

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 725 894**

51 Int. Cl.:

F03G 6/06

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.11.2012 E 15194074 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.04.2019 EP 3006732**

54 Título: **Sistema y método de generación de energía híbrido de combustible fósil y dióxido de carbono supercrítico calentado por el sol**

30 Prioridad:

11.11.2011 US 201161558907 P

07.02.2012 US 201261596203 P

08.11.2012 US 201213672312

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

30.09.2019

73 Titular/es:

8 RIVERS CAPITAL, LLC (100.0%)

406 Blackwell Street, 4th Floor

Durham, North Carolina 27701, US

72 Inventor/es:

PALMER, MILES R.;

FETVEDT, JEREMY ERON;

FREED, DAVID ARTHUR y

BROWN JR., GLENN WILLIAM

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 725 894 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 de generación de energía híbrido de combustible fósil y dióxido de carbono supercrítico calentado por el sol

Campo de la descripción

- 5 La presente descripción se refiere a la integración de un sistema y método de calentamiento solar con un sistema y método de generación de energía de combustión de combustibles fósiles. Más en particular, el sistema integrado utiliza el calentamiento solar para suplementar el calentamiento de combustión de una corriente de CO₂ reciclada en el sistema y método de generación de energía de combustión y así conseguir eficacias mejoradas.

Antecedentes

- 10 El documento de EE.UU. 2011/0127773 A1 describe un sistema de generación de electricidad por calor que incluye un precalentador solar para precalentar aire de descarga comprimido, una cámara de combustión para recibir el aire comprimido calentado del precalentador solar, quemar un combustible usando el aire comprimido calentado para generar gas quemado caliente, una primera turbina para recibir el gas quemado caliente de la cámara de combustión, expandir el gas quemado caliente para generar gas de salida, un generador de vapor de recuperación de calor para recibir el gas de salida de la primera turbina, generar vapor por calentamiento de un fluido condensado usando el gas de salida, un evaporador/supercalentador solar para recibir un fluido de trabajo calentado del generador del sistema de recuperación de calor, generar vapor solar por calentamiento del fluido de trabajo calentado, y una segunda turbina para conducir un segundo generador usando vapor y el vapor solar.

- 20 Los sistemas de energía solar concentrada (CSP, por sus siglas en inglés) se configuran típicamente para concentrar la energía solar de una gran área de luz solar (por ejemplo, de un campo de heliostatos) en un receptor relativamente pequeño donde se convierte la luz concentrada en alto calor. El calor se puede utilizar después en un medio convencional para producir electricidad, tal como calentar agua para producir vapor para una turbina conectada a un generador de energía eléctrica. Dichos sistemas CSP conocidos pueden experimentar una variedad de deficiencias. Por ejemplo, muchos sistemas CSP existentes sólo pueden producir energía casi máxima en las condiciones más favorables de luz solar, que están limitadas por el número de horas de luz solar y las condiciones climáticas locales. Como tales, los sistemas CSP existentes producen energía sólo una fracción del tiempo en que se requiere energía. Además, puesto que los sistemas CSP actúan típicamente como sólo una fuente de calor para un ciclo de producción de energía termodinámica integrado (por ejemplo, un ciclo de vapor), las eficacias de los sistemas CSP pueden estar significativamente limitadas por el ciclo termodinámico que se use. El resultado final de estas limitaciones es que la electricidad solar generada por los sistemas CSP conocidos ha logrado una salida limitada a las redes eléctricas a un coste aumentado en relación con la electricidad generada por los sistemas convencionales que queman combustible fósil como la fuente de calor.

- 30 La eficacia de un sistema CSP depende típicamente de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura que resulta de los rayos solares concentrados, se han utilizado diferentes formas de conversión. Por ejemplo, a temperaturas hasta aproximadamente 600°C, las tecnologías clásicas, tales como turbinas de vapor, se han usado con eficacias en el intervalo de aproximadamente 40%. A temperaturas por encima de 600°C, se pueden usar turbinas de gas con eficacias aumentadas de unos puntos de porcentaje. Se ha demostrado que son problemáticas temperaturas mayores debido a que se requieren diferentes materiales y técnicas. Una propuesta para temperaturas muy altas es usar sales de fluoruro líquidas que operan a temperaturas de aproximadamente 700°C a 800°C junto con sistemas de turbina multi-fase, que se han supuesto para conseguir eficacias térmicas en el intervalo del 50%. Las temperaturas de operación superiores se han visto beneficiosas debido a que permiten que la planta use intercambiadores de calor seco de temperaturas superiores para salida térmica y esto reduce el uso de agua, que puede ser importante en áreas donde pueden ser prácticas grandes plantas solares - por ejemplo, entornos desérticos.

- 45 A pesar de la promesa de sistemas de alta temperatura, los intentos previos para implementar sistemas CSP han proporcionado sólo un éxito limitado y no han conseguido un medio a largo plazo, económico, para integrar generación eléctrica CSP en la corriente principal. Incluso los intentos para superar el defecto básico en la tecnología CSP - generación de energía durante tiempos de ninguna producción solar o de producción solar baja - no han hecho la tecnología comercialmente viable. Por ejemplo, las técnicas de almacenamiento de energía pueden extender la producción de energía, pero se ha demostrado que estos métodos ofrecen una capacidad limitada (por ejemplo, acumuladores de vapor) y son un reto costoso y/o tecnológico (por ejemplo, tanques de sales fundidas). Otros han intentado usar gas natural para proporcionar un calentamiento suplementario a un fluido de trabajo utilizado en un calentador solar. Véase, por ejemplo, la Patente de EE.UU. N° 6.739.136. Dichos sistemas de calentamiento suplementario conocidos hasta la fecha, sin embargo, han fracasado en superar la eficacia limitada del procedimiento de conversión térmica solar, básico, previamente mencionado. De acuerdo con esto, queda la necesidad en la técnica de un sistema y método de coste eficaz, eficiente, para utilizar el calor solar en la generación de energía eléctrica. Más específicamente, queda una necesidad de que dichos sistemas y método que proporcionen energía eléctrica adecuada para la introducción sostenida en una red eléctrica.

El documento de EE.UU 2011/0179799 describe un método de generación de energía usando CO₂ como fluido de trabajo.

Sumario de la descripción

La presente descripción proporciona una integración de sistemas de una manera que pueda mejorar las eficacias y reducir los costes en relación con ambos sistemas. Más en particular, la descripción proporciona un método para generar energía según la reivindicación 1 y un sistema de generación de energía según la reivindicación 5

5 Específicamente, el sistema y método integrado pueden aumentar la eficacia de un ciclo de combustión en un sistema y método de generación de energía por utilización del sistema de calor solar como una fuente de calor suplementaria o alternativa para el ciclo de energía. Similarmente, el sistema y método integrado pueden presentar una eficacia que aumente respecto a la eficacia del mismo ciclo de producción de energía ausente el calor solar integrado. Como tal, el sistema y método integrados pueden incluir una pluralidad de calentadores que pueden operar de manera

10 independiente entre sí, que pueden operar de manera alternativa (tal como cíclicamente) o que pueden operar al mismo tiempo para calentar un fluido de trabajo que se puede reciclar a través del sistema donde se calienta, se expande para generación de energía, se enfría, opcionalmente se purifica, se comprime y se recalienta.

Los sistemas y métodos integrados de la presente descripción pueden utilizar cualquier sistema y método de generación de energía adecuado que incluya un fluido de trabajo reciclado y que sea susceptible de integración con calor solar para proporcionar al menos una porción del calentamiento usado en el sistema de generación de energía. Los sistemas y métodos para generación de energía que usan predominantemente CO₂ en un ciclo de combustión cerrado se describen en la Publicación de Patente de EE.UU. N° 2011/0179799. El ciclo de combustión puede usar una turbina de relación de presión baja que expanda una mezcla de productos de combustión que se formen en la combustión de un combustible en oxígeno en presencia de una corriente de fluido de trabajo de CO₂ (que se recicla

15 típicamente - al menos en parte - a través del sistema cerrado). En diversas realizaciones, se puede usar un ciclo de CO₂ tal como se describió anteriormente en la producción de energía usando gas natural, carbón u otros materiales carbonosos como una fuente de combustible. Se puede usar salida de turbina caliente para precalentar al menos parcialmente la corriente de fluido de trabajo de CO₂ reciclada en un intercambiador de calor economizador. La corriente de fluido de trabajo de CO₂ reciclada también se puede calentar usando una segunda fuente de calor, tal como calor procedente de la energía de compresión de una planta de producción de O₂ que se use para proporcionar oxígeno para combustión. El combustible y las impurezas procedentes de la combustión (por ejemplo, compuestos de azufre, CO₂, H₂O, cenizas, Hg, etc.) se pueden separar para eliminación sin emisiones atmosféricas. El sistema puede producir una corriente de reciclado de CO₂ de alta presión (es decir, que se recicla como el fluido de trabajo) y una corriente de producto de CO₂ de alta presión (es decir, CO₂ en exceso que no se recicla en el ciclo de combustión y que se puede capturar para usos, tal como recuperación de aceite mejorada o para secuestro). Esto se puede conseguir por compresión de la corriente de salida de la turbina enfriada del intercambiador de calor economizador en un sistema de compresión, que puede ser un sistema de compresión multifase.

20

25

30

La presente descripción proporciona la capacidad para integrar un sistema y método de generación de energía de ciclo cerrado con un sistema y método CSP (u otro calor solar) para conseguir un sistema generador de energía altamente eficaz que pueda rotar el calentamiento de un fluido de trabajo entre una cámara de combustión o un concentrador solar o pueda utilizar simultáneamente tanto calor de combustión como calor solar para calentar un fluido de trabajo reciclado. Dicha integración puede aumentar la eficacia de, por ejemplo, un procedimiento generador de energía de ciclo de CO₂ cerrado con captura completa de carbono a más del 50%, más de 55%, más de 60%, más de 65% o más de 70%.

35

Un método para generar energía de acuerdo con la presente descripción puede comprender hacer pasar una corriente que contiene CO₂ desde una cámara de combustión primaria a través de una turbina para expandir la corriente que contiene CO₂, generar energía y formar una corriente de salida de la turbina que comprende CO₂. El método puede comprender además calentar CO₂ de la corriente de salida de la turbina con un calentador solar. Aún más, el método puede comprender hacer pasar el CO₂ del calentador solar a la cámara de combustión primaria. En realizaciones adicionales, el método puede comprender además hacer pasar el CO₂ desde el calentador solar a un calentador de combustión previamente a paso a la cámara de combustión primaria. También, el método puede comprender además enfriar la corriente de salida de la turbina que comprende CO₂ en un intercambiador de calor para formar una corriente de salida de la turbina enfriada que comprende CO₂. Después de eso, el método puede comprender purificar la corriente de salida de la turbina enfriada que comprende CO₂ en un separador de agua para formar una corriente que comprende CO₂ seco de la corriente de salida de la turbina enfriada. El CO₂ seco de la corriente de salida de la turbina enfriada puede ser presurizado para formar una corriente que contenga CO₂ presurizado, y la corriente que contiene CO₂ presurizado se puede calentar en el intercambiador de calor previamente a ser calentado con el calentador solar.

