

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 508 173**

51 Int. Cl.:

**F02C 3/34** (2006.01)

**F02C 6/00** (2006.01)

**F02C 7/10** (2006.01)

**F01K 23/10** (2006.01)

**F02C 9/48** (2006.01)

**F02C 1/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.09.2011 E 11761791 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.07.2014 EP 2619428**

54 Título: **Sistema y método para generación de energía con alta eficiencia utilizando un fluido de trabajo de nitrógeno gaseoso**

30 Prioridad:

**21.09.2010 US 385042 P**

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

**16.10.2014**

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:

**PALMER, MILES R.;  
ALLAM, RODNEY JOHN y  
FETVEDT, JEREMY ERON**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

**ES 2 508 173 T3**

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

**DESCRIPCIÓN**

Sistema y método para generación de energía con alta eficiencia utilizando un fluido de trabajo de nitrógeno gaseoso

**Campo de la descripción**

5 La presente descripción proporciona métodos de alta eficiencia para la producción de energía utilizando un fluido de trabajo de N<sub>2</sub> con combustión de un combustible en aire.

**Antecedentes**

El documento US 2009/301054 describe un sistema de turbina que incluye una turbina de gas con un sistema de combustión de recalentamiento y un sistema de recirculación de gas de escape (EGR, por sus siglas en inglés).

10 El documento EP 1 429 000 A1 describe un método y dispositivo para hacer funcionar una turbina de gas que comprende una cámara de combustión de combustible fósil.

15 Puesto que las necesidades de energía continúan creciendo en todo el mundo, existe una necesidad cada vez mayor de procedimientos de producción de energía adicionales. El actual método de alta eficiencia para generar energía utilizando combustible de gas natural o combustibles de hidrocarburo destilados es el sistema de ciclo combinado de gas natural (NGCC, por sus siglas en inglés) que comprende una turbina de gas de ciclo Brayton y un sistema de vapor de ciclo Rankine. Las turbinas de gas más grandes disponibles en el mercado son capaces de generar una potencia desde el sistema NGCC en el intervalo de aproximadamente 450 MW (megavatios) a aproximadamente 550 MW, con eficiencias sobre valor calorífico inferior en el intervalo de aproximadamente 56% a aproximadamente 60% en condiciones ISO (siglas inglesas de la Organización Internacional de Normalización).  
 20 Están disponibles unidades de tren único actuales que emplean una caldera alimentada con carbón más un generador de vapor que pueden generar potencias superiores a 1.000 MW, proporcionando eficiencias eléctricas netas de hasta aproximadamente 45% sobre la base de las máximas condiciones de vapor alcanzables con los mejores diseños y materiales de caldera actuales. Están disponibles reactores nucleares con una única turbina de vapor con generaciones de potencia superiores a 1.000 MW.

25 Además de lo anterior, la publicación de patente de EE.UU. nº 2011/0179799 describe un ciclo de potencia de alta presión y baja relación de presiones que utiliza un combustible carbonoso o hidrocarbonado que es quemado en presencia de una atmósfera con alta concentración de oxígeno y por lo tanto requiere la provisión de una fuente de oxígeno de alta pureza. Los productos de combustión son enfriados por un reciclado de una corriente de CO<sub>2</sub> de alta temperatura, alta presión y sumamente purificada que ha sido calentada contra una corriente de escape de turbina en un intercambiador de calor.

30 Como se ha visto en lo que antecede, las tecnologías existente y emergente en el sector pueden requerir el uso de múltiples ciclos y/o la provisión de materiales sumamente purificados para la combustión. Por consiguiente, sigue existiendo una necesidad de sistemas de energía que utilicen gas natural o combustibles destilados quemados en aire que puedan proporcionar generaciones de potencia desde un tren único de hasta 500 MW o incluso más.

**Compendio de la descripción**

35 Los sistemas y métodos para producción de energía descritos en la presente memoria pueden ser muy útiles para proporcionar producción de energía con alta eficiencia y pueden presentar una o más de las siguientes características.

Los sistemas y métodos descritos pueden lograr, con una temperatura máxima de turbina inferior a la de un sistema NGCC convencional, una eficiencia comparable a la de un sistema NGCC convencional.

40 Los sistemas y métodos descritos pueden lograr, con una temperatura de turbina equivalente a la de un sistema NGCC convencional, una mayor eficiencia que un sistema NGCC convencional.

Los sistemas y métodos descritos pueden tener costes de capital significativamente más bajos que un sistema NGCC convencional.

Los sistemas y métodos descritos pueden utilizar un fluido de trabajo único.

45 Los sistemas y métodos descritos pueden utilizar medios distintos de un sistema de vapor para mover la o las turbinas.

Los sistemas y métodos descritos pueden ser significativamente más compactos que un sistema NGCC.

50 Los sistemas y métodos descritos pueden tener una concentración de CO<sub>2</sub> en el gas de escape que sea significativamente mayor que la concentración de aproximadamente 3% en el escape NGCC, de manera que utilizando un sistema de extracción apropiado pueda captarse CO<sub>2</sub> más fácilmente.

Los sistemas y métodos descritos pueden utilizar aire como fuente oxidante de bajo coste en lugar de requerir oxígeno sumamente puro.

5 Los sistemas y métodos descritos pueden proporcionar condiciones de combustión cercanas a las estequiométricas que pueden dar como resultado la producción de gases inertes en exceso, que pueden ser descargados a la atmósfera.

Los sistemas y métodos descritos pueden utilizar una corriente de alta presión que comprenda gases inertes en la producción de energía mediante la expansión de la corriente a través de una o más turbinas.

10 Los sistemas y métodos descritos pueden proporcionar un método para hacer funcionar un proceso de producción de energía en el cual se puede quemar a alta presión en aire un combustible fósil en condiciones cercanas a las estequiométricas en un ciclo cerrado con una alta presión y baja relación de presiones suficientes para que los gases inertes en exceso presurizados que quedan después del consumo de oxígeno en el combustor puedan ser expandidos a la presión atmosférica con máxima producción de energía adicional.

15 Además de lo anterior, en una realización la presente descripción proporciona un sistema de producción de energía. El sistema de producción de energía puede comprender un primer combustor configurado para quemar una primera corriente de combustible y una primera corriente de aire en presencia de una primera corriente de reciclado para producir una primera corriente de combustión, una primera turbina configurada para expandir la primera corriente de combustión, y un primer intercambiador de calor configurado para recibir al menos una parte de una primera corriente de descarga desde la primera turbina. El primer intercambiador de calor puede estar configurado para emplear la parte de la primera corriente de descarga para calentar la primera corriente de aire y al menos una parte de la primera corriente de reciclado que es producida a partir de la primera corriente de descarga. El sistema de producción de energía puede incluir también un segundo combustor configurado para quemar una segunda corriente de combustible y una segunda corriente de aire en presencia de una segunda corriente de reciclado que es producida a partir de la primera corriente de descarga para producir una segunda corriente de combustión, una segunda turbina configurada para expandir la segunda corriente de combustión, y un segundo intercambiador de calor configurado para calentar la segunda corriente de aire y la segunda corriente de reciclado.

20 En algunas realizaciones, el segundo intercambiador de calor puede estar configurado para emplear una segunda corriente de descarga procedente de la segunda turbina para calentar la segunda corriente de aire y la segunda corriente de reciclado. El segundo intercambiador de calor puede estar configurado además para calentar una segunda parte de la primera corriente de reciclado. El sistema de producción de energía puede comprender además un tercer combustor configurado para quemar una tercera corriente de combustible y una tercera corriente de aire en presencia de una segunda corriente de descarga recibida desde la segunda turbina para producir una tercera corriente de combustión, y una tercera turbina configurada para expandir la tercera corriente de combustión. El segundo intercambiador de calor puede estar configurado para emplear una tercera corriente de descarga procedente de la tercera turbina para calentar la segunda corriente de aire y la segunda corriente de reciclado. El segundo intercambiador de calor puede estar configurado además para calentar la tercera corriente de aire. El segundo intercambiador de calor puede estar configurado además para calentar una segunda parte de la primera corriente de reciclado.

30 En algunas realizaciones, un compresor de reciclado puede estar configurado para comprimir la primera corriente de reciclado. Una segunda parte de la primera corriente de descarga puede ser dirigida al segundo combustor. El sistema de producción de energía puede comprender además un lavador configurado para recibir una corriente de descarga enfriada desde el segundo intercambiador de calor. El lavador puede comprender un sistema de adsorción de CO<sub>2</sub>.

45 En algunas realizaciones, el sistema de producción de energía puede comprender además un sistema de compresores de aire configurado para comprimir una corriente de aire de alimentación para producir la primera corriente de aire y la segunda corriente de aire. El sistema de compresores de aire puede comprender un primer compresor de aire configurado para comprimir la primera corriente de aire y un segundo compresor de aire configurado para comprimir la segunda corriente de aire. El segundo compresor de aire puede estar configurado además para comprimir la primera corriente de aire antes de que el primer compresor de aire comprima la primera corriente de aire. El sistema de compresores de aire puede estar configurado para controlar un caudal de la primera corriente de aire y un caudal de la segunda corriente de aire para dar como resultado la combustión sustancialmente estequiométrica en el primer combustor y el segundo combustor. Por ejemplo, el sistema de compresores de aire puede estar configurado para controlar el caudal de la primera corriente de aire y el caudal de la segunda corriente de aire para dar como resultado hasta aproximadamente 5% de exceso de O<sub>2</sub> en la combustión en el primer combustor y el segundo combustor.

55 En algunas realizaciones, la primera corriente de combustible y la segunda corriente de combustible pueden comprender un gas de hidrocarburo comprimido. El gas de hidrocarburo comprimido puede comprender metano. La primera corriente de aire y la segunda corriente de aire pueden comprender aire ambiente comprimido. La primera corriente de reciclado y la segunda corriente de reciclado pueden tener más de 50% de N<sub>2</sub> sobre una base molar. El sistema de producción de energía puede comprender además un separador configurado para extraer una

corriente líquida de la parte de la primera corriente de descarga dirigida a través del primer intercambiador de calor. Además, el sistema de producción de energía puede estar configurado para trabajar con una eficiencia neta de generación eléctrica de al menos aproximadamente 60% sobre una base de valor calorífico inferior cuando se trabaja con una temperatura de turbina de aproximadamente 1.300°C a 1.500°C.

5 En otra realización se proporciona un método para producir energía. El método puede comprender quemar una primera corriente de combustible y una primera corriente de aire en un primer combustor en presencia de una primera corriente de reciclado para producir una primera corriente de combustión, expandir la primera corriente de combustión en una primera turbina para hacer girar la primera turbina y producir energía, dirigir al menos una parte de una primera corriente de descarga desde la primera turbina a un primer intercambiador de calor, y emplear la parte de la primera corriente de descarga para calentar la primera corriente de aire y al menos una parte de la primera corriente de reciclado que se produce a partir de la primera corriente de descarga con el primer intercambiador de calor. El método puede comprender además quemar una segunda corriente de combustible y una segunda corriente de aire en un segundo combustor en presencia de una segunda corriente de reciclado que se produce a partir de la primera corriente de descarga para producir una segunda corriente de combustión, expandir la segunda corriente de combustión en una segunda turbina para hacer girar la segunda turbina a fin de producir energía, dirigir la segunda corriente de aire y la segunda corriente de reciclado a un segundo intercambiador de calor, y calentar la segunda corriente de aire y la segunda corriente de reciclado con el segundo intercambiador de calor.

