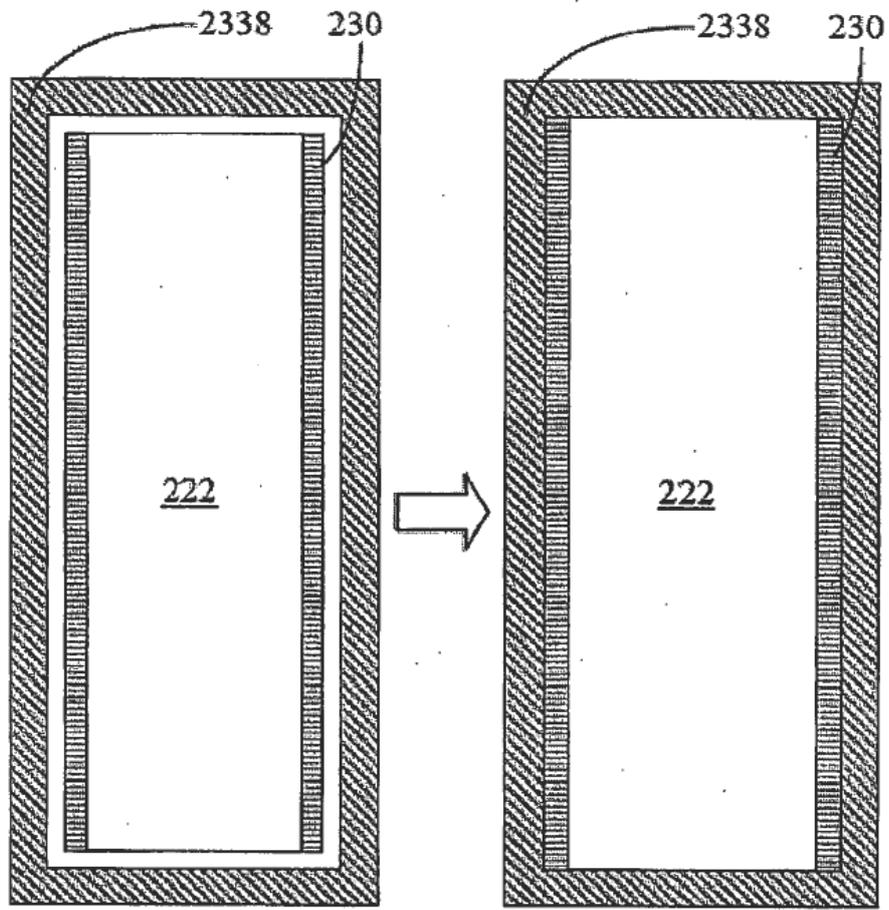
16. El método de la reivindicación 1, en donde la corriente (50) de descarga de turbina es un fluido oxidante que comprende una cantidad en exceso de O<sub>2</sub>.
- 5 17. El método de la reivindicación 1, en donde la cámara de combustión (220) comprende una cámara de combustión enfriada por transpiración; opcionalmente en donde el fluido (236) circulante de CO<sub>2</sub> es introducido a la cámara de combustión (220) enfriada por transpiración como todo o parte de un fluido (210) de enfriamiento por transpiración dirigido a través de uno o más pasos (2333A, 2333B) para suministro de fluido de transpiración formado en la cámara de combustión (220) enfriada por transpiración.
- 10 18. El método de la reivindicación 1, en donde dicha combustión es llevada a cabo a una temperatura de al menos aproximadamente 1300 °C o a una temperatura de aproximadamente 1200 °C hasta aproximadamente 5000 °C.
19. El método de la reivindicación 1, en donde la corriente (50) de descarga de la turbina es pasada directamente hacia la unidad (420) de intercambiador de calor primaria sin paso a través de una cámara de combustión adicional.
- 15 20. El método de la reivindicación 1, que comprende adicionalmente, entre dicha etapa de combustión y dicha etapa de expansión, pasar la corriente (40) de producto de combustión a través de al menos un aparato (2340) para eliminar contaminantes en un estado sólido o líquido.
21. El método de la reivindicación 1, que comprende adicionalmente, entre dicha etapa de expansión y dicha etapa de extracción, pasar la corriente (1001) de descarga de turbina a través de una unidad (1100) de intercambio de calor secundaria; opcionalmente en donde dicha unidad (1100) de intercambio de calor secundaria utiliza calor de la corriente (1001) de descarga de turbina para calentar una o más corrientes (1033, 1034) derivadas de un sistema de potencia a vapor (1800); preferiblemente en donde:
- 20 el sistema (1800) de potencia a vapor comprende un sistema de caldera convencional, opcionalmente una estación de potencia de quema de carbón; o en donde el sistema de potencia de vapor (1800) comprende un reactor nuclear; opcionalmente en donde la una o más corrientes (1033,1034) de vapor calentadas son pasadas a través de una o
- 25 más turbinas (1200) para generar potencia.