40

45

50

En algunas realizaciones, un método para generar energía de acuerdo con la descripción puede comprender: hacer pasar una corriente que contiene CO₂ desde una cámara de combustión primaria a través de una turbina para expandir la corriente que contiene CO₂, generar energía y formar una corriente de salida de la turbina que comprende CO₂; enfriar la corriente de salida de la turbina que comprende CO₂ en un intercambiador de calor para formar una corriente de salida de la turbina enfriada; presurizar CO₂ de la corriente de salida de la turbina enfriada para formar una corriente que contiene CO₂ presurizado; calentar la corriente que contiene CO₂ presurizado en el intercambiador de calor; calentar la corriente que contiene CO₂ presurizado con un calentador solar y hacer pasar la corriente que contiene CO₂ presurizado y calentado por el sol a la cámara de combustión primaria. La corriente que contiene CO₂ que entra en la turbina puede estar a una presión de aproximadamente 15 MPa (150 bar) o mayor y puede estar a una temperatura de aproximadamente 500°C o mayor. La relación de la presión de la corriente que contiene CO₂ que entra

55

60

en la turbina a la presión de la corriente de salida de la turbina que comprende CO₂ puede ser aproximadamente 12 o menos.

En varias realizaciones, la etapa de presurización de la corriente que contiene CO₂ puede comprender hacer pasar la corriente por una pluralidad de fases de bombeo. Además, la corriente que contiene CO₂ se puede enfriar entre dos fases de bombeo. Se puede calentar una porción de la corriente que contiene CO₂ presurizado con calor suplementario después de la etapa de presurización y previamente a hacerlo pasar por el calentador solar. Por ejemplo, el calor suplementario puede incluir calor de compresión de una planta de separación de aire. La corriente que contiene CO₂ presurizado y calentado por el sol se puede hacer pasar del calentador solar por un calentador de combustión previamente al paso a la cámara de combustión primaria.

El método puede comprender además quemar un combustible carbonoso en la cámara de combustión primaria en presencia de oxígeno y la corriente que contiene CO₂ de manera que la corriente que contiene CO₂ presurizada y calentada por el sol pasada través de la turbina comprenda además uno o más productos de combustión. El método también puede comprender hacer pasar la corriente de salida de la turbina enfriada del intercambiador de calor por un separador para separar uno o más de los productos de combustión del CO₂. El combustible carbonoso puede ser específicamente un líquido o gas.

En otras realizaciones, el combustible carbonoso puede comprender una corriente de productos de combustión parcialmente oxidados. Por ejemplo, el método puede comprender además quemar un combustible sólido en presencia de O₂ y CO₂ en una cámara de combustión de oxidación parcial, proporcionándose el combustible sólido O₂ y CO₂ en relaciones de manera que el combustible sólido esté sólo parcialmente oxidado para producir la corriente de producto de combustión parcialmente oxidada que comprende un componente incombustible, CO₂, y uno o más de H₂, CO, CH₄, H₂S y NH₃. El combustible sólido O₂ y CO₂ pueden ser proporcionados específicamente en relaciones tales que la temperatura de la corriente de productos de combustión parcialmente oxidada sea suficientemente baja para que todos los componentes incombustibles en la corriente estén en la forma de partículas sólidas. El método también puede comprender hacer pasar la corriente de productos de combustión parcialmente oxidada por uno o más filtros. El combustible sólido puede comprender en particular carbono, lignita o coque de petróleo. Por otra parte, el combustible sólido puede estar en una forma de material en forma de partículas y puede ser suspendido con CO₂.

La cantidad de combustible carbonoso y oxígeno proporcionada a la cámara de combustión primaria se controla de manera que el calor de combustión en la cámara de combustión primaria esté inversamente relacionada con el calor disponible del calentador solar para calentar la corriente que contiene CO₂ presurizado que pasa por el calentador solar. Por ejemplo, la cantidad de calor disponible del calentador solar puede variar por más de 10% por un único ciclo solar. Como tal, la cantidad de combustible carbonoso y oxígeno proporcionada a la cámara de combustión se puede controlar de manera que la temperatura de la corriente que contiene CO₂ pasada a la turbina pueda variar por menos del 10% por el único ciclo solar.

Los métodos de la descripción pueden comprender además dividir la corriente que contiene CO₂ presurizado en una variedad de corrientes adicionales. Por ejemplo, en algunas realizaciones, los métodos pueden comprender dividir la corriente que contiene CO₂ presurizado que sale del intercambiador de calor previamente a paso al calentador solar de manera que una primera porción de la corriente que contiene CO₂ presurizado continúa al calentador solar y una segunda porción de la corriente que contiene CO₂ presurizado pasa a la cámara de combustión primaria sin pasar primero por el calentador solar. En varias realizaciones, el calentador solar puede calentar la corriente que contiene CO₂ a una temperatura de aproximadamente 500°C o mayor. En otras realizaciones, el calentador solar puede ser calentado por la corriente que contiene CO₂.

La presente descripción proporciona además un sistema de generación de energía según las reivindicaciones 5 a 7.

Los métodos de generación de energía de la presente descripción se pueden caracterizar en particular en relación con la eficacia total de la generación de energía. Por ejemplo, la generación de energía se puede conseguir con una eficacia total en un valor de calentamiento inferior de al menos 60%. En otras realizaciones, la eficacia puede ser al menos 65%. Así, los sistemas y métodos descritos satisfacen una necesidad de generación de energía con captura y almacenamiento de carbono (CCS, por sus siglas en inglés). Mientras que conseguir CCS con sistemas de generación de energía convencionales se ha demostrado difícil y/o no de coste eficaz, los métodos descritos en el momento presente que utilizan combustión de ciclo cerrado pueden conseguir alta eficacia y satisfacer las necesidades para CCS, todo al tiempo que se hace de una manera de coste eficaz.

Breve descripción de las figuras.

La FIG. 1 es un diagrama de flujo que ilustra un sistema y método de generación de energía de acuerdo con una realización de la presente descripción en la que se integra un calentador solar con una cámara de combustión y una turbina;

la FIG. 2 es un diagrama de flujo que ilustra un sistema y método de generación de energía de acuerdo con una realización de la presente descripción que incluye una cámara de combustión principal y un calentador solar;

la FIG. 3 es un diagrama de flujo que ilustra un sistema y método de generación de energía de acuerdo con una

realización más de la presente descripción en la que se incluye una cámara de combustión de oxidación parcial además de una cámara de combustión primaria;

5 la FIG. 4 es un diagrama de flujo que ilustra un sistema y método de generación de energía de acuerdo con otra realización de la presente descripción en la que se incluye un divisor para dividir una corriente de CO₂ reciclado entre un calentador solar y una cámara de combustión principal;

la FIG. 5 es un diagrama de flujo que ilustra un sistema y método de generación de energía de acuerdo con aún una realización más de la presente descripción, en la que se incluye un divisor para dividir una corriente de CO₂ de reciclado en tres corrientes que pasan a un calentador solar, una cámara de combustión de oxidación parcial y una cámara de combustión primaria;

10 la FIG. 6 es un diagrama de flujo que ilustra un sistema y método de generación de energía de acuerdo con otra realización más de la presente descripción en la que se incluye una válvula de flujo de dos posiciones para alternar una corriente de CO₂ reciclada entre un calentador solar y una cámara de combustión primaria;

15 la FIG. 7 es un diagrama de flujo que ilustra un sistema y método de generación de energía de acuerdo con aún una realización más de la presente descripción, en la que se incluye una válvula de flujo de dos posiciones para alternar una corriente de CO₂ reciclada entre un calentador solar y un flujo de la cámara de combustión, que a su vez se divide entre una cámara de combustión de oxidación parcial y una cámara de combustión primaria y

la FIG. 8 es un cuadro de calentamiento del ciclo solar que muestra el calentamiento relativo suministrado por los diversos componentes de calentamiento de un sistema de acuerdo con ciertas realizaciones de la presente descripción durante un ciclo solar único, ejemplar.

20 Descripción detallada de la descripción.

La invención se describirá ahora más completamente de ahora en adelante por referencia a varias realizaciones. Estas realizaciones se proporcionan de manera que esta descripción sea exhaustiva y completa y difundirán completamente el alcance de la invención para los expertos en la materia. La invención se puede representar en diferentes formas y no se debería interpretar como limitada a las realizaciones expuestas en la misma; en su lugar, estas realizaciones se proporcionan de manera que esta descripción satisfaga los requerimientos legales aplicables. Como se usa en la memoria descriptiva y en las reivindicaciones adjuntas, las formas singulares "un", "una", "el", incluyen referentes plurales a menos que el contexto lo dicte claramente de otro modo.

30 La Publicación de Patente de EE.UU. N° 2011/0179799, como se observó ya anteriormente, describe sistemas y métodos de producción de energía en los que se utiliza un ciclo de CO₂. En algunas realizaciones, se puede proporcionar un fluido de circulación de CO₂ en una cámara de combustión adecuada para condiciones de alta temperatura y alta presión junto con un combustible carbonoso (tal como GN, carbón, gas de síntesis, biomasa, etc.) y un oxidante, tal como aire u O₂. Tales sistemas y métodos pueden comprender una cámara de combustión que opere a altas temperaturas (por ejemplo, aproximadamente 500°C o mayor, aproximadamente 750°C o mayor, aproximadamente 1.000°C o mayor o aproximadamente 1.200°C o mayor) y la presencia del fluido circulante puede actuar para moderar la temperatura de una corriente de fluido que sale de la cámara de combustión de manera que se pueda utilizar la corriente de fluido en transferencia de energía para producción de energía. La naturaleza del procedimiento de reacción a altas temperaturas y presiones y con altas concentraciones de CO₂ reciclado, puede proporcionar excelente eficacia del procedimiento y velocidades de reacción. La corriente de productos de combustión se puede expandir por al menos una turbina para generar energía. La corriente de gas expandida se puede enfriar después para retirar subproductos de combustión y/o impurezas de la corriente y la retirada de calor de la corriente de gas expandido se puede usar para calentar el fluido de circulación de CO₂ que se recicla de vuelta a la cámara de combustión.

45 En el estado enfriado, se puede tratar la corriente de combustión para retirar agua y otros contaminantes para proporcionar una corriente de CO₂ esencialmente puro para reciclar de vuelta por la cámara de combustión con los materiales para combustión. La corriente de CO₂ purificado está típicamente en un estado gaseoso y es beneficiosa para someter la corriente a las condiciones necesarias de manera que el CO₂ sea un estado supercrítico. Por ejemplo, después de que se haya expandido la corriente de combustión por una turbina para generación de energía, enfriado y purificado para comprender CO₂ esencialmente puro (por ej., al menos 95% en masa, al menos 97% en masa o al menos 99% en masa de CO₂), se puede comprimir la corriente de CO₂ reciclada resultante para aumentar la presión de la misma, tal como a aproximadamente 8 MPa (80 bar). Se puede usar una segunda etapa de compresión para aumentar la presión a aproximadamente la presión en la cámara de combustión - por ej., aproximadamente 20 MPa (200 bar), aproximadamente 25 MPa (250 bar) o aproximadamente 30 MPa (300 bar). En medio de las etapas de compresión, se puede enfriar la corriente de CO₂ para aumentar la densidad de la corriente de manera que se reduzca la entrada de energía requerida para bombear la corriente a la presión superior. La corriente de CO₂ reciclada presurizada finalmente se puede calentar además después y aportar de nuevo a la cámara de combustión.

Aunque el sistema y método de generación de energía ya descritos proporcionan eficacia mejorada sobre los sistemas y métodos de generación de energía convencionales (y así es mientras se captura simultáneamente el carbono producido), los sistemas y métodos de la presente descripción pueden aumentar además la eficacia del ciclo por

combinación con un sistema de energía solar concentrada (CSP, por sus siglas en inglés). El sistema CSP puede proporcionar calentamiento de la corriente de CO₂ reciclado durante tiempos de suficiente luz solar disponible como alternativa a usar la cámara de combustión en el ciclo de combustión o el sistema CSP puede proporcionar calentamiento suplementario de la corriente de CO₂ reciclado para reducir los requerimientos de combustible de la cámara de combustión en el ciclo de combustión.