20 En algunas realizaciones, calentar la segunda corriente de aire y la segunda corriente de reciclado con el segundo intercambiador de calor puede comprender emplear una segunda corriente de descarga desde la segunda turbina para calentar la segunda corriente de aire y la segunda corriente de reciclado. El método puede comprender además calentar una segunda parte de la primera corriente de reciclado con el segundo intercambiador de calor. El método puede incluir también quemar una tercera corriente de combustible y una tercera corriente de aire en un tercer combustor en presencia de una segunda corriente de descarga recibida desde la segunda turbina, para producir una tercera corriente de combustión, y expandir la tercera corriente de combustión en una tercera turbina para hacer girar la tercera turbina a fin de producir energía. El calentamiento de la segunda corriente de aire y la segunda corriente de reciclado con el segundo intercambiador de calor puede comprender emplear una tercera corriente de descarga procedente de la tercera turbina para calentar la segunda corriente de aire y la segunda corriente de reciclado. El método puede incluir, adicionalmente, calentar la tercera corriente de aire con el segundo intercambiador de calor. Además, el método puede incluir calentar una segunda parte de la primera corriente de reciclado con el segundo intercambiador de calor.

35 En algunas realizaciones, el método puede comprender además comprimir la primera corriente de reciclado con un compresor de reciclado. El método puede incluir también dirigir una segunda parte de la primera corriente de descarga al segundo combustor. Adicionalmente, el método puede incluir dirigir una corriente de descarga enfriada desde el segundo intercambiador de calor a un lavador. El lavador puede comprender un sistema de adsorción de CO<sub>2</sub>.

40 En algunas realizaciones, el método puede comprender además comprimir una corriente de aire de alimentación con el sistema de compresores de aire para producir la primera corriente de aire y la segunda corriente de aire. Comprimir la corriente de aire de alimentación con el sistema de compresores de aire puede comprender comprimir la primera corriente de aire con un primer compresor de aire y comprimir la segunda corriente de aire con un segundo compresor de aire. Comprimir la corriente de aire de alimentación con el sistema de compresores de aire puede comprender comprimir la primera corriente de aire con el segundo compresor de aire antes de comprimir la primera corriente de aire con el primer compresor de aire. Además, el método puede incluir controlar un caudal de la primera corriente de aire y un caudal de la segunda corriente de aire con el sistema de compresores de aire para dar como resultado la combustión sustancialmente estequiométrica en el primer combustor y el segundo combustor. Por ejemplo, el método puede incluir controlar el caudal de la primera corriente de aire y el caudal de la segunda corriente de aire con el sistema de compresores de aire para dar como resultado hasta aproximadamente 5% de exceso de O<sub>2</sub> en la combustión en el primer combustor y el segundo combustor.

50 En algunas realizaciones, la primera corriente de combustible y la segunda corriente de combustible pueden comprender gas de hidrocarburo comprimido. El gas de hidrocarburo comprimido puede comprender metano. La primera corriente de aire y la segunda corriente de aire pueden comprender aire ambiente comprimido. La primera corriente de reciclado y la segunda corriente de reciclado pueden tener más de 50% de N<sub>2</sub> sobre una base molar. El método puede incluir también extraer con un separador una corriente de líquido desde la parte de la primera corriente de descarga dirigida a través del primer intercambiador de calor. Además, se puede producir la energía con una eficiencia neta de generación eléctrica de al menos aproximadamente 60% sobre una base de valor calorífico inferior cuando se trabaja con una temperatura de turbina de aproximadamente 1.300°C a aproximadamente 1.500°C.

60 Se proporciona una realización adicional de un sistema de producción de energía. El sistema de producción de energía puede comprender un suministro de aire configurado para aportar una corriente de aire, un suministro de combustible configurado para aportar una corriente de combustible, y un combustor configurado para quemar la corriente de combustible y la corriente de aire en presencia de una corriente de reciclado para producir una corriente

de combustión que tiene más de 50% de N<sub>2</sub> sobre una base molar. El suministro de aire y el suministro de combustible pueden estar configurados para aportar la corriente de aire y la corriente de combustible en una relación configurada para dar como resultado la combustión sustancialmente estequiométrica en el combustor con hasta aproximadamente 5% de exceso de O<sub>2</sub>. El sistema de producción de energía puede comprender además una turbina configurada para expandir la corriente de combustión y un intercambiador de calor configurado para recibir al menos una parte de una corriente de descarga desde la turbina. El intercambiador de calor puede estar configurado para emplear la parte de la corriente de descarga para calentar la corriente de aire y al menos una parte de la corriente de reciclado que es producida a partir de la corriente de descarga.

En algunas realizaciones, el sistema de producción de energía puede comprender además un segundo combustor configurado para quemar una segunda corriente de combustible y una segunda corriente de aire en presencia de una segunda corriente de reciclado que es producida a partir de la corriente de descarga para producir una segunda corriente de combustión, una segunda turbina configurada para expandir la segunda corriente de combustión, y un segundo intercambiador de calor configurado para calentar la segunda corriente de aire y la segunda corriente de reciclado.

Se provee una realización adicional de un método para producir energía. El método puede comprender quemar una corriente de combustible y una corriente de aire en un combustor en presencia de una corriente de reciclado para producir una corriente de combustión que tiene más de 50% de N<sub>2</sub> sobre una base molar, en donde la relación de la corriente de combustible a la corriente de aire está controlada para dar como resultado una combustión sustancialmente estequiométrica con hasta aproximadamente 5% de exceso de O<sub>2</sub>. El método puede comprender además expandir la corriente de combustión en una turbina para hacer girar la turbina y producir energía, dirigir al menos una parte de una corriente de descarga desde la turbina a un intercambiador de calor, y emplear la parte de la corriente de descarga para calentar con el intercambiador de calor la corriente de aire y al menos una parte de la corriente de reciclado que es producida a partir de la corriente de descarga.

En algunas realizaciones, el método puede comprender además quemar un segundo flujo de combustible y una segunda corriente de aire en un segundo combustor en presencia de una segunda corriente de reciclado que es producida a partir de la corriente de descarga para producir una segunda corriente de combustión, expandir la segunda corriente de combustión en una segunda turbina para hacer girar la segunda turbina a fin de producir energía, dirigir la segunda corriente de aire y la segunda corriente de reciclado a un segundo intercambiador de calor, y calentar con el segundo intercambiador de calor la segunda corriente de aire y la segunda corriente de reciclado.

### Breve descripción de las figuras

Para ayudar a comprender las realizaciones de la descripción, se hará ahora referencia a los dibujos adjuntos, que no están necesariamente dibujados a escala. Los dibujos son sólo ilustrativos, y no deben interpretarse como limitantes de la descripción.

La Figura 1 proporciona un diagrama de flujo que ilustra un sistema de producción de energía que incluye tres turbinas y el método de funcionamiento del mismo de acuerdo con una realización de la descripción; y

La Figura 2 proporciona un diagrama de flujo que ilustra un sistema de producción de energía que incluye dos turbinas y el método de funcionamiento del mismo de acuerdo con otra realización de la descripción.

### Descripción detallada

Se describirá ahora con más detalle la descripción en lo que sigue haciendo referencia a diversas realizaciones. Estas realizaciones se proporcionan de forma que esta descripción sea minuciosa y completa, y transmita por completo el alcance de la descripción a los expertos en la técnica. De hecho, la descripción puede realizarse de muchas formas diferentes y no debe interpretarse como limitada a las realizaciones expuestas en la presente memoria; antes bien, estas realizaciones se proporcionan de forma que la presente descripción satisfaga los requisitos legales aplicables. Tal como se utilizan en la memoria descriptiva y en las reivindicaciones adjuntas, las formas singulares "un", "una", "el", "la" incluyen referentes plurales a menos que el contexto claramente indique otra cosa.

En algunas realizaciones, la presente descripción comprende métodos y sistemas que proporcionan claras ventajas respecto a sistemas y métodos de producción de energía conocidos. Por ejemplo, en diversas realizaciones, la presente descripción puede proporcionar uno o más de lo siguiente:

- generación de energía eléctrica utilizando combustibles gaseosos exentos de cenizas (tales como, por ejemplo, gas natural) o combustibles líquidos exentos de cenizas (tales como, por ejemplo, combustibles destilados) en un ciclo Brayton que quema el combustible con aire y en el cual el componente predominante en el ciclo es nitrógeno;
- la ausencia de un ciclo de vapor Rankine separado para lograr eficiencia elevada;

- producción de energía eléctrica con una eficiencia neta sobre una base de valor calorífico inferior (LHV, por sus siglas en inglés) que es aproximadamente la misma (o mejor) que los mejores sistemas actuales de ciclo combinado de turbina de gas;
- 5      • presiones elevadas que pueden permitir que el sistema defina un factor de forma relativamente compacto y cueste relativamente poco;
- se pueden personalizar los sistemas para proporcionar unidades de tren único con potencia generada superior a 500 MW, así como unidades relativamente compactas;
- 10     • facilitamiento de la captura de CO<sub>2</sub> del gas de purga en donde la concentración de CO<sub>2</sub> se encuentra en el intervalo de 10% a 12% molar mediante el uso de combustión de combustible cercana a la estequiométrica en las corrientes de aire comprimido precalentado; y
- logro de bajos niveles de NO<sub>x</sub> en el gas de escape al hacer funcionar los combustores a temperaturas de escape que son moderadas mediante corrientes de reciclado que son ricas en gas de N<sub>2</sub>.

15     En realizaciones específicas, la descripción puede proporcionar el funcionamiento de un sistema de energía de ciclo Brayton de aire/combustible limpio sin un ciclo de vapor o planta de oxígeno, que origina menor coste de capital que las actuales unidades de ciclo combinado, sustancialmente sin sacrificio de la eficiencia y con una concentración de CO<sub>2</sub> en el escape de, por ejemplo, aproximadamente 10% molar y más. En algunas realizaciones, el sistema puede eliminar CO<sub>2</sub> adicional del gas de escape purgado a la atmósfera utilizando un sistema de lavado de CO<sub>2</sub> con amina.

20     Se describirá ahora la presente descripción haciendo referencia a la realización del sistema ilustrada en la Figura 1. En términos generales, la Figura 1 ilustra una realización de un ciclo Brayton configurado para producir energía. El sistema puede incluir primer **3**, segundo **4** y tercer **34** combustores. Cada uno de los combustores **3**, **4**, **34** puede respectivamente recibir y quemar una corriente de combustible (primera **26**, segunda **24** y tercera **37** corrientes de combustible) con una corriente de aire comprimido (primera **51**, segunda **21** y tercera **38** corrientes de aire comprimido calentado) para producir respectivas corrientes de combustión (primera **27**, segunda **23** y tercera **36** corrientes de combustión). Las corrientes de combustión **27**, **23**, **36** son respectivamente aportadas a la primera **5**, segunda **6** y tercera **35** turbinas, que expanden las corrientes de combustión para crear movimiento de rotación que puede ser convertido en energía. Por ejemplo, las turbinas **5**, **6**, **35** pueden estar acopladas directa o indirectamente a un generador eléctrico **45**.