**FIG. 1**



**FIG. 2**



**FIG. 3A**

**FIG. 3B**

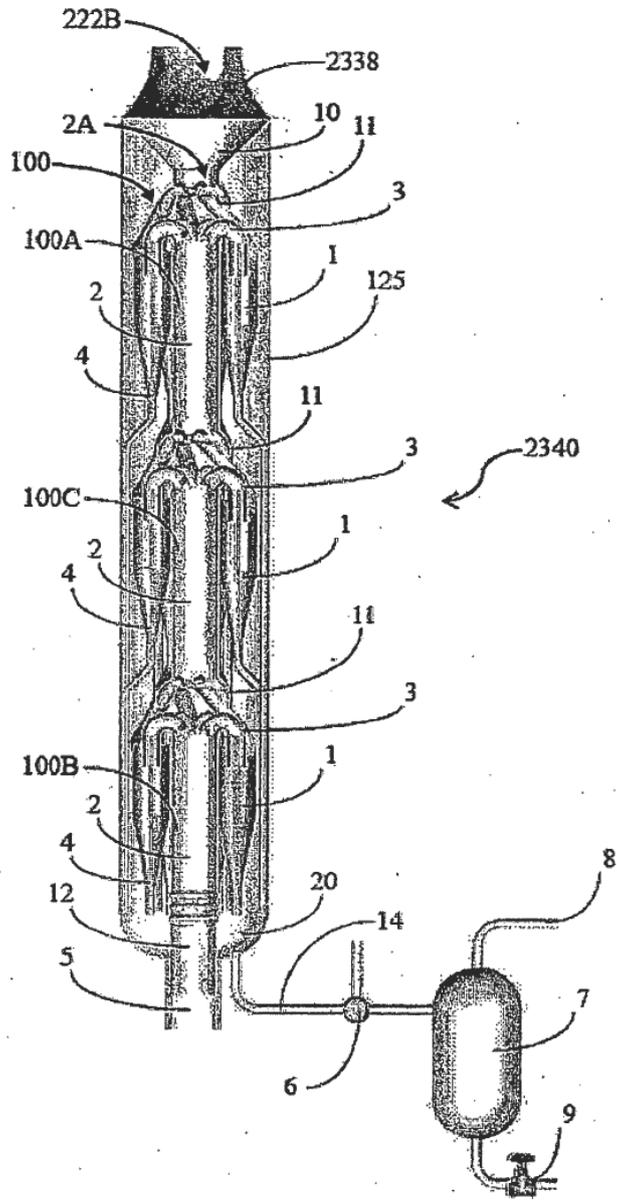