Un sistema CSP útil de acuerdo con la presente descripción puede incluir cualquier colector térmico solar adaptado para concentrar la energía solar lo suficientemente para producir el calor necesario para un fluido de trabajo en un sistema generador de energía, tal como se describe en la presente memoria. Preferiblemente, se puede usar un colector solar de alta temperatura. Un ejemplo no limitante de sistema colector solar que se puede utilizar para concentrar energía solar de acuerdo con la presente descripción es un concentrador cilíndrico-parabólico en el que se puede usar una serie de concentradores de espejo, curvos, para reflejar la radiación solar directa sobre un tubo colector que contiene un fluido (también denominado un receptor, absorbedor o colector) que hace funcionar la longitud del concentrador y se coloca en el punto focal de los reflectores. El concentrador es parabólico a lo largo de un eje y lineal en el eje ortogonal. El concentrador puede ser ajustado posicionalmente a diario y/o estacionalmente para maximizar la recogida de radiación solar. El fluido absorbedor puede fluir a un calentador central. Las centrales solares de torre (también conocidas como plantas de energía de torre central o plantas de energía con heliostatos) son otro ejemplo y se puede utilizar un campo de heliostatos para centrar la luz solar concentrada en un receptor, que típicamente descansa encima de una torre en el centro del campo. En tales sistemas, los heliostatos pueden estar colocados en una disposición vertical (por ejemplo, una configuración de disco o parabólica) para centrar la energía solar en un colector de calor en una torre. Los reflectores de Fresnel son un ejemplo más de la tecnología de concentración solar útil que se pueden usar de acuerdo con la presente descripción.

En algunas realizaciones de la presente descripción, un sistema CSP puede comprender concentrador solar y un calentador solar. En general, el concentrador solar puede comprender heliostatos, espejos, lentes o similares como se observó anteriormente para recoger y concentrar radiación solar. El calentador solar puede comprender uno o más componentes adaptados para transferir calor de la radiación solar recogida y concentrada y/o convertir el calor en trabajo. Por ejemplo, el calentador solar puede comprender un disipador térmico en el que se almacena el calor y del que se puede transferir el calor a otro material o fluido, tal como una corriente que contiene CO₂ que se puede hacer pasar por la misma. En otras realizaciones, el calentador solar puede comprender un fluido de trabajo de ciclo solar (por ejemplo, una corriente que contiene CO₂, un fluido de sales fundidas o similar). Dicho fluido de trabajo puede pasar por un tubo colector como se indicó anteriormente para calentamiento o se puede presentar sólo en el calentador solar para calentamiento por la radiación solar recogida y concentrada (por ejemplo, en una central solar de torre). El calentador solar puede comprender así componentes de transferencia de calor útiles para transferir calor del fluido de trabajo del ciclo solar a otro material o fluido, tal como una corriente que contiene CO₂. En dichas realizaciones, el término calentador solar puede incluir una unidad discreta que tiene el fluido de trabajo de ciclo solar por la misma y que se adapta por paso de la corriente que contiene CO₂ (como un ejemplo) a su través en una relación de intercambio de calor. El término calentador solar también puede incluir un sistema más expansivo según el cual se puede hacer pasar el fluido de trabajo del ciclo solar desde una porción de recogida de calor a una porción de transferencia de calor donde el calor del fluido de trabajo del ciclo solar puede pasar a otro material o fluido, como se describió ya.

En diversas realizaciones, los métodos para generar energía de acuerdo con la descripción pueden comprender hacer pasar una corriente que contiene CO₂ desde una cámara de combustión primaria por una turbina para expandir la corriente que contiene CO₂, generar energía y formar una corriente de salida de la turbina que comprenda CO₂. La corriente de salida de la turbina que comprende CO₂ puede ser enfriada en un intercambiador de calor para formar una corriente de salida de la turbina enfriada. El método puede comprender además presurizar CO₂ de la corriente de salida de la turbina enfriada para formar una corriente que contiene CO₂ presurizado y se puede calentar esta corriente en el intercambiador de calor. La corriente que contiene CO₂ presurizado, recalentada, se puede calentar además con un calentador solar, tal como haciendo pasar la corriente que contiene CO₂ presurizado por el calentador solar o puede incluir intercambio de calor entre la corriente que contiene CO₂ presurizado y un fluido de trabajo del ciclo de calentamiento solar (por ejemplo, un fluido de sales fundidas o una corriente de CO₂ separada). Además, el método puede comprender hacer pasar la corriente que contiene CO₂ presurizada y calentada solar a la cámara de combustión primaria.

Un sistema generador de energía de acuerdo con la presente descripción se ilustra en el diagrama de la FIG. 1. Como se observa en el mismo, el sistema comprende en general un calentador solar que está en comunicación de fluido con una cámara de combustión primaria que a su vez está en comunicación de fluido con una turbina. En su uso, se introduce una corriente de combustible gaseoso (u otro tipo de combustible como se discutió además en la presente memoria) a la cámara de combustión primaria junto con una corriente de oxígeno y una corriente que contiene CO₂. El combustible se puede quemar con el oxígeno en la cámara de combustión primaria con el CO₂ presente como fluido de trabajo que se puede reciclar por un sistema cerrado. Una corriente de salida de la cámara de combustión que comprende CO₂ y cualquier producto de combustión y que es presurizado se puede hacer pasar a la turbina en la que la corriente de salida de la cámara de combustión se expande para generar energía y formar una corriente de salida de la turbina. Dependiendo de la naturaleza de la corriente de salida de la turbina, se puede tratar además, de manera que se retiren productos de combustión que puedan estar presentes - por ej., agua y/o CO₂ en exceso. Así, un sistema de acuerdo con la presente descripción puede incluir una variedad de componentes

adicionales como se describió de otro modo en la presente memoria. El CO₂ de la corriente de salida de la turbina tratada más puede ser entrada al calentador 90 solar como una corriente 34 de reciclado de CO₂. La corriente 92 de salida del calentador solar puede dirigir así CO₂ de vuelta a la cámara de combustión como el fluido de trabajo reciclado.

5 En algunas realizaciones, la cámara 10 de combustión se puede cerrar completamente, tal como durante tiempos de producción de calor solar máxima. En tales casos, el calor de la corriente 92 de salida del calentador solar puede ser suficiente para negar la necesidad de calor de combustión de la cámara de combustión. Como tal, las corrientes de circulación pueden estar suficientemente exentas de impurezas de manera que se pueda llevar a cabo un ciclo continuo sin la necesidad de enfriar y retirar los productos de combustión. Así, se puede hacer pasar la corriente 22 de salida de la turbina directamente al calentador 90 solar y llega a ser así la corriente de CO₂ reciclada. En otras realizaciones, se puede hacer pasar la corriente de salida de la turbina por una o más bombas y/o compresores (véase la FIG. 2, por ejemplo) para presurizar la corriente de salida de la turbina previamente al pase al calentador solar como la corriente de CO₂ reciclada.

10 Aunque la cámara 10 de combustión se puede cerrar si se desea durante la producción de calor solar máxima, puede ser ventajoso hacer funcionar el sistema integrado con todos los componentes en operación continua. El calentamiento proporcionado por el sistema concentrador solar puede variar por un único ciclo solar. Como se usa en la presente memoria, un ciclo solar único se indica para expresar un único día de 24 horas, que se puede medir desde cualquier punto - por ejemplo, desde medianoche a medianoche o de mediodía a mediodía. Durante las horas de luz solar, el calor solar estará disponible y típicamente aumentará desde el amanecer a las horas de máxima luz solar y después disminuye a medida que se aproxima la puesta de sol. Dependiendo de la naturaleza del calentador solar y la disponibilidad de almacenamiento de calor solar, el calor producido por el calentador solar aumentará y disminuirá por un ciclo solar único. Como tal, la cantidad de calor disponible del calentador solar puede variar por un único ciclo solar, tal como por 5% o más, 10% o más, 20% o más, 30% o más o 50% o más. En algunas realizaciones, la cantidad de calor disponible del calentador solar por un único ciclo solar puede variar por 5% a 75%, 10% a 70% o 15% a 60%. Por operación continua del sistema integrado descrito en el momento presente, sin embargo, se puede mantener una temperatura de entrada de la turbina constante.

15 Durante los periodos de disponibilidad energía solar máxima, se puede concentrar radiación solar en el calentador solar para proporcionar hasta 100% del calor necesario para el CO₂ circulado por el sistema a la turbina. A medida que disminuye la energía solar disponible, la cantidad de entrada de combustible y oxígeno a la cámara de combustión se puede aumentar como sea necesario para mantener la temperatura de entrada de la turbina deseada. Durante los periodos en que la energía solar disponible es insuficiente, si es necesario, el sistema puede funcionar sobre el combustible de combustión sólo. Los sistemas y métodos de la presente descripción pueden permitir además el uso del combustible de combustión durante periodos de carga máxima y pueden volver a una operación de carga de base sólo solar o una principalmente solar si lo garantizan las condiciones. La cantidad de combustible de combustión y oxígeno proporcionada a la cámara de combustión se puede controlar de manera que el calor de combustión en la cámara de combustión primaria esté inversamente relacionada con el calor disponible del calentador solar para calentar la corriente que contiene CO₂ que pase a su través. Como se discutió anteriormente, esto se puede proporcionar para mantener una temperatura esencialmente constante en el punto de entrada a la turbina. Por ejemplo, la cantidad de combustible carbonoso y oxígeno proporcionada a la cámara de combustión se puede controlar de manera que la temperatura de la corriente que contiene CO₂ pasada a la turbina pueda variar por menos de 2% por un único ciclo solar. En otras realizaciones, la temperatura de la corriente que contiene CO₂ pasada a la turbina puede variar por un único ciclo solar por menos de 5%, menos de 10% o menos de 15%. En más realizaciones, la temperatura de la corriente que contiene CO₂ pasada a la turbina puede variar por un único ciclo solar por aproximadamente 2% a aproximadamente 15%, aproximadamente 3% a aproximadamente 12% o aproximadamente 5% a aproximadamente 10%.

20 La operación de un sistema de acuerdo con la presente descripción como se discutió anteriormente puede ser ventajosa por varias razones. Por ejemplo, esto puede impartir simplicidad al método de operación por que pueden evitarse los ciclos de conmutación complicados entre el calentador solar y la cámara de combustión primaria. Por otra parte, la eficacia del sistema y el método de combustión puede aumentar significativamente. Por ejemplo, en un sistema integrado en el que aproximadamente el 25% de la salida de energía total procede de energía solar (por ejemplo, 6 horas máximas de luz solar al día) y en el que el ciclo de combustión presenta una eficacia autónoma (sobre combustible de gas natural) de aproximadamente 50%, entonces la eficacia promedio para un periodo de 24 horas determinado del sistema integrado usando un combustible de gas natural puede ser aproximadamente 66%.

25 Ciertas realizaciones del sistema y método de la presente descripción se ilustran en el diagrama de flujo proporcionado en la FIG. 2. En relación con esta figura, se bombea una corriente 3 de combustible gaseoso en la bomba 6 para formar una corriente 7 de combustible gaseoso presurizado que se dirige a la cámara 10 de combustión primaria. En un ejemplo, el combustible gaseoso puede ser gas natural; sin embargo, se pueden usar otros combustibles gaseosos, tales como gas de síntesis. Además, se pueden usar combustibles líquidos. En las realizaciones incluidas por la FIG. 2, también se dirige una corriente 5 de oxígeno desde una planta 110 de separación de aire a la cámara de combustión. La planta de separación de aire se puede usar para proporcionar oxígeno purificado desde una fuente 1 de aire. Por ejemplo, la corriente de oxígeno puede comprender oxígeno en una pureza de aproximadamente 95% molar o mayor, aproximadamente 97% molar o mayor o aproximadamente 99% molar o mayor. En la cámara de

combustión, el combustible se quema con el oxígeno en presencia de una corriente de reciclado de CO₂ para formar una corriente 12 de salida de la cámara de combustión, que, en esta realización, comprende el fluido de trabajo de CO₂ y cualquier producto de combustión, tal como agua y/o CO₂.