30     Para aumentar la eficiencia, el sistema puede incluir primer **2** y segundo **1** intercambiadores de calor. Una parte **58** de una corriente **28** de descarga de la primera turbina **5** puede ser dirigida a través del primer intercambiador **2** de calor con el fin de calentar una primera corriente **30** de aire comprimido y de ese modo formar la primera corriente **51** de aire comprimido calentado. El primer intercambiador **2** de calor también puede calentar una primera corriente **57** de reciclado que es proporcionada al primer combustor **3**. La primera corriente **57** de reciclado puede funcionar para reducir la temperatura en el primer combustor **3** con el fin de reducir así la producción de NO<sub>x</sub> en la combustión de la primera corriente **26** de combustible con la primera corriente **51** de aire. La primera corriente **57** de reciclado puede funcionar también para reducir la temperatura de la corriente **27** de combustión que sale del primer combustor **3** a una temperatura que esté en o por debajo de la temperatura máxima de entrada de la primera turbina **5**. La primera corriente **57** de reciclado puede formarse por enfriamiento de la parte **58** de la corriente **28** de descarga procedente de la primera turbina **5** en el primer intercambiador **2** de calor y un enfriador **8**, separando una corriente **31** de líquido en un separador **9**, comprimiendo una parte **59** de la corriente separada **15** en un compresor **53** de reciclado, y dirigiendo una parte **60** de la corriente separada comprimida **49** de vuelta a través del primer intercambiador de calor. La primera corriente **57** de reciclado puede incluir también la parte restante **16** de la corriente comprimida separada **49** que ha sido calentada en el segundo intercambiador **1** de calor para formar una corriente separada comprimida calentada **50**.

45     El segundo intercambiador **1** de calor puede ser calentado por la corriente **39** de descarga de la tercera turbina **35**. En particular, la corriente **18** de descarga de la segunda turbina **6** puede ser dirigida a través del tercer combustor **34**, y la corriente **36** de combustión del tercer combustor puede ser aportada a la tercera turbina **35**. La corriente **18** de descarga de la segunda turbina **6** puede así ser calentada y combinada con gases de combustión para formar la tercera corriente **36** de combustión, que puede estar a una temperatura relativamente más alta que la corriente de descarga de la segunda turbina **6**, y por tanto la tercera turbina **35** puede funcionar con una mayor eficiencia que si recibiese la corriente de descarga directamente desde la segunda turbina. Luego se dirige la corriente **39** de descarga de la tercera turbina **35** al segundo intercambiador **1** de calor y después se puede descargar a la atmósfera la corriente **19** de descarga enfriada. Como alternativa, tal como se ilustra, la corriente **19** de descarga enfriada puede ser dirigida a través de un lavador **97** (por ejemplo, un sistema de adsorción de CO<sub>2</sub>) configurado para extraer CO<sub>2</sub> y/u otros gases antes de dirigir a la atmósfera un gas **99** de evacuación.

55     Se puede emplear el segundo intercambiador **1** de calor para calentar la parte restante **16** de la corriente separada comprimida **49** para formar la corriente separada comprimida calentada **50** que se puede combinar con la otra parte **60** de la corriente separada comprimida **49** que es calentada en el primer intercambiador **2** de calor para formar la primera corriente **57** de reciclado, que es dirigida a través del primer combustor **3**. El segundo intercambiador **1** de

calor puede ser empleado también para calentar una parte restante **17** de la corriente separada **15** para formar una segunda corriente **40** de reciclado que es dirigida a través del segundo combustor **4**. La segunda corriente **40** de reciclado puede funcionar para reducir la temperatura en el segundo combustor **4** para reducir así la producción de  $\text{NO}_x$  en la combustión de la segunda corriente **24** de combustible con la segunda corriente **21** de aire. La segunda corriente **40** de reciclado puede funcionar también para reducir la temperatura de la corriente **23** de combustión que sale del segundo combustor **4** hasta una temperatura que esté en o por debajo de la temperatura máxima de entrada de la segunda turbina **6**. En algunas realizaciones, se puede reciclar una parte restante **22** de la corriente **28** de descarga desde la primera turbina **5** a través del segundo combustor **4** sin ser antes enfriada, calentada o ser tratada de otro modo después de salir de la primera turbina. La parte restante **22** de la corriente **28** de descarga sirve para permitir que nitrógeno, argón y otros componentes inertes no combustibles de las corrientes de aire de combustión y las corrientes de combustible junto con la mayor parte del  $\text{CO}_2$  y parte del agua producida como un producto de combustión o presente en las corrientes de aire o las corrientes de combustible sean evacuadas a la atmósfera como corriente **99** y evitar la acumulación de los mismos en el sistema. La primera turbina **5** puede funcionar con una elevada presión de entrada y una baja relación de presiones, dando como resultado una elevada presión de descarga. El propósito de la segunda turbina **6** y la tercera turbina **35** con sus combustores asociados **4**, **34** y el segundo intercambiador **1** de calor es permitir que la energía de presión de la parte restante **22** de la corriente **28** de descarga sea utilizada eficientemente para incrementar la producción total de energía y la eficiencia del proceso. El segundo intercambiador **1** de calor puede proporcionar también calor a la segunda **21** y tercera **38** corrientes de aire que son dirigidas respectivamente a los segundo **4** y tercer **34** combustores.

Además, con respecto a las corrientes **51**, **21**, **38** de aire comprimido calentado aportadas a los combustores **3**, **4**, **34**, el sistema puede incluir un sistema de compresores de aire que incluya primer **10**, segundo **11** y tercer **42** compresores de aire, que pueden ser accionados por un motor eléctrico **54** en algunas realizaciones, o estar acoplados mecánicamente a una o más de las turbinas **5**, **6**, **35**. El tercer compresor **42** de aire puede recibir una corriente **12** de aire de alimentación (por ejemplo, aire ambiente) y comprimir la corriente de aire de alimentación. Una primera parte **48** de la corriente **12** de alimentación comprimida por el tercer compresor **42** de aire puede ser dirigida a través del segundo intercambiador **1** de calor para formar la corriente **38** de aire comprimido calentado, que es aportada al tercer combustor **34**. Una segunda parte **47** de la corriente **12** de alimentación comprimida por el tercer compresor **34** de aire puede ser dirigida al segundo compresor **11** de aire. Una primera parte **20** de la corriente **47** de aire comprimida por el segundo compresor **11** de aire puede ser dirigida a través del segundo intercambiador **1** de calor para formar la corriente **21** de aire comprimido calentado, que es aportada al segundo combustor **4**. Una segunda parte **14** de la corriente **47** de aire comprimida por el segundo compresor **11** de aire puede ser recibida por el primer compresor **10** de aire. La corriente **30** de aire comprimida por el primer compresor **10** de aire puede ser dirigida a través del primer intercambiador **2** de calor para formar la primera corriente **51** de aire, que es aportada al primer combustor **3**.

Debido a esta configuración en serie de compresores en donde el tercer combustor **34** recibe una corriente **38** de aire comprimida por el tercer compresor **42** de aire, el segundo combustor **4** recibe una corriente **21** de aire comprimida tanto por el tercer compresor de aire como por el segundo compresor **11** de aire, y el primer combustor **3** recibe una corriente **51** de aire comprimida por el tercer compresor de aire, el segundo compresor de aire y el primer compresor **10** de aire, el aporte de aire a los combustores puede variar. En particular, el caudal de aire aportado a los combustores puede ser máximo en el primer combustor **3**, más bajo en el tercer combustor **34**, y entre los caudales de aire para los primer y tercer combustores en el segundo combustor **4**. Además, las corrientes **26**, **24** de combustible recibidas respectivamente por el primer y segundo combustores **3**, **4** puede estar a una presión relativamente superior, debido a la compresión de una corriente **25** de alimentación de combustible por un compresor **7** de combustible que puede ser impulsado por un motor eléctrico **77**, en comparación con la corriente **37** de combustible suministrada al tercer combustor **34**, que puede no estar comprimida por el compresor de combustible. En consecuencia, los caudales de las corrientes de combustible **26**, **24**, **37** y las corrientes de aire comprimido calentado **51**, **21**, **38** pueden ser controladas para proporcionar relaciones de aire a combustible deseadas. Por ejemplo, los caudales pueden estar configurados para proporcionar una combustión sustancialmente estequiométrica. Los caudales de cada una de las corrientes **26**, **24**, **37** de combustible a cada uno de los combustores **3**, **4**, **34** son controlados por separado para proporcionar calor suficiente, cuando se queman en aire en condiciones cercanas a las estequiométricas y se mezclan con flujos de reciclado, para proporcionar la temperatura de entrada requerida para cada una de las turbinas **5**, **6**, **35**. Las corrientes **51**, **21**, **38** de aire son controladas por separado en uno o más lugares (por ejemplo, en las corrientes **48**, **20**, **30**) para proporcionar una combustión cercana a la estequiométrica del combustible de las corrientes **26**, **24**, **37** de combustible en los combustores **3**, **4**, **34**. Los caudales de las corrientes **57**, **40** de reciclado son controlados por separado en uno o más lugares (por ejemplo, en las corrientes **60**, **16**, **17**) para proporcionar el caudal requerido en las corrientes **27**, **23**, **36** de combustión aportadas a las turbinas **5**, **6**, **35**. Así, el suministro de aire (por ejemplo, uno o más componentes configurados para aportar las corrientes **51**, **21**, **38** de aire a los combustores **3**, **4**, **34**) y/o el suministro de combustible (por ejemplo, uno o más de los componentes configurados para aportar las corrientes **26**, **24**, **37** de combustible a cada uno de los combustores **3**, **4**, **34**) pueden estar configurados para aportar la corriente de aire y la corriente de combustible en una relación configurada para dar como resultado una combustión sustancialmente estequiométrica en el combustor (por ejemplo, con hasta aproximadamente 5% de  $\text{O}_2$  en exceso). En este sentido, mediante el empleo de una combustión sustancialmente estequiométrica de corrientes de aire que comprenden aire ambiente, los gases inertes en exceso (por ejemplo,  $\text{N}_2$  y Ar) resultantes de la combustión pueden ser extraídos del

sistema cerrado y evacuados a la atmósfera. Por ejemplo, la corriente **36** que sale del tercer combustor **34** y entra a la tercera turbina **35** puede presentar una elevada presión (por ejemplo de 20 bar (2 MPa) a 60 bar (6 MPa)) y alta temperatura e incluir una concentración mayoritaria de gases inertes. Después de la expansión, la corriente **39** y la corriente **19** pueden tener cada una una baja presión coincidente con o cercana a la presión atmosférica. Así, la corriente es expandida a través de una o más turbinas para producir energía y reducir la presión de los gases inertes hasta sustancialmente la presión atmosférica antes de evacuar los gases inertes a la atmósfera, tal como se ha descrito más arriba. A continuación se proporciona una descripción adicional del funcionamiento del sistema de la Figura 1. Sin embargo, debe entenderse que las temperaturas, presiones, combustibles, gases, etc. son proporcionados con fines ilustrativos. En consecuencia, el funcionamiento del sistema puede diferir en uno o más aspectos de los ejemplos proporcionados en algunas realizaciones.