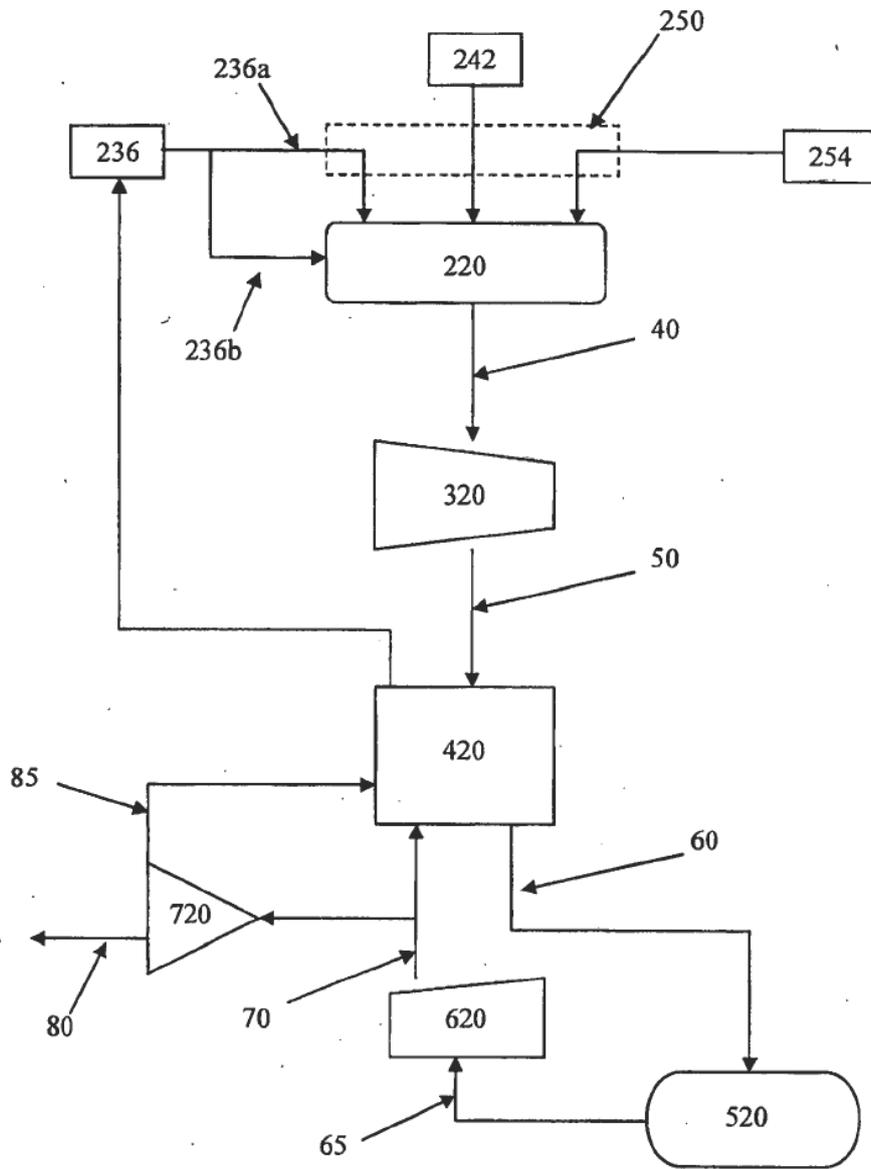
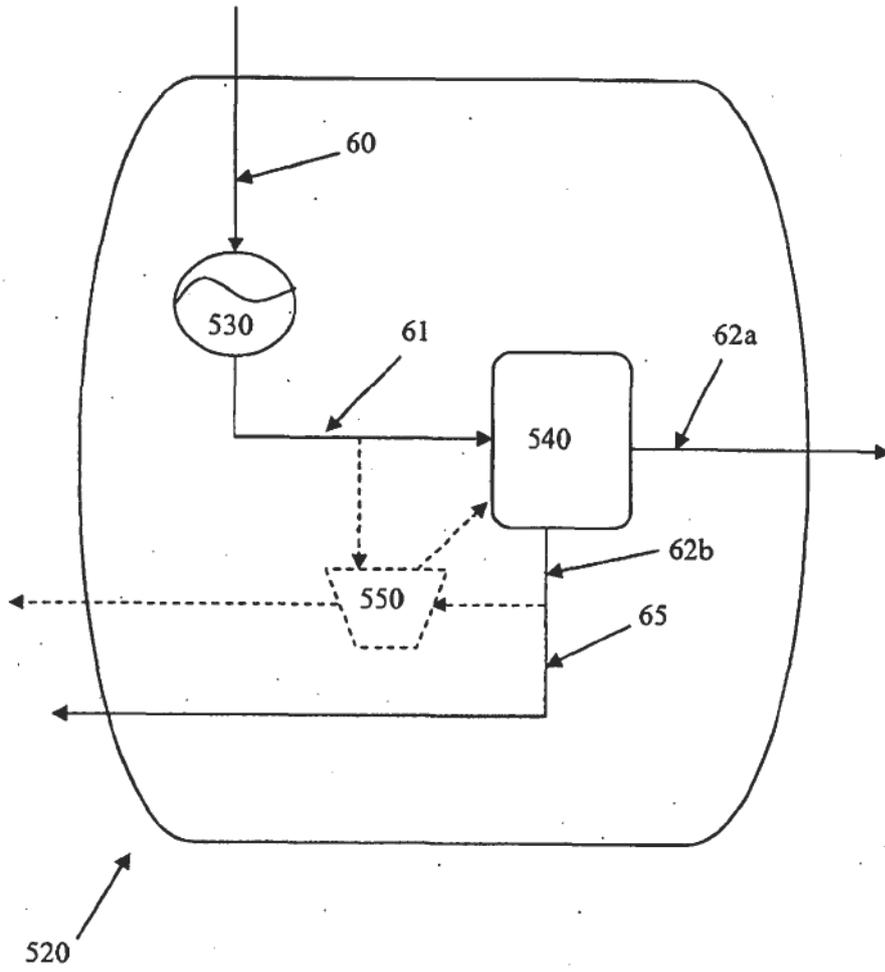