5 La cámara de combustión primaria puede ser cualquier cámara de combustión adecuada para combustión a la temperatura y presión requeridas incluyendo, pero no limitándose a, una cámara de combustión enfriada por transpiración. Se puede proporcionar una corriente de reciclado de CO₂ pasada a la cámara de combustión a una presión de aproximadamente 15 MPa (150 bar) o mayor, aproximadamente 20 MPa (200 bar) o mayor, aproximadamente 25 MPa (250 bar) o mayor o aproximadamente 30 MPa (300 bar) o mayor. En otras realizaciones, la presión puede ser aproximadamente 15 MPa (150 bar) a aproximadamente 40 MPa (400 bar), aproximadamente 20 MPa (200 bar) a aproximadamente 38 MPa (380 bar) o aproximadamente 25 MPa (250 bar) a aproximadamente 35 MPa (350 bar). La combustión en la cámara de combustión primaria se puede llevar a cabo a una temperatura, por ejemplo, de aproximadamente 500°C o mayor, aproximadamente 600°C o mayor o aproximadamente 700°C o mayor. En otras realizaciones, la combustión se puede llevar a cabo a una temperatura de aproximadamente 500°C a aproximadamente 1.800°C, aproximadamente 550°C a aproximadamente 1.600°C o aproximadamente 600°C a aproximadamente 1.200°C. En otras realizaciones, se pueden usar incluso más intervalos de temperatura, como se describe en la presente memoria de otro modo. En diversas realizaciones, el CO₂ en la corriente 12 de salida de la cámara de combustión puede estar en un estado supercrítico.

20 La corriente de salida de la cámara de combustión que comprende CO₂ se hace pasar a una turbina 20 generadora de energía que produce energía eléctrica vía un generador 25. El método de generación de energía se puede caracterizar por la relación de presión a través de la turbina. La relación de la presión de la corriente de salida de la cámara de combustión (que entra a la turbina) a la presión de la corriente de salida de la turbina que comprende CO₂ (que sale de la turbina) puede ser aproximadamente 12 o menos, aproximadamente 10 o menos o aproximadamente 8 o menos. Además, la relación de presión puede ser aproximadamente 4 a aproximadamente 12, aproximadamente 5 a aproximadamente 10 o aproximadamente 6 a aproximadamente 10.

25 La corriente 22 de salida de la turbina que sale de la turbina 20 se puede enfriar por pase a través de un intercambiador 30 de calor para reducir la temperatura de la misma. Esto puede ser útil en particular para permitir la separación de cualquier impureza (por ejemplo, productos de combustión) de la corriente de salida de la turbina. El intercambiador de calor (que se puede caracterizar como un intercambiador de calor de productos de combustión en algunas realizaciones) puede ser, en algunas realizaciones, un intercambiador de calor multifase o una serie para dos o más, preferiblemente tres, unidades de intercambio de calor en serie. En dicha serie, la primera unidad de intercambio de calor de la serie (que pasa del extremo caliente al extremo frío) puede transferir calor por un intervalo de temperatura amplio, alto - por ejemplo, desde la temperatura de salida de la turbina al intervalo de aproximadamente 150°C a aproximadamente 200°C. La segunda unidad de intercambio de calor en serie puede transferir calor por un intervalo de temperatura más estrecho, medio, - por ej., desde la temperatura de salida de la primera unidad de intercambio de calor en serie al intervalo de aproximadamente 80°C a aproximadamente 140°C. La tercera unidad de intercambio de calor en serie puede transferir calor por un intervalo de temperatura bajo - por ejemplo, el intervalo de aproximadamente 20°C a aproximadamente 75°C. Dichos intervalos asimismo pueden aplicarse a fluidos pasados del extremo frío al extremo caliente de cada unidad de intercambio de calor en la serie. Dichas series pueden ser beneficiosas por que el calentamiento añadido de la corriente de reciclado de CO₂ que pasa del extremo frío de las unidades de intercambio de calor en serie al extremo caliente de las unidades de intercambio de calor pueden ser entrada en un punto definido. Por ejemplo, la corriente que sale de la tercera unidad de intercambio de calor en serie y que entra en la segunda unidad de intercambio de calor en serie se puede dividir, y una fracción puede entrar en la segunda unidad intercambio de calor en serie mientras se calienta la otra fracción de una fuente externa, tal como el calor de compresión capturado de una planta de separación de aire. La fracción calentada superior se puede unir después con la corriente que sale de la segunda unidad de intercambio de calor en serie y que entra en la primera unidad de intercambio de calor en serie. Dicho calor añadido puede ser beneficioso para llevar la temperatura de la corriente de reciclado de CO₂ a dentro de un umbral preferible en relación con la temperatura de la corriente de salida de la turbina. Específicamente, se puede calentar la corriente de reciclado de CO₂ a dentro de 50°C o menos, 40°C o menos o 30°C o menos de la temperatura de la corriente de salida de la turbina.

50 La corriente 32 de salida de la turbina enfriada que sale del intercambiador 30 de calor comprende preferiblemente CO₂ en un estado gaseoso y se puede hacer pasar por un refrigerador 40 de baja temperatura (por ejemplo, un refrigerador de agua), que puede ser útil para enfriar la corriente de salida de la turbina a temperatura cercana de temperatura normal. En realizaciones particulares, el refrigerador de temperatura baja puede enfriar la corriente de CO₂ gaseosa a una temperatura de aproximadamente 50°C o menos, aproximadamente 40°C o menos o aproximadamente 30°C o menos. Dicho componente del sistema en particular puede ser opcional. La corriente 42 de salida de baja temperatura se puede hacer pasar a un separador 50, que en la realización ilustrada es en particular un separador de agua. Así, se retira de ahí la corriente 54 de agua y una corriente 52 de CO₂ seca sale del separador y se puede hacer pasar por una o más bombas o compresores.

60 Como se ilustra, se hace pasar la corriente 52 de CO₂ seco por una bomba 60, que puede ser útil para aumentar la presión de la corriente de CO₂ seco a una presión suficiente de manera que el CO₂ esté en un estado supercrítico. Por ejemplo, se puede aumentar la presión a aproximadamente 7,5 MPa (75 bar) o mayor o aproximadamente 8 MPa (80 bar) o mayor. La corriente 62 de CO₂ de descarga de la bomba resultante se puede enfriar más en un refrigerador 70

de densificación, que puede ser útil en particular para aumentar la densidad del CO₂ supercrítico para reducir el requerimiento de energía para comprimir la corriente de CO₂ a una presión útil para reciclar a la cámara 10 de combustión. La corriente se puede densificar en particular a una densidad de aproximadamente 200 kg/m³ o mayor, aproximadamente 400 kg/m³ o mayor, aproximadamente 600 kg/m³ o mayor o aproximadamente 800 kg/m³ o mayor.

5 La corriente 72 de CO₂ de descarga del refrigerador densificante se puede hacer pasar después por un compresor 80 para aumentar la presión de la misma a un intervalo que está preferiblemente en el intervalo descrito anteriormente en relación con la corriente de reciclado de CO₂ para entrada a la cámara de combustión. La corriente 82 de descarga de CO₂ comprimido se puede dividir o se puede devolver en total al ciclo de combustión. Beneficiosamente, si se desea, se puede retirar cualquier CO₂ en exceso (por ej., CO₂ resultante de combustión) como una corriente 84 de la tubería de CO₂ de alta presión - es decir, en condiciones adecuadas para entrada a una tubería. Cualquier uso deseado del CO₂ retirado (por ej., recuperación de aceite mejorada, secuestro, etc.) está incluido por la presente descripción.

10 Se puede hacer pasar la corriente 86 de descarga de CO₂ comprimido (fracción reciclada) de vuelta por el intercambiador 30 de calor para calentar la corriente que contiene CO₂ a una temperatura que esté a o cerca de la temperatura de la corriente de descarga de la turbina. En realizaciones particulares, la temperatura de la corriente de CO₂ de reciclado que sale del intercambiador de calor puede diferir de la temperatura de la corriente de descarga de la turbina por sólo aproximadamente 50°C o menos. Si se desea, el calentamiento adicional puede ser entrada a la corriente que contiene CO₂ antes o durante el paso por el intercambiador de calor. Por ejemplo, el calor que procede de la compresión adiabática en la unidad 110 de separación de aire se puede añadir a la corriente que contiene CO₂. Como se ilustra, una corriente 112 de transferencia de calor de alta temperatura puede pasar desde la planta de separación de aire a la unidad de intercambio de calor (por ejemplo, a una corriente que pase al intercambiador de calor o a una o más unidades de intercambio de calor en un intercambiador de calor multifase) y una corriente 114 de transferencia de calor de baja temperatura puede pasar del intercambiador de calor de vuelta a la planta de separación de aire.

25 La corriente que sale del intercambiador 30 de calor se puede caracterizar como que es una corriente de reciclado de CO₂. Como tal, la corriente 34 de reciclado de CO₂ puede estar a una presión y/o temperatura adecuada para entrada a la cámara 10 de combustión. En la realización ilustrada, se hace pasar primero la corriente de reciclado de CO₂ a un calentador 90 solar que puede ser una sola unidad o puede ser un componente de un sistema CSP, como ya se describió anteriormente. Como se ilustra, los rayos 222 de energía solar se reflejan de un concentrador 220 solar y la radiación 224 solar concentrada se recoge en el calentador solar. La corriente de reciclado de CO₂ que pasa por el calentador solar se puede cambiar o no dependiendo del estado del sistema CSP. Como se ilustra, se hace pasar directamente una corriente de fluido por el calentador solar para recuperar calor directamente del sistema de concentración. En otras realizaciones, la corriente de fluido de trabajo (es decir, la corriente de CO₂ reciclada) puede interactuar con un fluido de trabajo secundario (por ejemplo, un fluido de trabajo del ciclo solar) en una relación de intercambio de calor. Dicho fluido de trabajo secundario puede ciclarse por el sistema concentrador solar para calentamiento, tal como se describió anteriormente en relación con los colectores térmicos solares conocidos. Por ejemplo, se puede incorporar un fluido de trabajo de sales fundidas en el sistema concentrador solar y la corriente de CO₂ reciclada que entra al calentador solar puede recibir calor del fluido de trabajo de sales fundidas.

30 Como se discutió anteriormente, durante los periodos de suficiente recogida solar, el calentador solar puede ser calentado a una temperatura en la que la corriente de reciclado de CO₂ que pasa a su través aumente en temperatura.

40 En tiempos de menor recogida solar, el calentador solar puede estar a esencialmente la misma temperatura que la corriente de reciclado de CO₂ que sale del intercambiador de calor y la corriente de reciclado de CO₂ puede estar ni calentada ni enfriada. En tiempos de poca recogida solar o ninguna, el calentador solar puede aumentar en temperatura por el paso de la corriente de reciclado de CO₂ a su través. Lo mismo puede ser beneficioso por que el calentador solar puede ser mantenido a una temperatura esencialmente constante - por ejemplo, en aproximadamente 5%, en aproximadamente 10%, en aproximadamente 20% o en aproximadamente 30% de la temperatura de calentamiento máxima del calentador solar. En sistemas de concentración solar conocidos, el receptor cicla típicamente desde muy caliente a mucho más frío durante cada ciclo solar. Esta ciclación térmica presenta un reto de diseño al receptor y puede producir que el receptor (es decir, el calentador solar) fracase debido a la acumulación de tensiones térmicas día a día o requiere que su diseño esté limitado en temperatura, lo que limita la realización. En las realizaciones indicadas de la presente descripción en las que una corriente de CO₂ en o cerca de la temperatura de operación del sistema fluye constantemente a través del receptor, se puede evitar la ciclación de temperatura diaria. El calentador solar puede ser así más confiable y puede ser construido para temperaturas superiores, permitiendo mayores eficacias.