El sistema de la Figura 1 puede utilizar intercambiadores **2**, **1** de calor (por ejemplo, economizadores) en un ciclo de potencia Brayton de alta presión y baja relación de presiones que puede utilizar predominantemente N<sub>2</sub> mezclado con productos de combustión CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O como fluido de trabajo proporcionado a los combustores a través de una pluralidad de corrientes **57**, **40**, **22**, **18** de reciclado. El nitrógeno puede constituir el componente principal (por ejemplo, más del 50% de N<sub>2</sub> sobre una base molar) en una o más de las corrientes **57**, **40**, **22**, **18** de reciclado. La alta presión en el combustor **3** puede ser mayor que aproximadamente 60 bar (6 MPa), mayor que aproximadamente 80 bar (8 MPa), o mayor que aproximadamente 120 bar (12 MPa), o bien puede situarse en el intervalo de aproximadamente 80 bar (8 MPa) a aproximadamente 500 bar (50 MPa), de aproximadamente 100 bar (10 MPa) a aproximadamente 450 bar (45 MPa), o de aproximadamente 200 bar (20 MPa) a aproximadamente 400 bar (40 MPa). La relación de presiones a través de cada una de las turbinas **5**, **6**, **35** puede situarse en el intervalo de aproximadamente 4 a aproximadamente 12, aproximadamente 5 a aproximadamente 11, o aproximadamente 7 a aproximadamente 10. Se puede quemar una corriente **26** de combustible que comprende un hidrocarburo en un primer combustor **3** de alta presión con una cantidad casi estequiométrica de oxígeno procedente de una primera corriente **51** de aire comprimido calentado. La corriente de combustible comprende preferiblemente un hidrocarburo que es gaseoso en condiciones ambientales, tal como el metano (es decir, gas natural). No obstante, se pueden utilizar otros hidrocarburos, tales como gas licuado de petróleo (LPG, por sus siglas en inglés). Así, la corriente de combustible puede comprender un gas de hidrocarburo comprimido (por ejemplo, cualquier combinación de gases de hidrocarburos C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub>). Aún más, se pueden usar combustibles destilados. Específicamente, se puede utilizar cualquier combustible líquido obtenido de la destilación del petróleo, tal como gasolina, gasóleo, queroseno, combustible de calefacción y combustible de aviación. Más en general, un combustible líquido adecuado puede ser un destilado de petróleo que comprenda hidrocarburos C<sub>5</sub>-C<sub>70</sub>, C<sub>6</sub>-C<sub>50</sub>, C<sub>7</sub>-C<sub>30</sub> ó C<sub>8</sub>-C<sub>20</sub>. El gas de combustión neto puede ser mezclado con la corriente **57** de reciclado que modera la temperatura de la corriente **27** de combustión a un valor en o por debajo de la temperatura máxima de entrada de la primera turbina **5**. Una parte **60** de la primera corriente **57** de reciclado puede ser precalentada en un primer intercambiador **2** de calor utilizando calor de la parte **58** de la corriente **28** de descarga recibida desde la primera turbina **5**. La alta presión de entrada y temperatura de entrada y la baja relación de presiones de las turbinas **5**, **6** y **35** significa que las temperaturas de descarga pueden ser relativamente altas, típicamente en el intervalo de 400°C a 800°C. El calor presente en las corrientes **28**, **18** y **39** de descarga de turbina puede ser recuperado en los intercambiadores de calor **1**, **2** para alcanzar alta eficiencia y maximizar la producción de energía.

La temperatura de la corriente **27** de combustión recibida por la primera turbina **5** puede ser al menos aproximadamente 500°C, al menos aproximadamente 700°C, o al menos aproximadamente 900°C, o bien puede situarse en el intervalo de aproximadamente 900°C a aproximadamente 1.600°C, aproximadamente 1.000°C a aproximadamente 1.500°C, o aproximadamente 1.100°C a aproximadamente 1.400°C. El empleo de una relación de alta presión respecto a baja presión de aproximadamente 4 a aproximadamente 12, de aproximadamente 5 a aproximadamente 11, o de aproximadamente 7 a aproximadamente 10 en la primera turbina **5** puede dar como resultado una presión de descarga de la corriente **28** de descarga en el intervalo de aproximadamente 6,7 bar (0,67 MPa) a aproximadamente 125 bar (12,5 MPa), de aproximadamente 12 bar (1,2 MPa) a aproximadamente 100 bar (10 MPa), de aproximadamente 15 bar (1,5 MPa) a aproximadamente 75 bar (7,5 MPa), o de aproximadamente 20 bar (2 MPa) a aproximadamente 57 bar (5,7 MPa). En última instancia, se puede descargar a la atmósfera una parte de la corriente **27** de combustión procedente del primer combustor **3**, que puede comprender N<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O. Al menos una parte de la corriente **27** de combustión procedente del primer combustor **3** puede ser expandida en una segunda turbina **6** después de ser recalentada en un segundo combustor **4** con moderación de temperatura por la segunda corriente **40** de reciclado. La segunda corriente **40** de reciclado y la segunda corriente **21** de aire pueden ser calentadas por la corriente **39** de descarga procedente de la tercera turbina **35** en el segundo intercambiador **1** de calor hasta a una temperatura de aproximadamente 200°C a aproximadamente 800°C, de aproximadamente 300°C a aproximadamente 600°C, o de aproximadamente 450°C a aproximadamente 550°C.

Opcionalmente, para lograr una alta eficiencia, se puede hacer pasar la corriente **23** de combustión procedente del segundo combustor **4** a través de la tercera turbina **35**, estando el tercer combustor **34** ubicado entre las segunda **6** y tercera turbinas con el fin de maximizar la generación de potencia desde la corriente de combustión a medida que es expandida hasta la presión atmosférica. Las segunda **6** y tercera **35** turbinas pueden emplear relaciones de presiones sustancialmente iguales. Cada una de las corrientes **27**, **23**, **36** de combustión puede estar a una temperatura de aproximadamente 500°C a aproximadamente 1.800°C, de aproximadamente 900°C a aproximadamente 1.600°C, o de aproximadamente 1.100°C a aproximadamente 1.400°C. La segunda corriente **40**

de reciclado aportada al segundo combustor **4**, y opcionalmente aportada al tercer combustor **34**, y las corrientes **21**, **38** de aire comprimido calentado para los segundo y tercer combustores son precalentadas contra la corriente **39** de descarga de la tercera turbina **35** en el segundo intercambiador **1** de calor. La corriente **39** de descarga procedente de la tercera turbina **35** puede ser enfriada por debajo de 100°C en el segundo intercambiador **1** de calor antes de ser descargada como una corriente **19** de escape enfriada. Preferiblemente, la corriente **19** de escape puede tener un contenido molar de CO<sub>2</sub> superior a aproximadamente 5%, superior a aproximadamente 8%, o superior a aproximadamente 10%. A este respecto, al hacer que la corriente **19** de escape tenga un contenido relativamente alto de CO<sub>2</sub>, puede resultar facilitado el uso de un lavador **97** de gases. Tal como se utiliza el término en la presente memoria, "lavador" puede abarcar cualquier aparato o sistema configurado para extraer un componente definido de una corriente, más específicamente para extraer un contaminante, tal como CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>. En particular, se puede utilizar como lavador cualquier sistema adecuado para la adsorción y eliminación de CO<sub>2</sub>. Los ejemplos no limitantes de sistemas basados en disolvente que se pueden utilizar incluyen carbonatos alcalinos, alcoholaminas y alcoholes, dioles y éteres. También se podrían utilizar otros sistemas, tales como sistemas basados en membranas, o sistemas de adsorción. En consecuencia, el lavador **97** puede reducir el contenido de CO<sub>2</sub> y enviar un gas **99** de evacuación a la atmósfera. El CO<sub>2</sub> extraído puede ser capturado para ser secuestrado o para su uso en otros métodos. En otras realizaciones, la corriente **19** de escape puede ser dirigida a la atmósfera sin dirigir la corriente de escape a través de un sistema de purificación.

La cantidad de aire procedente de las corrientes **51**, **21**, **38** de aire comprimido calentado aportada a cada uno de los combustores **3**, **4**, **34** puede estar limitada a una concentración de O<sub>2</sub> cercana a la estequiométrica, con una concentración neta de exceso de O<sub>2</sub> inferior a aproximadamente 5%, inferior a aproximadamente 3%, o inferior a aproximadamente 2%, o bien situada en un intervalo de aproximadamente 0,1% a aproximadamente 5%, de aproximadamente 0,15% a aproximadamente 4%, o de aproximadamente 0,25% a aproximadamente 3% en comparación con la cantidad estequiométrica requerida para la combustión completa del combustible **26**, **24**, **37**. Al emplear tales concentraciones estequiométricas con respecto al aire suministrado a los combustores **3**, **4**, **34** por las corrientes **51**, **21**, **38** de aire comprimido calentado, y reciclar corrientes de producto de combustión agotadas en O<sub>2</sub>, los ciclos descritos se distinguen de un sistema de turbina de gas convencional utilizado en plantas NGCC. Una turbina de gas convencional puede usar una corriente de aire comprimido para diluir gases de combustión producidos en los combustores a fin de conseguir la temperatura de entrada de turbina requerida. Típicamente, alrededor de dos tercios del aire comprimido total sortean la combustión, y esto se traduce típicamente en concentraciones de aproximadamente 14% de O<sub>2</sub> y aproximadamente 3% de CO<sub>2</sub> en el escape. En contraste, los sistemas de acuerdo con la presente descripción pueden dar como resultado una corriente separada **15** producida por la combustión en el primer combustor **3** y la expansión en la primera turbina **5**, después del enfriamiento en el primer intercambiador **2** de calor y enfriador **8** y la extracción de una corriente **31** de agua condensada, que tiene un contenido de CO<sub>2</sub> típicamente en el intervalo de aproximadamente 6% a aproximadamente 15%, de aproximadamente 8% a aproximadamente 14%, o de aproximadamente 10% a aproximadamente 12% molar, en comparación con de aproximadamente 2% a aproximadamente 4% para un sistema de turbina de gas típico.