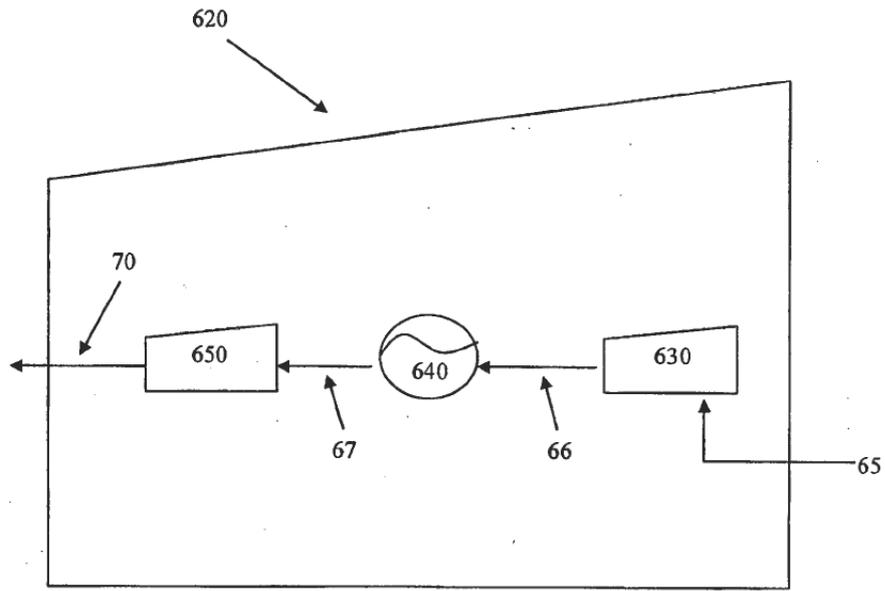
FIG. 4