55 La corriente 92 de salida del calentador solar que comprende CO₂ reciclado puede en algunos casos, estar a una temperatura que esté por debajo de la temperatura de entrada requerida para la cámara 10 de combustión primaria. Así, en algunas realizaciones, se puede colocar un calentador 100 de combustión entre la salida del calentador solar y la entrada de la cámara de combustión primaria. El calentador de combustión puede, por ejemplo, quemar una fracción de la corriente 7 de combustible gaseoso o una corriente de combustible separada para proporcionar calentamiento de bajo nivel necesario para aumentar la temperatura del fluido de reciclado de CO₂. La corriente 102 de salida del calentador de combustión puede estar así a una temperatura requerida para entrada a la cámara de combustión primaria y se puede hacer pasar directamente a la cámara de combustión primaria. Como se apreciará, el calentador de combustión puede ser opcional y, cuando esté presente, se puede encender sólo durante los periodos de energía solar valle cuando la corriente de salida del calentador solar esté por debajo de un umbral de temperatura requerido.

Como se ilustra en la FIG. 2, el sistema integrado de la presente descripción puede incluir una pantalla 200 térmica retráctil. La pantalla térmica puede ser desplegada durante los periodos de energía solar valle para resistir la pérdida de calor del calentador 90 solar mientras que el concentrador 220 solar está suministrando un calentamiento insuficiente para mantener la alta temperatura requerida para el calentador solar. La pantalla térmica puede comprender cualquier material que sea beneficioso para resistir pérdidas radiantes del calentador solar y/o proporcionar calentamiento reflectivo - es decir, que refleje pérdidas radiantes de vuelta al calentador solar. La pantalla térmica puede ser retráctil de manera que, durante los periodos de energía solar máxima, toda la radiación solar disponible puede ser dirigida al calentador solar para maximizar la capacidad de calor.

Un sistema y método de acuerdo con la presente descripción también puede incluir almacenamiento de calor para maximizar la entrada de calor del calentador solar. En algunas realizaciones, el calentador solar y el sistema de concentración asociado pueden proporcionar sólo una porción del calor total requerido para el sistema y método de generación de energía. Así, puede ser útil mantener un flujo mínimo, constante, del combustible de combustión a la cámara de combustión primaria para el calentamiento mínimo necesario requerido. En algunas realizaciones, sin embargo, el calentador solar y su sistema de concentración asociado pueden proporcionar calentamiento en exceso más allá del necesario para las condiciones de operación del sistema y método de generación de energía total. En tales realizaciones, el sistema y método descritos pueden incluir uno o más componentes de almacenamiento de calor, tales como un almacenamiento de CO₂ calentado o un almacenamiento de sales fundidas calentadas. El calor almacenado (por ejemplo, en un tanque de almacenamiento de CO₂ o tanque de almacenamiento de sales fundidas) se puede extraer entonces durante los periodos de calentamiento solar no máximos para suplementar más el calentamiento de la cámara de combustión primaria y conservar el calor en exceso producido por el calentador solar durante los periodos de calentamiento solar máximo. Los cálculos basados en una velocidad de irradiación en el suroeste de los Estados Unidos de aproximadamente 2.063 kWh/m², por ejemplo, han demostrado que un sistema de acuerdo con algunas realizaciones de la presente descripción puede operar en periodos de calentamiento solar máximo sobre calentamiento procedente del sol 100% y la entrada de calor solar total al sistema puede ser aproximadamente 32,9% de la capacidad del sistema.

Aunque la presente descripción se discute en relación con la FIG. 2 como utilizando un combustible gaseoso o líquido, el sistema y método integrado también pueden utilizar combustibles sólidos, tales como carbón, lignita, biomasa, desechos y coque de petróleo. En tales realizaciones, puede ser útil incluir una precámara de combustión para el combustible sólido que proporcione una corriente de salida de productos combustibles que se pueda quemar en la cámara de combustión primaria. Las realizaciones ejemplares se ilustran en la FIG. 3 en la que se puede dividir la corriente 5 de oxígeno y una corriente 354 de oxígeno POX puede ser entrada a una cámara 360 de combustión de oxidación parcial (POX, por sus siglas en inglés) junto con una suspensión 332 de combustible particularizada, presurizada. Para preparar la suspensión, se muele una corriente 305 de combustible sólido (por ejemplo, carbón) en un molino 310 para proporcionar una corriente 312 de combustible sólido particularizado, que se suspende en un mezclador 320 accionado por un generador 321. El combustible sólido particularizado se combina con una fracción 74 de suspensión de CO₂ retirada de la corriente 72 de CO₂ de descarga más fría densificada previamente a la presurización a través del compresor 80. El CO₂, que es preferiblemente supercrítico en este punto, se combina con el combustible sólido particularizado para formar la suspensión 322 de baja presión, que se hace pasar después por una bomba 330 de suspensión para proporcionar la suspensión 332 de combustible particularizado, presurizada, como una entrada a la cámara de combustión de POX. Además, la entrada a la cámara de combustión de POX es una fracción 38 de POX de la corriente de reciclado de CO₂, que se puede tomar de la corriente 34 de reciclado de CO₂ tal como por un divisor 35. También sale del divisor la fracción 36 del calentador solar de la corriente de reciclado de CO₂.

La combustión en la cámara de combustión de POX proporciona una corriente 362 de combustión de POX, que puede incluir una variedad de componentes. En realizaciones específicas, el combustible sólido, O₂ y CO₂ pueden ser proporcionados en relaciones tales que la oxidación parcial del combustible sólido dé como resultado una corriente de combustión que incluya un componente incombustible, CO₂, y uno o más de H₂, CO, CH₄, H₂S y NH₃. La corriente de combustión de POX se puede hacer pasar por un filtro 370 para retirar cualquier componente incombustible, tal como cenizas. La corriente 374 de combustión de POX filtrada resultante se puede dirigir a la cámara 10 de combustión primaria como el combustible de combustión y puede incluir esencialmente sólo materiales combustibles gaseosos y/o líquidos. Se puede retirar una corriente 372 de material en forma de partículas filtrada del filtro para su eliminación.

Junto con la descripción anterior, las realizaciones incluidas por la FIG. 3 comprenden esencialmente los componentes del sistema discutidos de otro modo en relación a la FIG. 2 y los métodos de uso de las mismas se pueden llevar a cabo de una manera como se discutió en relación a la FIG. 2. En particular, la corriente 12 de salida de la cámara de combustión se puede expandir por la turbina 20. La corriente 22 de salida de la turbina se puede enfriar a través del intercambiador 30 de calor. La corriente de salida de la turbina enfriada se puede enfriar más, si se desea, en un refrigerador 40 de baja temperatura y la corriente 42 de salida de baja temperatura puede presentar agua y otras impurezas separadas de ahí en un separador 50 como corriente 54 de impurezas. La corriente 52 de CO₂ seco puede ser presurizada en la bomba 60 y se puede enfriar la corriente 62 de CO₂ de descarga de la bomba y densificar en el refrigerador 70 de densificación. Se puede dividir la corriente de CO₂ de descarga del refrigerador de densificación, como se discutió anteriormente, dirigiéndose una fracción 74 al mezclador y comprimiéndose la fracción 72 restante en el compresor 80. Se puede dividir la corriente de CO₂ de descarga de CO₂ comprimido. La corriente de descarga de CO₂ comprimido 86 (fracción de reciclado) se puede hacer pasar de vuelta al intercambiador de calor y se puede hacer pasar una corriente 88 de descarga de CO₂ comprimido (fracción del filtro) al filtro 370. Cualquier CO₂ de alta presión

restante para la tubería puede ser retirado como se discutió anteriormente. La corriente 34 de reciclado de CO₂ que sale del extremo caliente del intercambiador de calor se puede dividir en el divisor 35 como se indicó anteriormente, procediendo las respectivas fracciones por el sistema como se discutió ya en relación con la FIG. 3 anterior.

5 Volviendo a la FIG. 2, la corriente 34 de reciclado de CO₂ se puede configurar para pasar por el calentador 90 solar y el calentador 100 de combustión opcional previamente al paso a la cámara 10 de combustión primaria. En otras realizaciones, sin embargo, tal como en la FIG. 3, se puede dividir opcionalmente la corriente de reciclado de CO₂. Mientras la corriente de CO₂ se divide para entrada a la cámara de combustión de POX en la FIG. 3, dicha división se puede usar para dirigir flujo de CO₂ a otros componentes del sistema. Por ejemplo, como se observa en la FIG. 4, la corriente de reciclado de CO₂ que sale del extremo caliente del intercambiador 30 de calor puede pasar por un divisor 10 135 de CO₂ de reciclado de combustión para formar dos corrientes de salida. Una corriente 136 de división del calentador solar de reciclado de CO₂ se puede dirigir por el calentador 90 solar y se puede hacer pasar una corriente 137 de división de la cámara de combustión primaria de reciclado de CO₂ directamente a la cámara 10 de combustión primaria. El divisor de CO₂ de reciclado de combustión puede ser, por ejemplo, un divisor de flujo simple que puede presentar una división de relación fijada de la corriente de reciclado de CO₂ que entra o puede presentar una división 15 variable de la corriente de reciclado de CO₂ que entra. Una división fijada puede oscilar desde flujo del calentador solar a flujo de la cámara de combustión primaria 10:90 a flujo del calentador solar a flujo de la cámara de combustión primaria 90:10 sobre una base de flujo másico. Otras divisiones de relación fijada (flujo de calentador solar a flujo de la cámara de combustión primaria) pueden ser 20:80 a 80:20, 30:70 a 70:30 ó 40:60 a 60:40, sobre una base de flujo másico. En realizaciones en las que se usa división variable, los caudales para el calentador solar y la cámara de combustión primaria pueden variar basándose en el calor que produce el estado del calentador solar. Por ejemplo, en periodos de calentamiento solar máximo, se puede dirigir 50% o más, 75% o más, 80% o más o 90% o más del flujo másico al calentador solar. Durante periodos de calentamiento solar inferior, la mayoría del caudal másico (por ejemplo, los mismos caudales másicos indicados anteriormente) se puede dirigir a la cámara de combustión primaria. El control automatizado de la válvula de flujo variable también puede estar incluido. Específicamente, la salida de calor del calentador solar se puede controlar de manera continua o de manera intermitente y compararse frente a un esquema de flujo de CO₂ predeterminado. El caudal másico de CO₂ por el divisor de CO₂ reciclado de combustión se puede ajustar de manera automática a medida que aumenta y disminuye la salida de calor del calentador solar, por un ciclo solar. Por ejemplo, a medida que aumenta el calor disponible del calentador solar, el porcentaje del caudal másico de CO₂ puede aumentar de manera automática y de manera proporcional para la división del calentador solar reciclado de CO₂ y disminuir para la división de la cámara de combustión primaria de reciclado de CO₂. A medida que aumenta el calor disponible del calentador solar, puede disminuir de manera automática y de manera proporcional el porcentaje del caudal másico de CO₂ para el divisor del calentador solar de reciclado de CO₂ y aumentar para el divisor de la cámara de combustión primaria de reciclado de CO₂. Así, los sistemas de la presente descripción pueden incluir elementos de control computerizados, incluyendo hardware y software adaptados para medir el calor disponible del calentador solar y adaptados a válvulas de flujo abiertas y cerradas como sea necesario para ajustar el flujo del calentador solar y el flujo de la cámara de combustión primaria de la corriente de reciclado de CO₂.