Ventajosamente, para la eliminación de CO<sub>2</sub>, la corriente **49** separada comprimida procedente de la corriente **28** de descarga de la primera turbina **5** está disponible en un intervalo de presiones preferido de aproximadamente 5 bar (0,5 MPa) hasta aproximadamente 150 bar (15 MPa) o de aproximadamente 6,5 bar (0,65 MPa) hasta aproximadamente 124 bar (12,4 MPa) y a temperatura cercana a la atmosférica tras el enfriamiento en el primer intercambiador **2** de calor, la eliminación de agua en un separador **9**, y la compresión en el compresor **53** de reciclado. Esta elevada presión parcial del CO<sub>2</sub> reduce el coste de capital de la eliminación de CO<sub>2</sub> y permite una mayor eficiencia de eliminación. Por ejemplo, de aproximadamente 50% a aproximadamente 80%, de aproximadamente 55% a aproximadamente 75%, o de aproximadamente 60% a aproximadamente 70% de la corriente total de CO<sub>2</sub> producida por la combustión del combustible puede estar disponible en esta corriente comprimida separada **49**, que puede comprender (N<sub>2</sub>+Ar), CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> en exceso y agua residual en fase vapor a una presión de, con preferencia, de aproximadamente 15 bar (1,5 MPa) a aproximadamente 100 bar (10 MPa) y temperatura cercana a la ambiente. La fracción restante de la corriente total de CO<sub>2</sub> está disponible en la parte restante **17** de la corriente separada **15** a presión atmosférica y a una concentración molar sobre base seca en el intervalo de aproximadamente 7% a aproximadamente 15%, de aproximadamente 8% a aproximadamente 14%, o de aproximadamente 10% a aproximadamente 12%, que puede comprender los mismos componentes que la corriente separada comprimida **49**.

El sistema descrito en la presente memoria puede comprender un compresor de aire de múltiples etapas (que comprenda primer **10**, segundo **11** y tercer **42** compresores de aire) que suministre aire a dos o tres niveles de presión para los combustores **3**, **4**, **34**, y un compresor **53** de reciclado separado, de alta presión y baja relación de presiones, que puede hacer circular una o más de las corrientes **57**, **40**, **22**, **18** a uno o más de los combustores **3**, **4**, **34**. Los compresores **10**, **11**, **42** de aire pueden ser impulsados eléctricamente (por ejemplo, por un motor eléctrico **54**), o bien impulsados por al menos parte de la potencia en eje de las turbinas **5**, **6** y **35**. Los compresores **10**, **11**, **42** de aire y el compresor **53** de reciclado pueden estar opcionalmente vinculados como un sistema único impulsado por un único sistema de accionamiento. Como alternativa, los compresores **10**, **11**, **42** de aire y/o el compresor **53** de reciclado pueden estar separados y ser impulsados de manera independiente.

El primer intercambiador **2** de calor puede estar configurado para proporcionar el enfriamiento de la corriente **28** de descarga de la turbina de alta presión que sale de la primera turbina **5** y entra al primer intercambiador de calor a

una temperatura en el intervalo de aproximadamente 400°C a aproximadamente 1.200°C, de aproximadamente 500°C a aproximadamente 1.000°C, o de aproximadamente 600°C a aproximadamente 800°C. El calor liberado por la corriente **28** de descarga de la primera turbina **5** puede ser utilizado para calentar al menos una parte **60** de la primera corriente **57** de reciclado. La alta eficiencia del sistema global está fuertemente influenciada por la consecución de una diferencia de temperaturas relativamente pequeña entre la temperatura de la corriente **28** de descarga que sale de la primera turbina **5** y la primera corriente **57** de reciclado calentada. El calor específico de la corriente separada comprimida **49** puede ser significativamente mayor que el de la corriente **28** de descarga procedente de la primera turbina **5** y aunque el caudal de la corriente de descarga sea superior al caudal de la corriente separada comprimida (debido a la eliminación de una corriente **31** de condensación y de la parte remanente **17** de la corriente separada **15**), puede originarse un caudal insuficiente de corriente de descarga que dé lugar a una diferencia de temperaturas relativamente pequeña a través del primer intercambiador **2** de calor.

Para superar este problema, se puede precalentar en el segundo intercambiador **1** de calor una parte **16** de la corriente separada comprimida **49** contra la corriente **39** de descarga procedente de la tercera turbina **35**. El caudal de la parte **16** de la corriente separada comprimida **49** puede estar configurado para dar como resultado que tenga una diferencia de temperaturas inferior a aproximadamente 40°C, inferior a aproximadamente 30°C, inferior a aproximadamente 20°C, o inferior a aproximadamente 10°C con respecto a la temperatura inicial de la corriente **39** de descarga de la tercera turbina **35** en el segundo intercambiador **1** de calor. De este modo, el caudal de la parte **60** de la corriente separada comprimida **49** que es dirigida a través del primer intercambiador **2** de calor puede ser reducida además con respecto al caudal de la corriente **28** de descarga procedente de la primera turbina **5**, y también se puede lograr una diferencia de temperaturas relativamente pequeña entre la primera corriente **57** de reciclado y la corriente de descarga procedente de la primera turbina. La parte **16** de la corriente separada comprimida **49** que es precalentada en el segundo intercambiador **1** de calor para formar un flujo calentado **50** puede ser combinada con la parte **60** de la corriente separada comprimida que es calentada mediante el primer intercambiador **2** de calor para formar la primera corriente **57** de reciclado calentada. Aunque se ha ilustrado como que se combina con la parte **60** de la corriente separada comprimida **49** aguas abajo del primer intercambiador **2** de calor, en lugar de ello el flujo calentado **50** puede combinarse con esta parte aguas arriba del primer intercambiador de calor o bien en el intercambiador de calor en un punto en donde las dos corrientes tengan sustancialmente la misma temperatura.

La parte restante **17** de la corriente separada **15** puede sortear el compresor **53** de reciclado y pasar a través del segundo intercambiador **1** de calor al segundo combustor **4** como segunda corriente **40** de reciclado. La configuración descrita en lo que antecede puede dar lugar a una diferencia de temperaturas entre el flujo que sale del primer intercambiador **2** de calor (y que al menos en parte forma la primera corriente **57** de reciclado calentada) y el escape **28** de la turbina procedente de la primera turbina **5**, que se sitúe en el intervalo de aproximadamente 10°C a aproximadamente 40°C. Los intercambiadores **2**, **1** de calor pueden ser un intercambiador de calor multicanal soldado por difusión, que utiliza una aleación con alto contenido de níquel tal como la aleación 617, o bien un intercambiador de calor de placas y aletas de acero inoxidable bronzesoldado al vacío, en algunas realizaciones. También se pueden utilizar otros intercambiadores de calor adecuados.

En un sistema preferido, una parte **17** de la corriente separada **15** enfriada, formada a partir de la corriente **28** de descarga; una parte **16** de la corriente enfriada, separada y presurizada **49** formada a partir de la corriente **28** de descarga; y corrientes **21**, **38** de aire para los segundo **4** y tercer **34** combustores, son calentadas en el segundo intercambiador **1** de calor contra la corriente **39** de descarga procedente de la tercera turbina **35**. La segunda corriente **40** de reciclado (por ejemplo, la parte restante **17** de la corriente separada enfriada **15**, después del calentamiento en el segundo intercambiador **1** de calor) entra en el segundo combustor **4** con la corriente **24** de combustible, corriente **21** de aire comprimido calentado (por ejemplo, la corriente **20** de aire después del calentamiento), y una parte reciclada **22** de la corriente **28** de descarga de la turbina. La corriente **24** de combustible puede ser comprimida por el compresor **7** de combustible a una presión sustancialmente igual a la presión de la segunda corriente **40** de reciclado. La segunda corriente **23** de combustión es descargada del segundo combustor **4** a una temperatura que es adecuada para la corriente de entrada a la segunda turbina **6** (por ejemplo, en el intervalo de aproximadamente 900°C a aproximadamente 1.600°C).

Se puede dirigir una parte **58** de la corriente **28** de descarga de turbina procedente de la primera turbina **5**, hacia el primer intercambiador **2** de calor con el fin de proporcionar calor a la primera corriente **57** de reciclado y a la corriente **51** de aire aportada al primer combustor **3**. La corriente **51** de aire y la primera corriente **57** de reciclado pueden ser calentadas a una temperatura de aproximadamente 400°C a aproximadamente 900°C, y preferiblemente de aproximadamente 600°C a aproximadamente 800°C. Después de fluir a través del primer intercambiador **2** de calor, la corriente **28** de descarga forma una corriente enfriada **33** a una temperatura que puede estar por debajo de 100°C. La corriente enfriada **33** puede ser enfriada adicionalmente por el enfriador **8** para formar una corriente enfriada **32** a una temperatura sensiblemente igual a la temperatura ambiente media, con el fin de hacer que los líquidos se condensen desde la corriente, pudiendo ser extraídos como una corriente líquida **31** por el separador **9**.

La corriente **18** de descarga de la segunda turbina **6** es opcionalmente recalentada en el tercer combustor **34** en el cual se quema la tercera corriente **37** de combustible con la tercera corriente **38** de aire comprimido calentada. El recalentamiento de la corriente **18** de descarga que sale de la segunda turbina **6** puede alcanzar temperaturas de entrada para la tercera turbina **35** en el intervalo de aproximadamente 600°C a aproximadamente 1.800°C, de

aproximadamente 700°C a aproximadamente 1.700°C, o de aproximadamente 900°C a aproximadamente 1.600°C, que aumentarán la eficiencia del ciclo al proveer a la tercera turbina con fluido de trabajo que está a una temperatura superior a la de la corriente de descarga procedente de la segunda turbina. La temperatura de la corriente **39** de descarga que sale de la tercera turbina **35** puede aumentar hasta el intervalo de aproximadamente 200°C a aproximadamente 900°C, limitada por la temperatura máxima de diseño del segundo intercambiador **1** de calor. En realizaciones que emplean una parte **58** de la corriente **28** de descarga procedente de la primera turbina **5** para calentar el primer intercambiador **2** de calor, se pueden emplear el tercer combustor **34** y la segunda turbina **6** para asegurar una adecuada relación de presiones a través de la tercera turbina **35**. En general, la tercera turbina **35** puede tener una relación de presiones mayor que la segunda turbina **6** y una temperatura de salida inferior. La temperatura de entrada de la tercera turbina **35** debe ser lo más alta posible - por ejemplo, en el intervalo de aproximadamente 1.000°C a aproximadamente 1.600°C, limitada por la temperatura máxima de entrada de la misma.

Los intercambiadores **2, 1** de calor pueden ser un intercambiador de calor de placa y aletas de acero inoxidable bronzesoldado al vacío o bien un intercambiador de calor de alta presión de aleación con alto contenido de níquel, soldado por difusión, dependiendo de la combinación de diseño de temperatura y presión. Tales unidades son fabricadas, por ejemplo, por Sumitomo Precision Products, Chart Industries o Heatric. Opcionalmente, también se pueden utilizar uno o los dos intercambiadores **1, 2** de calor para precalentar parte o toda la corriente **25** de alimentación de combustible alimentada al sistema. En algunas realizaciones, los intercambiadores **2, 1** de calor pueden estar configurados para emplear respectivamente la parte **58** de la corriente **28** de descarga procedente de la primera turbina **5** y la corriente **39** de descarga procedente de la tercera turbina **35** para calentar cada uno de los otros fluidos, respectivamente recibidos a través de los intercambiadores de calor, desde una temperatura por debajo de aproximadamente 100°C hasta una temperatura de aproximadamente 300°C a aproximadamente 900°C y preferiblemente a una temperatura de aproximadamente 450°C a aproximadamente 800°C. Opcionalmente, se pueden vincular dos o más de las turbinas **5, 6, 35** a un único generador eléctrico **45** a través de un eje de impulsión común o bien a través de cajas de engranajes para permitir diferentes velocidades de rotación en cada turbina a fin de permitir el funcionamiento de cada turbina a sus velocidades óptimas respectivas. Por consiguiente, se puede emplear el sistema para generar electricidad en algunas realizaciones.