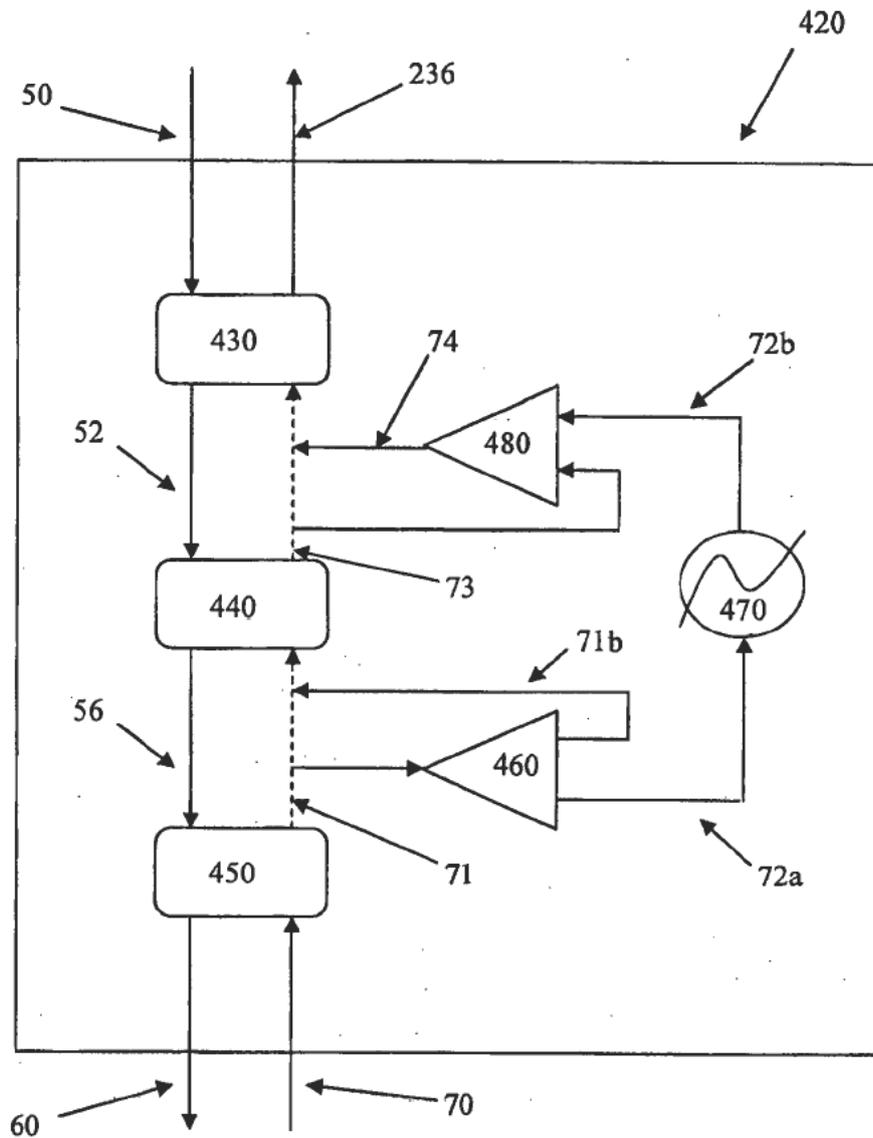
**FIG. 5**



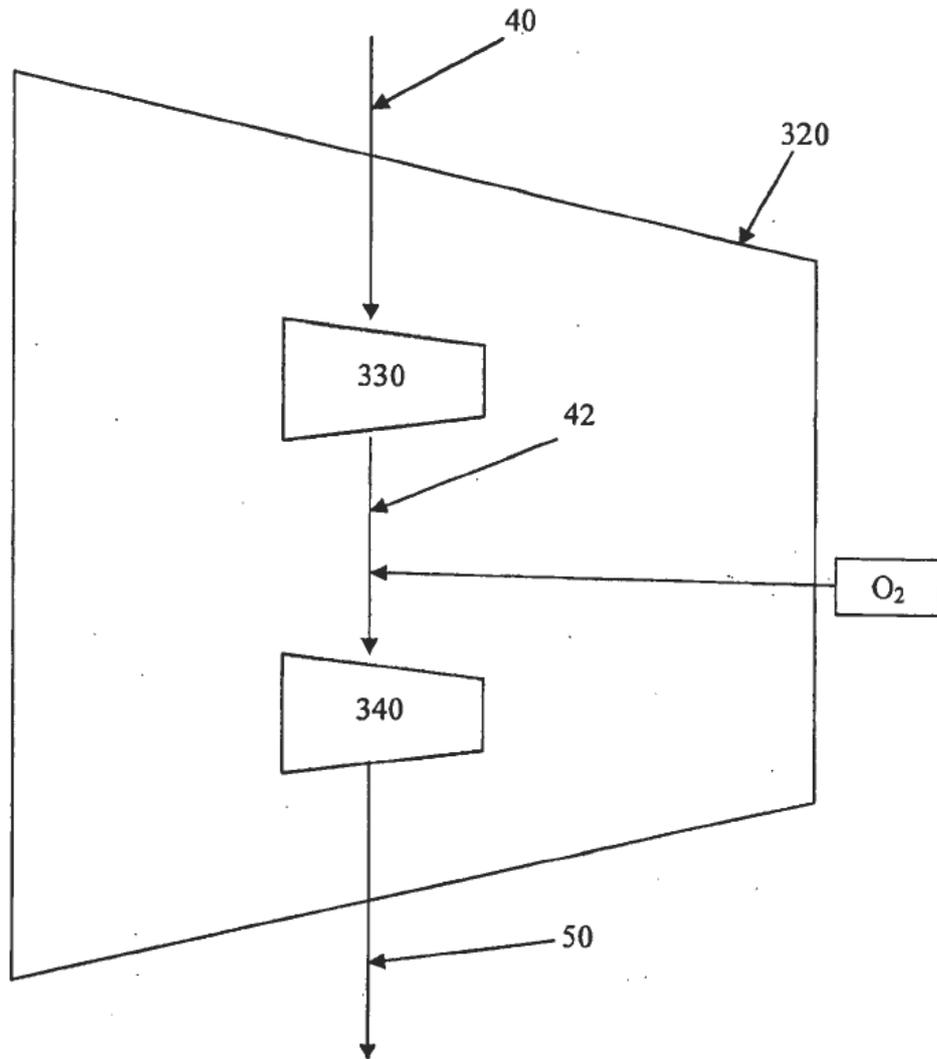