Se puede proporcionar una división similar de la corriente de reciclado de CO₂ en realizaciones en las que se usa un combustible sólido y una cámara de combustión de oxidación parcial. En la FIG. 5, por ejemplo, se muestra un sistema sustancialmente similar al discutido anteriormente en relación a la FIG. 3. La realización de la FIG. 5 difiere en que el divisor 35 ha sido recolocado y se configura para dividir la corriente 34 de reciclado de CO₂ en tres corrientes separadas. La fracción 38 de POX de la corriente de reciclado de CO₂ pasa de nuevo directamente a la cámara 360 de combustión de POX. Una fracción 36 del calentador solar de la corriente de reciclado de CO₂ pasa de nuevo asimismo directamente al calentador 90 solar. Ahora se proporciona directamente una fracción 37 de la cámara de combustión primaria de reciclado de CO₂ dedicada a la cámara 10 de combustión primaria. Como en relación a la FIG. 5, el divisor en la FIG. 5 se puede configurar para división de relación fijada o división de relación variable. En algunas realizaciones, una mayoría del flujo de la corriente de reciclado de CO₂ por el divisor (sobre una base de flujo másico) se puede dirigir a una de las tres corrientes. En otras palabras, una mayoría del flujo de la corriente de reciclado de CO₂ por el divisor (sobre una base de flujo másico) se puede dirigir a la cámara de combustión de POX o una mayoría del flujo de la corriente de reciclado de CO₂ por el divisor (sobre una base de flujo másico) puede ser dirigida al calentador solar o una mayoría del flujo de la corriente de reciclado de CO₂ por el divisor (sobre una base de flujo másico) puede ser dirigida a la cámara de combustión primaria.

Volviendo a la FIG. 2, si se desea, se puede dirigir alternativamente la corriente 34 de reciclado de CO₂ en total al calentador 90 solar o a la cámara 10 de combustión primaria. Por ejemplo, como se ilustra en la FIG. 6, se pueden colocar dos válvulas 235 de flujo de posición en línea de la corriente de reciclado de CO₂. Se puede colocar la válvula de flujo en la posición del calentador solar de manera que el 100% de la corriente de reciclado de CO₂ pase al calentador 90 solar en el bucle 236 del calentador solar de reciclado de CO₂. Esta configuración se puede usar durante tiempos de calentamiento solar máximo de manera que toda la corriente de reciclado de CO₂ se caliente en el calentador solar. En tales realizaciones, el calentador de combustión puede estar particularmente ausente ya que no se requerirá calentamiento adicional de la corriente 92 de salida del calentador solar y puede proceder directamente después la corriente de salida del calentador solar a la cámara de combustión primaria. La válvula de flujo se puede colocar alternativamente en la posición de la cámara de combustión primaria de manera que el 100% de la corriente de reciclado de CO₂ pase a la cámara 10 de combustión primaria en el bucle 237 de la cámara de combustión primaria de reciclado de CO₂. Esta configuración se puede usar durante los tiempos de calentamiento solar valle cuando se puede proporcionar insuficiente calentamiento en el calentador solar para calentar la corriente de reciclado de CO₂ a la

temperatura necesaria para entrar a la cámara de combustión primaria. La totalidad de la corriente de reciclado de CO₂ se puede calentar después en la cámara de combustión primaria a la temperatura necesaria.

5 El uso de una válvula de flujo de dos posiciones también se puede usar en realizaciones en las que se queme un combustible sólido en una cámara de combustión de POX previamente a la combustión de productos de oxidación parcial en la cámara de combustión primaria. Por ejemplo, como se observa en la FIG. 7, se coloca una válvula 235 de flujo de dos posiciones en línea de la corriente 34 de reciclado de CO₂. Se puede colocar la válvula de flujo en la posición del calentador solar de manera que el 100% de la corriente de reciclado de CO₂ pase al calentador 90 solar en el bucle 236 del calentador solar de reciclado de CO₂. Esta configuración se puede usar durante los tiempos de calentamiento solar máximo de manera que todo de la corriente de reciclado de CO₂ se calienta en el calentador solar.
10 En tales realizaciones, el calentador de combustión puede estar ausente en particular ya que no se requerirá calentamiento adicional de la corriente 92 de salida del calentador solar, y la corriente de salida del calentador solar puede proceder entonces directamente a la cámara de combustión primaria. La válvula de flujo se puede colocar alternativamente en la posición de las cámaras de combustión combinadas de manera que el 100% de la corriente de reciclado de CO₂ pase a las dos cámaras de combustión en el bucle 239 de las cámaras de combustión combinadas de reciclado de CO₂. Este bucle se puede dividir específicamente en un divisor 135 de CO₂ de reciclado de combustión en el que se puede hacer pasar una porción del CO₂ reciclado a la cámara 360 de combustión de POX en la fracción 38 de POX de la corriente de reciclado de CO₂ y se puede hacer pasar una porción del CO₂ reciclado a la cámara 10 de combustión primaria en la fracción 37 de la cámara de combustión primaria de reciclado de CO₂.

20 Como se puede observar de lo anterior, los sistemas y métodos integrados de la presente descripción pueden ser beneficiosos en particular para utilizar todo el calentamiento disponible de un sistema CSP para mejorar la eficacia de un sistema y método de generación de energía de combustión. Esto se ilustra en la FIG. 8, donde el calentamiento relativo de las diversas fuentes en un sistema y método integrado que utiliza gas natural como combustible. Tales fuentes de calentamiento se asignan por un ciclo solar ejemplar de medianoche a medianoche. Como se observa en la misma, durante los periodos sin luz del sol, la cámara de combustión primaria se acciona de manera que un periodo
25 401 de combustión primaria justifique sobre todo el calentamiento en el sistema integrado. Cuando transcurre el amanecer, el periodo de combustión primaria puede cesar (aunque puede tener lugar una disminución más gradual) al tiempo que aumenta el periodo 403 de calentamiento solar. Durante el tiempo en que aumenta el calentamiento solar a medida que se aproxima la salida solar máxima, se puede encender el calentador de combustión para calentamiento suplementario y puede empezar un periodo 405 de calentamiento de la cámara de combustión y disminuir gradualmente. A medida que la salida solar máxima empieza a decaer, el periodo del calentador de la cámara de combustión puede aumentar de nuevo hasta el punto de que el calentamiento solar sea suficientemente bajo para que el periodo de combustión primaria empiece y domine la producción de calor. Durante el periodo de la cámara de combustión primaria, se puede implementar la utilización 407 de pantalla térmica para reducir la pérdida de calor del calentador solar.

35 El alcance de la invención viene definido por las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un método para generar energía, comprendiendo el método:

- quemar un combustible carbonoso en una cámara (10) de combustión con oxígeno en presencia de una corriente de fluido de trabajo presurizado formado de CO₂ esencialmente puro para proporcionar una corriente de salida de la cámara de combustión calentada que comprende uno o más productos de combustión;
- expandir la corriente de salida de la cámara de combustión calentada en una turbina (20) para generar la energía y formar una corriente de salida de la turbina;
- eliminar calor de la corriente de salida de la turbina en un intercambiador (30) de calor para formar una corriente de salida de la turbina enfriada;
- purificar la corriente de salida de la turbina enfriada en un separador (50) separando uno o más de los productos de combustión de la corriente de salida de la turbina para formar una corriente de CO₂ esencialmente puro;
- presurizar la corriente de CO₂ esencialmente puro para formar la corriente de fluido de trabajo presurizado de CO₂ esencialmente puro;
- añadir el calor eliminado de la corriente de salida de la turbina a la corriente de fluido de trabajo presurizado formado por CO₂ esencialmente puro, haciendo pasar la corriente de fluido de trabajo presurizado formada por CO₂ esencialmente puro a través del intercambiador (30) de calor;
- calentar adicionalmente la corriente de fluido de trabajo presurizado formado por CO₂ esencialmente puro con calentamiento solar disponible; y
- hacer pasar la corriente de fluido de trabajo presurizado formado por CO₂ esencialmente puro a la cámara (10) de combustión;
- donde la cantidad de combustible carbonoso y oxígeno proporcionados a la cámara (10) de combustión se controla de tal modo que el calor de combustión en la cámara (10) de combustión está relacionada inversamente con el calor disponible procedente del calentamiento solar, para calentar la corriente de fluido de trabajo presurizado formado por CO₂ esencialmente puro, donde la cantidad de calor disponible del calentamiento solar varía más de 10% sobre un único ciclo solar, y donde la cantidad de combustible carbonoso y oxígeno proporcionados a la cámara (10) de combustión se controla de tal forma que la temperatura de la corriente de salida de la cámara de combustión calentada comprende uno o más productos de combustión que han pasado a la turbina (20) varía menos de 10% sobre el único ciclo solar.
2. El método de la reivindicación 1, donde el CO₂ esencialmente puro comprende al menos 95% en masa de CO₂.
3. El método de la reivindicación 1, donde el combustible carbonoso es un líquido o gas.
4. El método de la reivindicación 1, donde se cumple una o más de las siguientes condiciones:
- la corriente de fluido de trabajo presurizado formada por CO₂ esencialmente puro que pasa a la cámara (10) de combustión está a una presión de aproximadamente 15 MPa (150 bar) o superior;
- la corriente de salida de la cámara de combustión calentada que comprende uno o más productos de combustión que se expande en la turbina (20) está a una temperatura de aproximadamente 500°C o más;
- la etapa de presurización de la corriente de CO₂ esencialmente puro comprende hacer pasar la corriente de CO₂ esencialmente puro a través de una pluralidad de etapas de presurización, particularmente comprendiendo además enfriar la corriente de fluido de trabajo entre dos etapas de presurización.
5. Un sistema de generación de energía que comprende;
- al menos un compresor (80) configurado para presurizar una corriente de fluido de trabajo de CO₂ esencialmente puro para formar una corriente de fluido de trabajo presurizado;
- un calentador (90) solar configurado para recibir y calentar la corriente de fluido de trabajo presurizado;
- una turbina (20) de producción de energía configurada para expandir la corriente de fluido de trabajo presurizado, calentada en una turbina para generar energía y hacer que salga la corriente del fluido de trabajo; estando caracterizado el sistema de generación de energía por que comprende un calentador (10) de combustión configurado para recibir y calentar la corriente de fluido de trabajo presurizado y
- uno o o más controladores adaptados para medir el calor disponible del calentador (90) solar y controlar la cantidad de combustible carbonoso quemado en el calentador (10) de combustión.
6. El sistema de la reivindicación 5, donde el sistema además comprende un divisor (35) que tiene una primera salida

en comunicación de fluido con el calentador (10) de combustión y una segunda salida en comunicación de fluido con el calentador (90) solar.

- 5 7. El sistema de la reivindicación 5, que comprende además una válvula (235) de flujo, que tiene una primera salida en comunicación de fluido con el calentador (10) de combustión y una segunda salida en comunicación de fluido con el calentador (90) solar, estando adaptada dicha válvula de flujo, a flujo alterno entre el calentador (90) solar y el calentador (90) de combustión.