Las Tablas 1-4, que se proporcionan a continuación, ilustran parámetros de funcionamiento de ejemplo en varias corrientes **12, 28, 22, 23, 58, 51, 18, 24, 19, 27, 33, 32, 31, 15, 26** y **25**, y el segundo combustor **4**, durante el funcionamiento del sistema ilustrado en la Figura 1. Los parámetros de funcionamiento están basados en el funcionamiento con una corriente de combustible de metano puro de 0,4536 kmol/h en condiciones ISO, suponiendo 88,7% de eficiencia de la turbina y 85% de eficiencia del compresor. Algunos compresores que se muestran en forma de diagrama han sido calculados como unidades multietapa con refrigeración intermedia. No se incluyen otras demandas de energía auxiliar. Se calcula que la eficiencia neta del sistema sobre una base de LHV es aproximadamente 60%.

TABLA 1: Parámetros de trabajo ilustrativos en las corrientes **12, 28, 22, 23** y **58**.

CORRIENTE:	<b>12</b>	<b>28</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>58</b>
O <sub>2</sub> (kmol/h)	9,2533E-01	5,3181E-02	2,6590E-03	3,1486E-01	5,0522E-02
CH <sub>4</sub> (kmol/h)	0	2,1455E-25	1,0750E-26	0	2,0412E-25
CO <sub>2</sub> (kmol/h)	0	1,3294E+00	6,6471E-02	2,3740E-01	1,2630E+00
H <sub>2</sub> O (kmol/h)	4,4614E-02	6,1447E-01	3,0724E-02	2,1364E-03	5,8375E-01
Ar (kmol/h)	4,1076E-02	1,2040E-01	6,0201E-03	3,5056E-02	1,1438E-01
N <sub>2</sub> (kmol/h)	3,4504E+00	1,0114E+01	5,0569E-01	2,9447E+00	9,6081E+00
Flujo total (kmol/h)	4,4615	12,2313	0,6116	3,5342	11,6197
Flujo total (kg/h)	128,7128	359,4123	17,9706	104,4543	341,4417
Flujo total (m <sup>3</sup> /h)	107,0595	27,1543	1,3577	5,8739	25,7966
Temperatura (°C)	15,5556	782,0994	782,0994	494,6406	782,0994
Presión (bar, MPa)	1, (0,1)	40, (4)	40, (4)	39, (3,9)	40, (4)

CORRIENTE:	<u>12</u>	<u>28</u>	<u>22</u>	<u>23</u>	<u>58</u>
Fracción de vapor	1	1	1	1	1
Fracción de líquido	0	0	0	0	0
Fracción de sólido	0	0	0	0	0
Densidad (kmol/m <sup>3</sup> )	0,0417	0,4504	0,4504	0,6017	0,4504
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1,2022	13,2359	13,2359	17,7826	13,2359
Volumen de líquido (m <sup>3</sup> /h a 15,6°C)	0,2374	0,6333	0,0317	0,1892	0,6016

TABLA 2: Parámetros de trabajo ilustrativos en las corrientes **51, 18, 24 y 19**

CORRIENTE:	<u>51</u>	<u>18</u>	<u>24</u>	<u>19</u>
O <sub>2</sub> (kmol/h)	6,6100E-01	1,8143E-02	0	1,8143E-02
CH <sub>4</sub> (kmol/h)	0	1,7418E-25	1,4969E-01	1,7418E-25
CO <sub>2</sub> (kmol/h)	1,0255E+00	4,5355E-01	0	4,5355E-01
H <sub>2</sub> O (kmol/h)	6,6574E-03	3,3223E-01	0	3,3223E-01
Ar (kmol/h)	1,2040E-01	4,1076E-02	0	4,1076E-02
N <sub>2</sub> (kmol/h)	1,0114E+01	3,4504E+00	0	3,4504E+00
Flujo total (kmol/h)	11,9274	4,2954	0,1497	4,2954
Flujo total (kg/h)	354,5368	124,8263	2,4014	124,8263
Flujo total (m <sup>3</sup> /h)	3,7067	232,3210	0,0806	113,2927
Temperatura (°C)	767,5367	507,1197	36,7829	45,0356
Presión (bar, MPa)	304,6, (30,46)	1,2, (0,12)	45, (4,5)	1, (0,1)
Fracción de vapor	1	1	1	0,997645
Fracción de líquido	0	0	0	0,002355
Fracción de sólido	0	0	0	0
Densidad (kmol/m <sup>3</sup> )	3,2178	0,0185	1,8571	0,0379
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	95,6478	0,5373	29,7925	1,1018
Volumen de líquido (m <sup>3</sup> /h a 15,6°C)	0,6386	0,2183	0,0080	0,2183

TABLA 3: Parámetros de trabajo ilustrativos en las corrientes **27, 33, 32 y el combustor 4**

CORRIENTE:	<u>4</u>	<u>27</u>	<u>33</u>	<u>32</u>
O <sub>2</sub> (kmol/h)	1,8143E-02	5,3181E-02	5,0522E-02	5,0522E-02
CH <sub>4</sub> (kmol/h)	1,7418E-25	2,1455E-25	2,0412E-25	2,0412E-25
CO <sub>2</sub> (kmol/h)	4,5355E-01	1,3294E+00	1,2630E+00	1,2630E+00
H <sub>2</sub> O (kmol/h)	3,3223E-01	6,1447E-01	5,8375E-01	5,8375E-01
Ar (kmol/h)	4,1076E-02	1,2040E-01	1,1438E-01	1,1438E-01
N <sub>2</sub> (kmol/h)	3,4504E+00	1,0114E+01	9,6081E+00	9,6081E+00
Flujo total (kmol/h)	4,2954	12,2313	11,6197	11,6197
Flujo total (kg/h)	124,8263	359,4123	341,4417	341,4417
Flujo total (m <sup>3</sup> /h)	14,6788	5,5770	8,8685	6,6699
Temperatura (°C)	1276,8628	1278,2656	98,1279	17,2222
Presión (bar, MPa)	38, (3,8)	300, (30,0)	39,6, (3,96)	39,4, (3,94)
Fracción de vapor	1	1	0,974572	0,950223
Fracción de líquido	0	0	0,025428	0,049777
Fracción de sólido	0	0	0	0
Densidad (kmol/m <sup>3</sup> )	0,2926	2,1932	1,3102	1,7421
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	8,5038	64,4456	38,5004	51,1912
Volumen de líquido (m <sup>3</sup> /h a 15,6°C)	0,2183	0,6333	0,6016	0,6016

TABLA 4: Parámetros de trabajo ilustrativos en las corrientes **31**, **15**, **26** y **25**

CORRIENTE:	<u>31</u>	<u>15</u>	<u>26</u>	<u>25</u>
O <sub>2</sub> (kmol/h)	1,3063E-07	5,0522E-02	0	0
CH <sub>4</sub> (kmol/h)	0	0	3,0391E-01	4,5359E-01
CO <sub>2</sub> (kmol/h)	3,8056E-05	1,2629E+00	0	0
H <sub>2</sub> O (kmol/h)	5,7836E-01	5,3891E-03	0	0
Ar (kmol/h)	2,3723E-07	1,1438E-01	0	0
N <sub>2</sub> (kmol/h)	7,3028E-07	9,6081E+00	0	0
Flujo total (kmol/h)	0,5784	11,0413	0,3039	0,4536
Flujo total (kg/h)	10,4210	331,0207	4,8755	7,2769
Flujo total (m <sup>3</sup> /h)	0,0104	6,6927	0,0456	0,2651
Temperatura (°C)	17,1757	17,1757	221,5596	26,6667

CORRIENTE:	<u>31</u>	<u>15</u>	<u>26</u>	<u>25</u>
Presión (bar, MPa)	39,2, (3,92)	39,2, (3,92)	300, (30,0)	40, (40,0)
Fracción de vapor	0	1	1	1
Fracción de líquido	1	0	0	0
Fracción de sólido	0	0	0	0
Densidad (kmol/m <sup>3</sup> )	55,5867	1,6498	6,6579	1,7109
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1001,5065	49,4603	106,8111	27,4475
Volumen de líquido (m <sup>3</sup> /h a 15,6°C)	0,0104	0,5912	0,0163	0,0243

Los sistemas descritos en la presente memoria pueden ser especialmente beneficioso ya que se pueden lograr eficiencias que son comparables, o superiores, a eficiencias de sistemas NGCC conocidos, utilizando temperaturas de turbina significativamente inferiores. Por lo tanto, los sistemas de la presente invención pueden utilizar temperaturas máximas de turbina (por ejemplo, la temperatura máxima de los fluidos a través de cualquiera de las turbinas) significativamente menores que la técnica actual y aún así lograr una eficiencia neta de generación eléctrica que es comparable a, o mayor que, la eficiencia de sistemas NGCC conocidos. En algunas realizaciones, se puede describir a los sistemas y métodos como proveedores de mayor eficiencia que el NGCC para todas las temperaturas de turbina.

Hasta ahora, para alcanzar una eficiencia incrementada ha sido necesario aumentar significativamente la temperatura de funcionamiento de la turbina. Por ejemplo, los sistemas NGCC convencionales han empleado temperaturas de turbinas máximas de aproximadamente 1500°C a fin de lograr una eficiencia neta de aproximadamente 59% sobre una base de LHV. Para llegar a una eficiencia de 64%, la técnica conocida ha requerido el uso de turbinas de gas de muy alta temperatura que trabajan en la zona de 1700°C. En comparación, los presentes sistemas descritos en la presente memoria pueden lograr una eficiencia neta de aproximadamente 60% sobre una base de LHV empleando una temperatura de turbina de aproximadamente 1.279°C. En la Tabla 5 se ilustran comparaciones adicionales entre la eficiencia de los sistemas de la presente descripción y sistemas NGCC existentes, para diferentes temperaturas de funcionamiento de turbina:

TABLA 5: Comparación de eficiencia neta entre sistemas de la presente descripción y Sistemas NGCC

Temperatura máxima de turbina (°C)	Eficiencia de sistemas NGCC (% sobre base LHV)	Eficiencia de los sistemas de la presente descripción (% sobre base LHV)
1.100	47,5	55,5
1.200	51	58
1.279	53,5	60
1.400	56,5	63
1.500	59	65
1.700	64	68