**FIG. 6**



**FIG. 7**



**FIG. 8**



**FIG. 9**

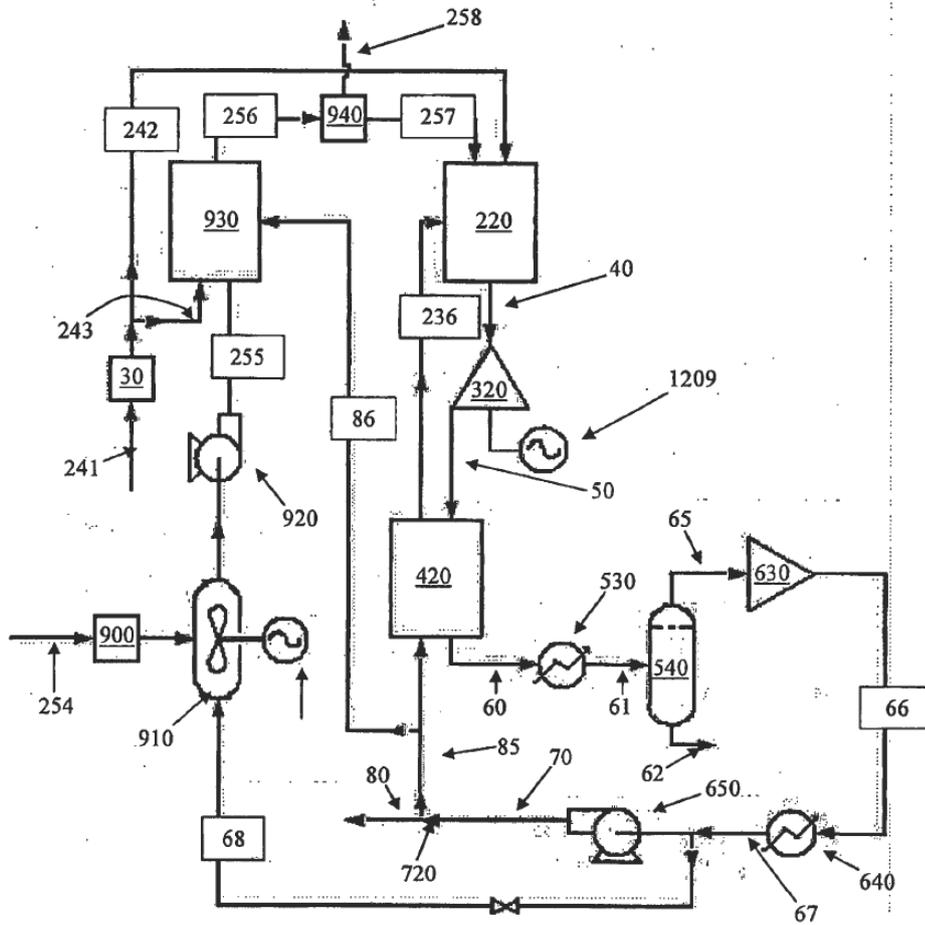


FIG. 10

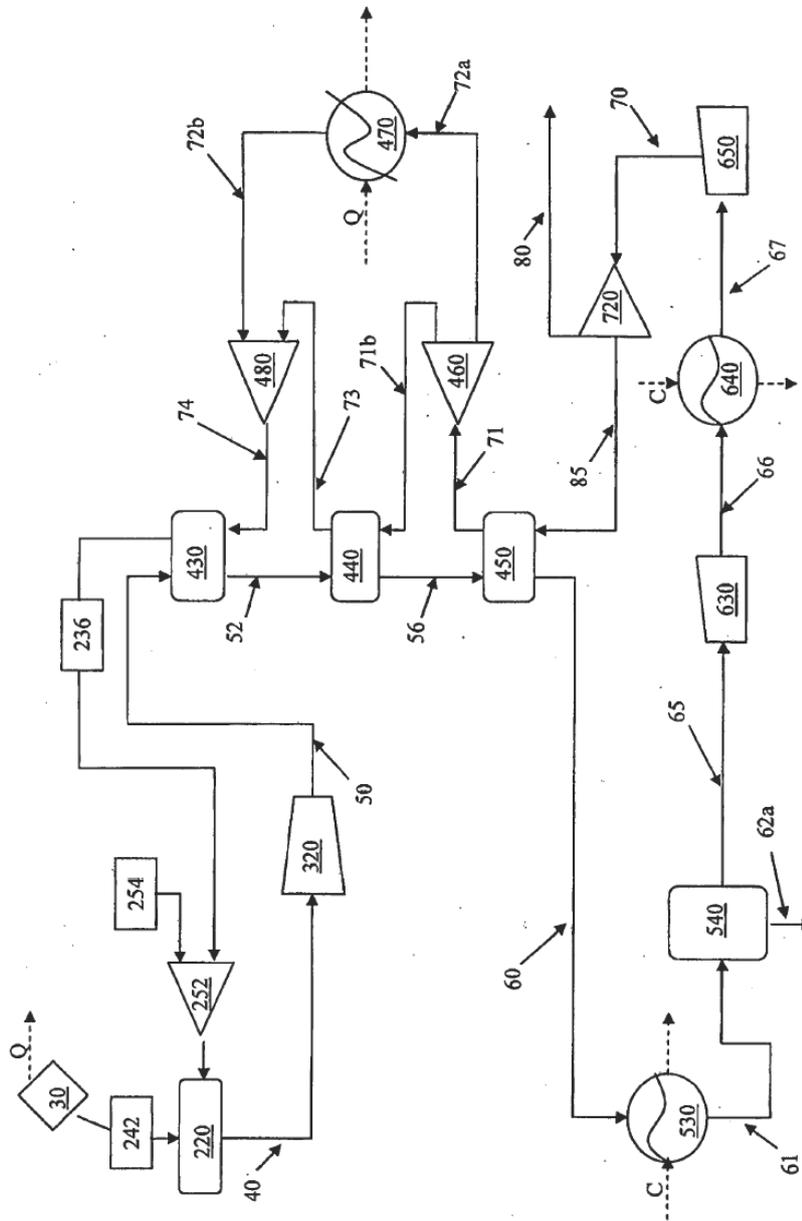