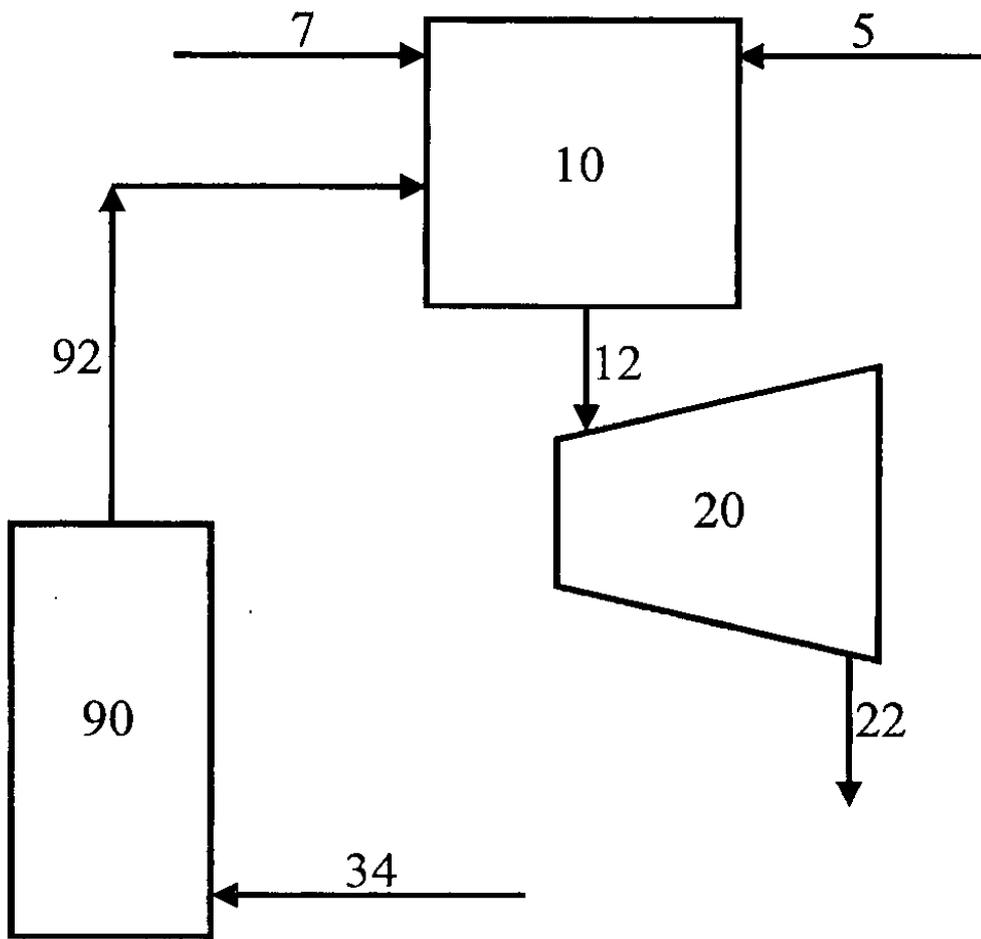


FIG. 1

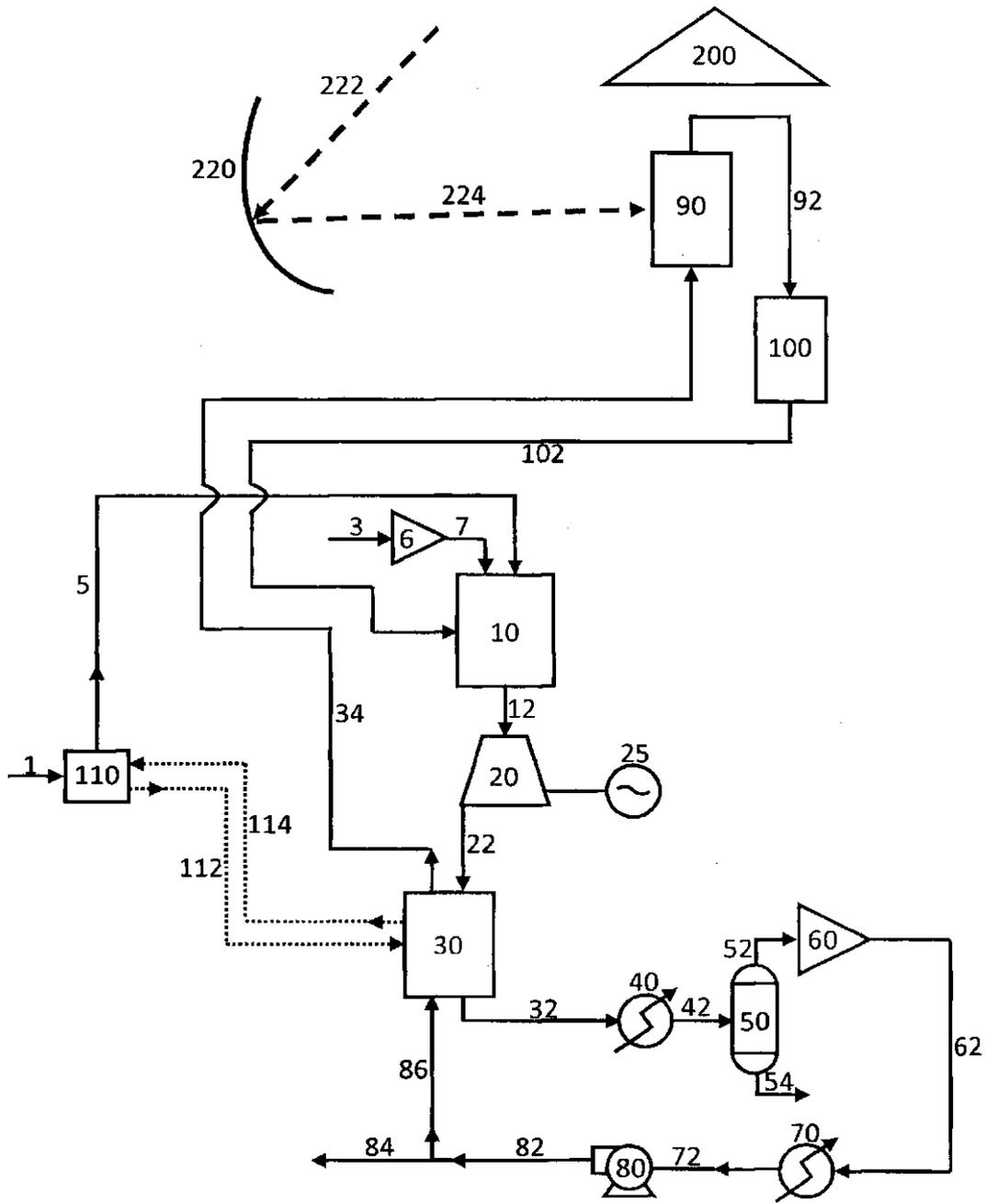


FIG. 2

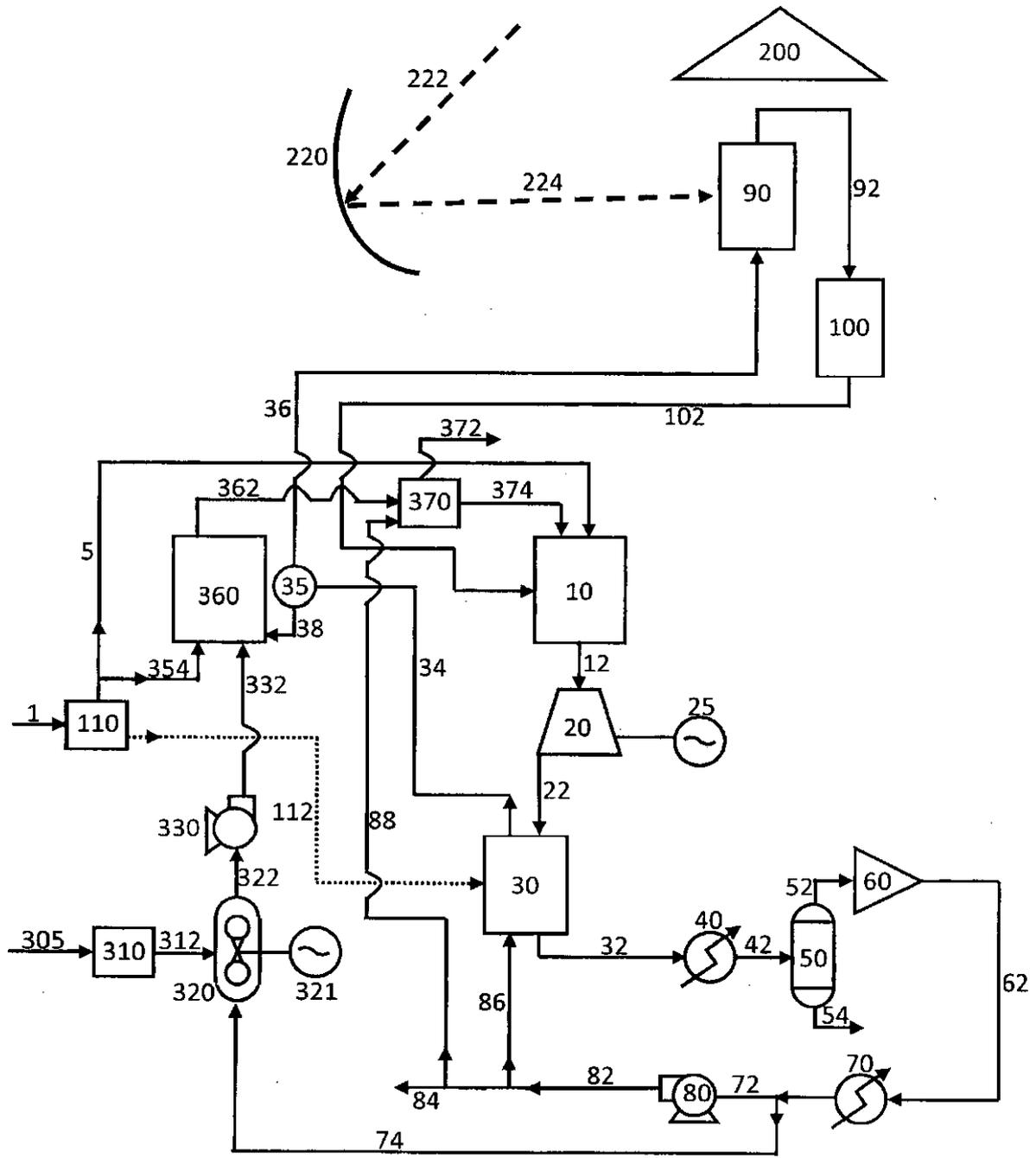


FIG. 3

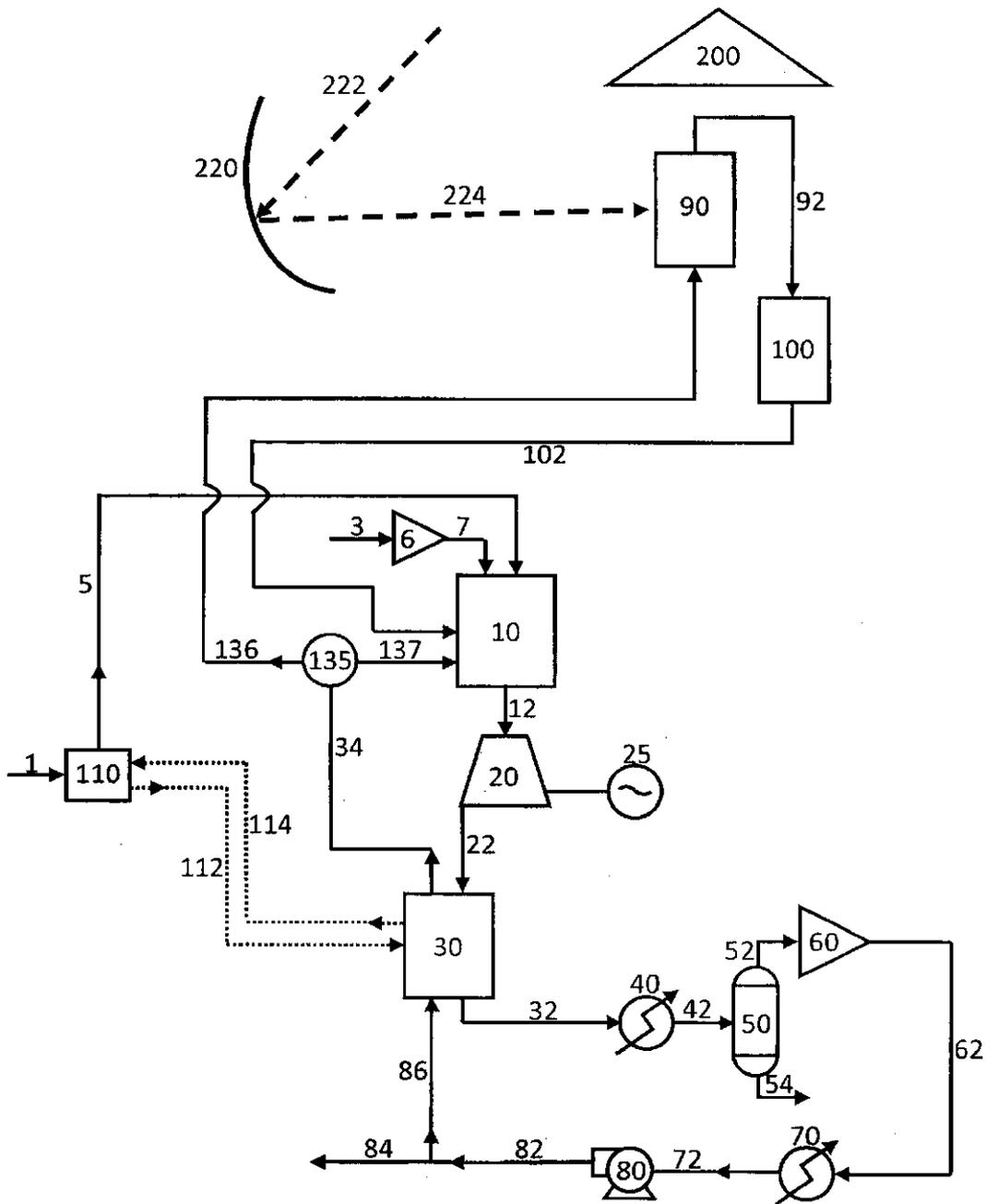