Así, en una realización, los sistemas descritos pueden lograr eficiencias comparables a, o mayores que, los sistemas NGCC convencionales, utilizando temperaturas máximas de turbina más bajas. Tal como se ha señalado más arriba, puede ser deseable disminuir las temperaturas de turbina para reducir el costo de las turbinas al reducir la necesidad de materiales costosos configurados para soportar altas temperaturas. Como alternativa, los sistemas descritos en la presente memoria pueden trabajar a las mismas temperaturas máximas que sistemas NGCC convencionales, pero consiguen una eficiencia que es relativamente más alta. Por ejemplo, en una realización, un sistema o método descrito en la presente memoria puede funcionar con una eficiencia neta de generación eléctrica de al menos aproximadamente 60% sobre una base de valor calorífico inferior cuando se trabaja con una temperatura de turbina de aproximadamente 1.300°C a aproximadamente 1.500°C. En otras realizaciones, un sistema o método de acuerdo

con la presente descripción puede funcionar con una eficiencia neta de generación eléctrica sobre una base de poder calorífico inferior conforme a cualquiera de los siguientes: al menos aproximadamente 55% a una temperatura de aproximadamente 1.100°C; al menos aproximadamente 58% a una temperatura de aproximadamente 1200°C; al menos aproximadamente 63% a una temperatura de aproximadamente 1400°C; al menos aproximadamente 65% a una temperatura de aproximadamente 1500°C; o al menos aproximadamente 68% a una temperatura de aproximadamente 1700°C. En realizaciones específicas, un sistema o método de acuerdo con la presente descripción puede funcionar con una eficiencia neta de generación eléctrica de al menos aproximadamente 60% sobre una base de valor calorífico inferior cuando se trabaja con una temperatura de turbina que es inferior a aproximadamente 1.500°C, inferior a aproximadamente 1400°C, o inferior a aproximadamente 1300°C. En aún otras realizaciones, un sistema o método de acuerdo con la presente descripción puede funcionar con una eficiencia neta de generación eléctrica de al menos aproximadamente 55% sobre una base de valor calorífico inferior cuando se trabaja con una temperatura de la turbina de aproximadamente 1.100°C a aproximadamente 1.300°C.

Tal como se ha señalado más arriba, la tercera turbina **35** y el tercer combustor **34** son opcionales en algunas realizaciones. A este respecto, la Figura 2 ilustra una realización del sistema que no incluye un tercer combustor, una tercera turbina, o un tercer compresor de aire. El sistema puede ser sustancialmente similar al sistema de la Figura 1, salvo por las diferencias señaladas. Tal como se ilustra, la corriente **18'** de descarga de la segunda turbina **6** puede ser dirigida al segundo intercambiador **1'** de calor sin primeramente pasar a través de un tercer combustor y tercera turbina. En esta realización, la corriente **18'** de descarga puede estar a una presión superior a la atmosférica que sea igual a la caída de presión a través del segundo intercambiador **1** de calor (y cualesquiera tuberías y/o equipos de interconexión) entre la segunda turbina **6** y la atmósfera. Nótese que en esta realización no se utiliza un lavador. Por lo tanto, la corriente **19'** de descarga enfriada puede ser descargada a la atmósfera sin antes pasar a través de un lavador. Sin embargo, también se puede emplear en esta realización un sistema de lavador, por ejemplo tal como se ilustra en la realización del sistema de la Figura 1.

Puesto que no se emplea una tercera turbina, el tercer combustor puede no estar presente, así como las corrientes de combustible y de aire asociadas con el mismo. Por consiguiente, el sistema de compresores de aire puede no emplear un tercer compresor de aire, y el segundo intercambiador **1'** de calor puede no calentar una tercera corriente de aire. Por lo tanto, se puede enviar directamente la corriente **12'** de aire de alimentación al segundo compresor **12'** de aire, en lugar de ser primeramente comprimida por un tercer compresor de aire. En otros aspectos, el sistema de la Figura 2 puede ser sustancialmente similar al sistema de la Figura 1.

El uso de la primera turbina de alta presión y baja relación de presiones, siendo expandidos productos de combustión de la misma en una o dos etapas de turbina de potencia adicionales, acoplado con la combustión cercana a la estequiométrica utilizando aire a presión precalentado con corrientes de reciclado para moderar temperaturas de entrada a la turbina puede dar como resultado un sistema que tenga una eficiencia en el intervalo de aproximadamente 55% a aproximadamente 65%. Las altas presiones del sistema pueden permitir que la planta defina un factor de forma relativamente compacto, con un coste de capital relativamente bajo. El sistema podría ser diseñado para generaciones de potencia de un único tren superiores a 500 MW para generación de energía de carga base. El sistema puede ser empleado también en aplicaciones de menor generación, tales como unidades de propulsión de buques, utilizando combustible destilado bajo en azufre, donde se podrían lograr eficiencias térmicas superiores a 50% sobre una base de LHV.

**REIVINDICACIONES**

1. Un sistema de producción de energía, que comprende:
- 5 un primer combustor (3) configurado para quemar una primera corriente (26) de combustible y una primera corriente (51) de aire en presencia de una primera corriente (57) de reciclado para producir una primera corriente (27) de combustión;
- una primera turbina (5) configurada para expandir la primera corriente (27) de combustión;
- un primer intercambiador (2) de calor configurado para recibir al menos una parte (58) de una primera corriente (28) de descarga desde la primera turbina (5),
- 10 en donde el primer intercambiador (2) de calor está configurado para emplear la parte (58) de la primera corriente (28) de descarga para calentar la primera corriente (51) de aire y al menos una parte (60) de la primera corriente de reciclado (57) que es producida a partir de la primera corriente (28) de descarga;
- un segundo combustor (4) configurado para quemar una segunda corriente (24) de combustible y una segunda corriente (21) de aire en presencia de una segunda corriente (40) de reciclado que es producida a partir de la primera corriente (28) de descarga para producir una segunda corriente (23) de combustión;
- 15 una segunda turbina (6) configurada para expandir la segunda corriente (23) de combustión; y
- un segundo intercambiador (1) de calor configurado para calentar la segunda corriente (21) de aire y la segunda corriente (40) de reciclado.
2. El sistema de producción de energía según la reivindicación 1, en donde
- 20 el segundo intercambiador (1) de calor está configurado para emplear una segunda corriente (18) de descarga procedente de la segunda turbina (6) para calentar la segunda corriente (21) de aire y la segunda corriente (40) de reciclado;
- o en donde el segundo intercambiador (1) de calor está configurado además para calentar una segunda parte (16) de la primera corriente (57) de reciclado;
- o en donde una segunda parte (22) de la primera corriente (28) de descarga es dirigida al segundo combustor (4);
- 25 o en donde la primera corriente (51) de aire y la segunda corriente (21) de aire comprenden aire ambiente comprimido;
- o en donde la primera corriente (57) de reciclado y la segunda corriente (40) de reciclado tienen más de 50% de N<sub>2</sub> sobre una base molar;
- 30 o en donde el sistema de producción de energía está configurado para trabajar con una eficiencia neta de generación eléctrica de al menos aproximadamente 60% sobre una base de valor calorífico inferior cuando se trabaja con una temperatura de turbina de aproximadamente 1.300°C a aproximadamente 1.500°C.
3. El sistema de producción de energía según la reivindicación 1, que comprende además un tercer combustor (34) configurado para quemar una tercera corriente (37) de combustible y una tercera corriente (38) de aire en presencia de una segunda corriente (18) de descarga recibida desde la segunda turbina (6) para producir una tercera corriente (36) de combustión; y
- 35 una tercera turbina (35) configurada para expandir la tercera corriente (36) de combustión.
4. El sistema de producción de energía según la reivindicación 3, en donde el segundo intercambiador (1) de calor está configurado para emplear una tercera corriente (39) de descarga procedente de la tercera turbina (35) para calentar la segunda corriente (21) de aire y la segunda corriente (40) de reciclado.
- 40 5. El sistema de producción de energía según la reivindicación 4, en donde el segundo intercambiador (1) de calor está además configurado para calentar la tercera corriente (38) de aire o en donde el segundo intercambiador (1) de calor está además configurado para calentar una segunda parte (16) de la primera corriente (57) de reciclado.
6. El sistema de producción de energía según la reivindicación 1, que comprende además:
- un compresor (53) de reciclado configurado para comprimir la primera corriente (57) de reciclado; o bien
- 45 un separador (9) configurado para extraer una corriente (31) de líquido de la parte (60) de la primera corriente (57) de descarga dirigida a través del primer intercambiador (2) de calor.
7. El sistema de producción de energía según la reivindicación 1, que comprende además un lavador (97)

configurado para recibir una corriente (19) de descarga enfriada desde el segundo intercambiador (1) de calor; preferiblemente en donde el lavador (97) comprende un sistema de adsorción de CO<sub>2</sub>.

5 8. El sistema de producción de energía según la reivindicación 1, que comprende además un sistema de compresores (10; 11; 42) de aire configurado para comprimir una corriente (12) de aire de alimentación para producir la primera corriente (51) de aire y la segunda corriente (21) de aire.

9. El sistema de producción de energía según la reivindicación 8, en donde el sistema de compresores de aire comprende un primer compresor (10) de aire configurado para comprimir la primera corriente (51) de aire y un segundo compresor (11) de aire configurado para comprimir la segunda corriente (21) de aire.

10 10. El sistema de producción de energía según la reivindicación 9, en donde el segundo compresor de aire está configurado además para comprimir la primera corriente (51) de aire antes de que el primer compresor (10) de aire comprima la primera corriente (51) de aire.

15 11. El sistema de producción de energía según la reivindicación 9, en donde el sistema de compresores (10; 11; 42) de aire está configurado para controlar un caudal de la primera corriente (51) de aire y un caudal de la segunda corriente (21) de aire para dar como resultado una combustión sustancialmente estequiométrica en el primer combustor (3) y el segundo combustor (4).

12. El sistema de producción de energía según la reivindicación 11, en donde el sistema de compresores (10; 11; 42) de aire está configurado para controlar el caudal de la primera corriente (51) de aire y el caudal de la segunda corriente (21) de aire para dar como resultado hasta aproximadamente 5% de exceso de O<sub>2</sub> en la combustión en el primer combustor (3) y el segundo combustor (4).

20 13. El sistema de producción de energía según la reivindicación 1, en donde la primera corriente (26) de combustible y la segunda corriente (24) de combustible comprenden un gas de hidrocarburo comprimido; preferiblemente en donde el gas de hidrocarburo comprimido comprende metano.

25 14. El sistema de producción de energía según la reivindicación 1, que comprende además un suministro de aire configurado para aportar la primera corriente (51) de aire y un suministro de combustible configurado para aportar la primera corriente (26) de combustible,

en donde la primera corriente (27) de combustión tiene más de 50% de N<sub>2</sub> sobre una base molar, y

30 en donde el suministro de aire y el suministro de combustible están configurados para aportar la primera corriente (51) de aire y la primera corriente (26) de combustible en una relación configurada para dar como resultado la combustión sustancialmente estequiométrica en el primer combustor con hasta aproximadamente 5% de exceso de O<sub>2</sub>.