FIG. 11

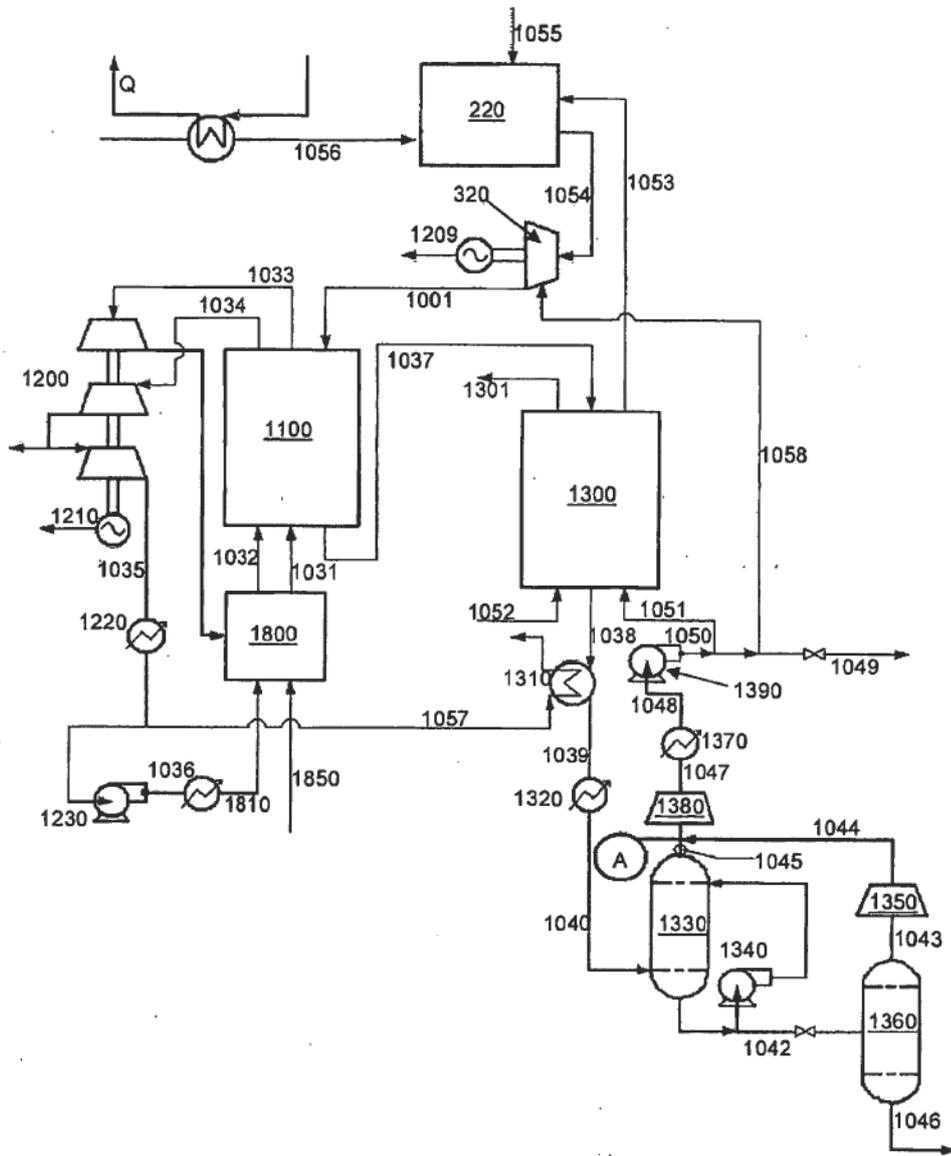


FIG. 12