FIG. 4

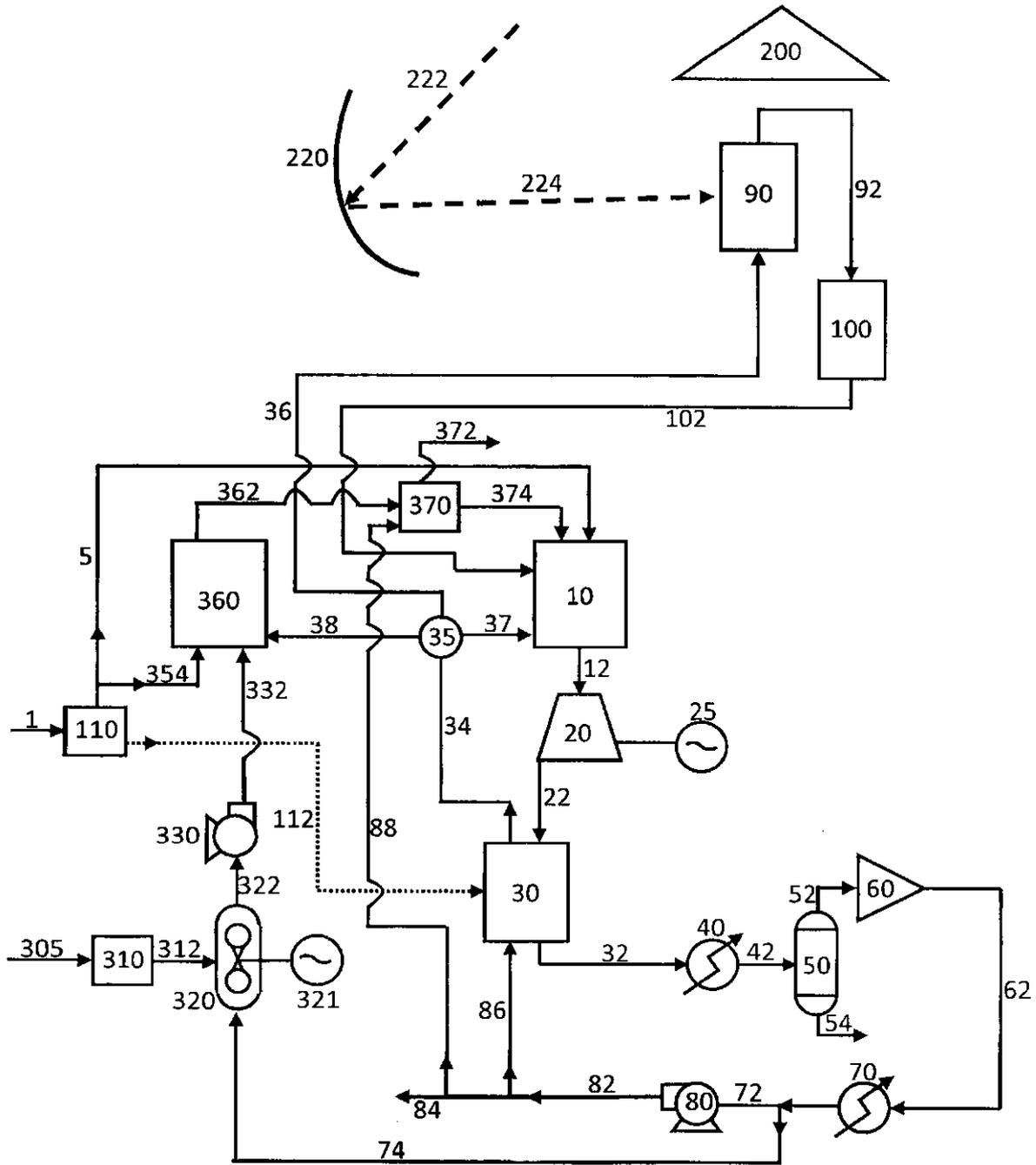


FIG. 5

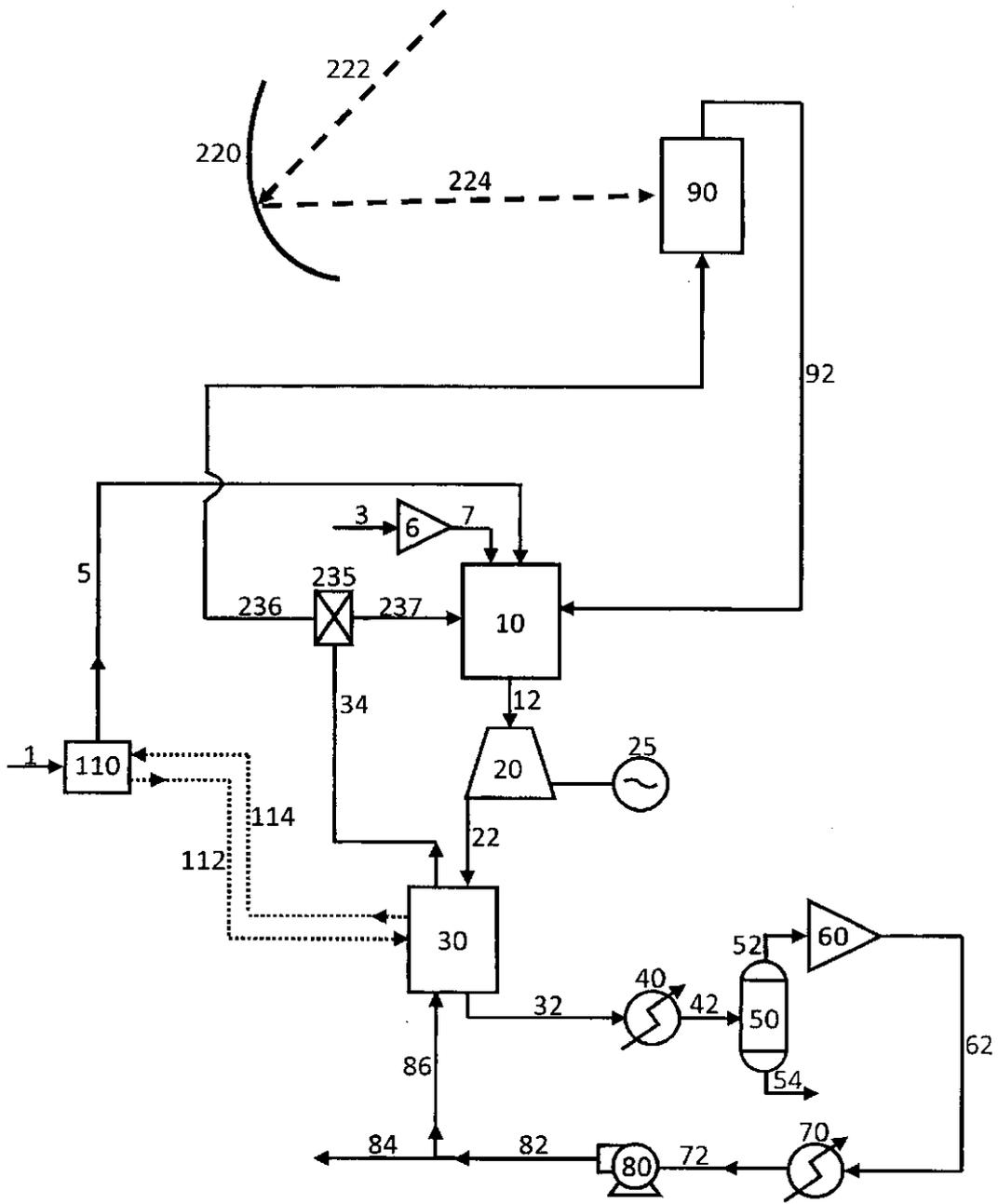


FIG. 6

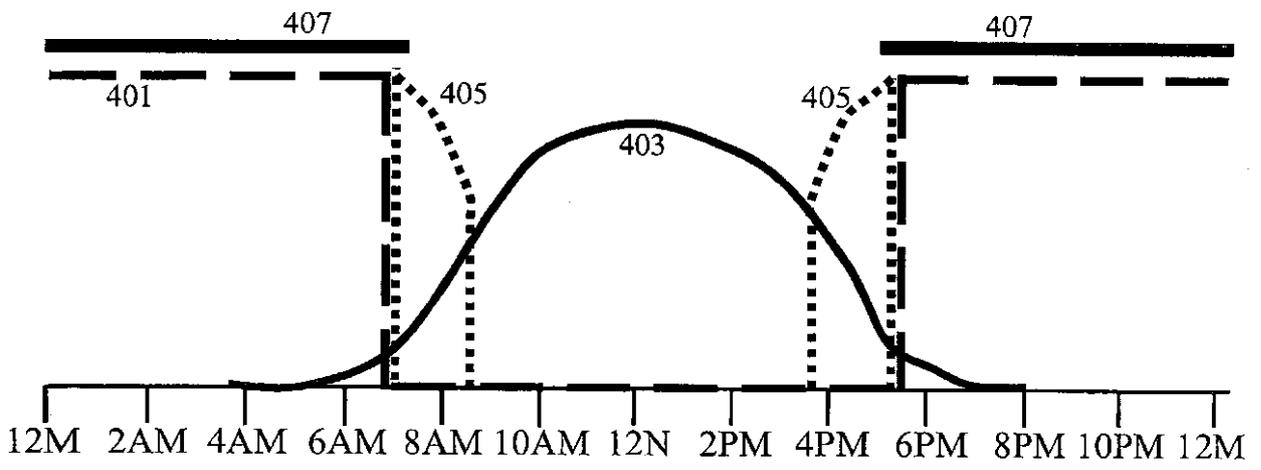


FIG. 8