15. Un método para producir energía, que comprende:

quemar una primera corriente de combustible y una primera corriente de aire en un primer combustor en presencia de una primera corriente de reciclado para producir una primera corriente de combustión;

35 expandir la primera corriente de combustión en una primera turbina para hacer girar la primera turbina y producir energía;

dirigir al menos una parte de una primera corriente de descarga desde la primera turbina a un primer intercambiador de calor;

40 emplear la parte de la primera corriente de descarga para calentar la primera corriente de aire y al menos una parte de la primera corriente de reciclado que es producida a partir de la primera corriente de descarga con el primer intercambiador de calor;

quemar una segunda corriente de combustible y una segunda corriente de aire en un segundo combustor en presencia de una segunda corriente de reciclado que es producida a partir de la primera corriente de descarga para producir una segunda corriente de combustión;

45 expandir la segunda corriente de combustión en una segunda turbina para hacer girar la segunda turbina para producir energía;

dirigir la segunda corriente de aire y la segunda corriente de reciclado a un segundo intercambiador de calor; y

calentar la segunda corriente de aire y la segunda corriente de reciclado con el segundo intercambiador de calor.

16. El método según la reivindicación 15, en donde

50 calentar la segunda corriente de aire y la segunda corriente de reciclado con el segundo intercambiador de calor comprende emplear una segunda corriente de descarga procedente de la segunda turbina para calentar dicha

corriente de aire y dicha corriente de reciclado;

o en donde la primera corriente de aire y la segunda corriente de aire comprenden aire ambiente comprimido;

o en donde la primera corriente de reciclado y la segunda corriente de reciclado tienen más de 50% de N<sub>2</sub> sobre una base molar;

5 o en donde se produce energía con una eficiencia neta de generación eléctrica de al menos aproximadamente 60% sobre una base de valor calorífico inferior cuando se trabaja con una temperatura de turbina de aproximadamente 1.300°C a aproximadamente 1.500°C.

17. El método según la reivindicación 15, que comprende además calentar una segunda parte de la primera corriente de reciclado con el segundo intercambiador de calor;

10 o que comprende además comprimir la primera corriente de reciclado con un compresor de reciclado;

o que comprende además dirigir una segunda parte de la primera corriente de descarga al segundo combustor;

o que comprende además extraer con un separador una corriente de líquido de la parte de la primera corriente de descarga dirigida a través del primer intercambiador de calor.

15 18. El método según la reivindicación 15, que comprende además quemar una tercera corriente de combustible y una tercera corriente de aire en un tercer combustor en presencia de una segunda corriente de descarga recibida desde la segunda turbina para producir una tercera corriente de combustión; y

expandir la tercera corriente de combustión en una tercera turbina para hacer girar la tercera turbina para producir energía.

20 19. El método según la reivindicación 18, en donde calentar la segunda corriente de aire y la segunda corriente de reciclado con el segundo intercambiador de calor comprende emplear una tercera corriente de descarga procedente de la tercera turbina para calentar la segunda corriente de aire y la segunda corriente de reciclado.

20. El método según la reivindicación 19, que comprende además calentar la tercera corriente de aire con el segundo intercambiador de calor; o que comprende además calentar una segunda parte de la primera corriente de reciclado con el segundo intercambiador de calor.

25 21. El método según la reivindicación 15, que comprende además dirigir una corriente de descarga enfriada desde el segundo intercambiador de calor a un lavador; preferiblemente en donde el lavador es un sistema de adsorción de CO<sub>2</sub>.

22. El método según la reivindicación 15, que comprende además comprimir una corriente de aire de alimentación con un sistema de compresores de aire para producir la primera corriente de aire y la segunda corriente de aire.

30 23. El método según la reivindicación 22, en donde comprimir la corriente de aire de alimentación con el sistema de compresores de aire comprende comprimir la primera corriente de aire con un primer compresor de aire y comprimir la segunda corriente de aire con un segundo compresor de aire.

35 24. El método según la reivindicación 23, en donde comprimir la corriente de aire de alimentación con el sistema de compresores de aire comprende comprimir la primera corriente de aire con el segundo compresor de aire antes de comprimir la primera corriente de aire con el primer compresor de aire.

25. El método según la reivindicación 23, que comprende además controlar un caudal de la primera corriente de aire y un caudal de la segunda corriente de aire con el sistema de compresores de aire para dar como resultado la combustión sustancialmente estequiométrica en el primer combustor y el segundo combustor.

40 26. El método según la reivindicación 25, que comprende además controlar el caudal de la primera corriente de aire y el caudal de la segunda corriente de aire con el sistema de compresores de aire para dar como resultado hasta aproximadamente 5% de exceso de O<sub>2</sub> en la combustión en el primer combustor y el segundo combustor.

27. El método según la reivindicación 15, en donde la primera corriente de combustible y la segunda corriente de combustible comprenden gas de hidrocarburo comprimido; preferiblemente en donde el gas de hidrocarburo comprimido comprende metano.

45 28. El método según la reivindicación 15, en donde la primera corriente de combustión tiene más de 50% de N<sub>2</sub> sobre una base molar, y

en donde se controla la relación de la primera corriente de combustible respecto a la primera corriente de aire para dar como resultado la combustión sustancialmente estequiométrica con hasta aproximadamente 5% de exceso de O<sub>2</sub>.

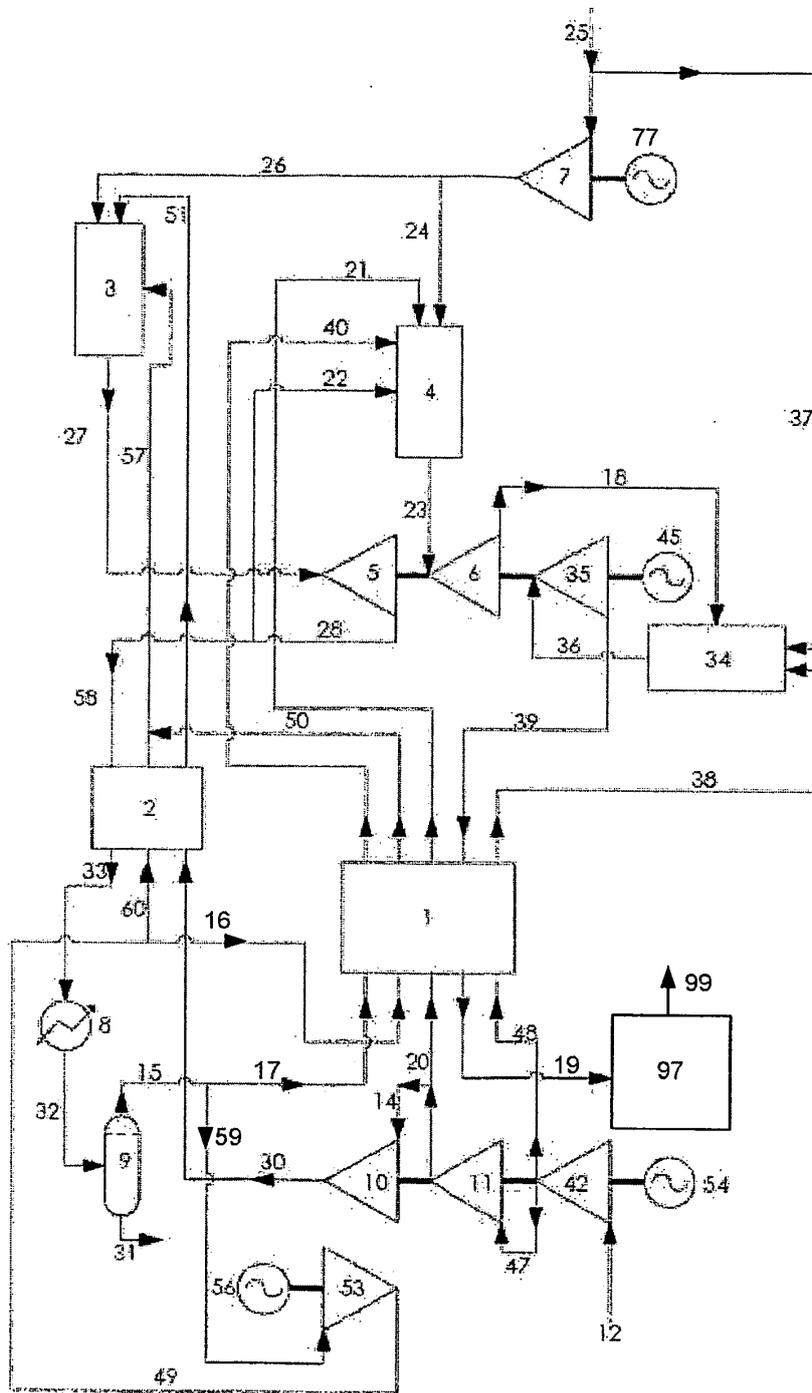


FIG. 1

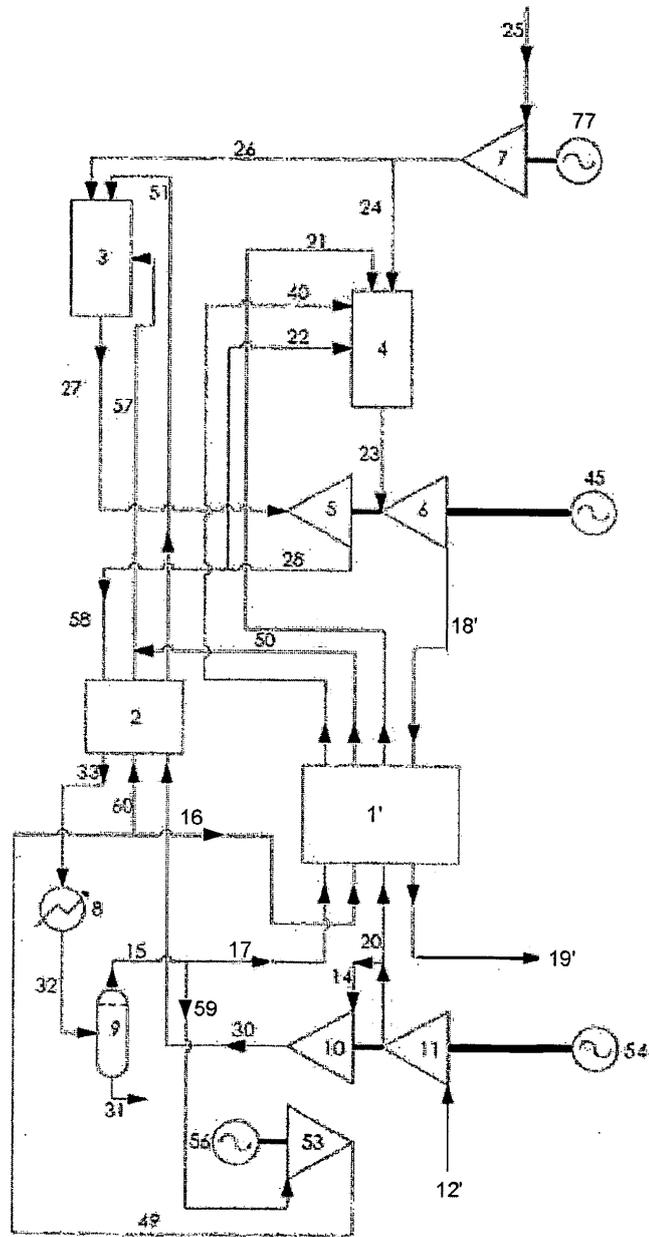


FIG. 2