

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 575 730**

51 Int. Cl.:

H01M 8/04 (2006.01)

H01M 8/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.03.2012** **E 12722564 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.03.2016** **EP 2692007**

54 Título: **Complejo de recirculación para aumentar el rendimiento de una pila de combustible con captura de CO₂**

30 Prioridad:

31.03.2011 US 201113076664

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

30.06.2016

73 Titular/es:

**GENERAL ELECTRIC COMPANY (100.0%)
1 River Road
Schenectady, NY 12345, US**

72 Inventor/es:

**LEHAR, MATTHEW ALEXANDER;
PETER, ANDREW MAXWELL;
ALINGER, MATTHEW JOSEPH;
SHAPIRO, ANDREW PHILIP;
HUDY, LAURA MICHELE;
BIEDERMAN, BRUCE PHILIP;
LISSIANSKI, VITALI VICTOR y
SHISLER, ROGER ALLEN**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 575 730 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

Complejo de recirculación para aumentar el rendimiento de una pila de combustible con captura de CO₂

Antecedentes

5 Esta invención se refiere de forma general a pilas de combustible de óxido sólido (SOFC), y más particularmente a sistemas y procedimientos para potenciar el rendimiento global de una pila de combustible de óxido sólido (SOFC) separando simultáneamente una corriente prácticamente pura de CO₂ para el secuestro o para su uso en la generación de energía eléctrica para aumentar adicionalmente la eficacia global del proceso.

10 Las pilas de combustible son unos dispositivos de conversión de energía electroquímica que han mostrado un potencial de eficacia relativamente alta y una baja contaminación en la generación de energía. Una pila de combustible proporciona generalmente una corriente directa (dc) que puede ser convertida en una corriente alterna (ac) a través de, por ejemplo, un inversor. El voltaje dc o ac puede usarse para alimentar motores, luces y cualquier diversidad de dispositivos y sistemas eléctricos. Las pilas de combustible pueden funcionar en aplicaciones estacionarias, semiestacionarias o portátiles. Algunas pilas de combustible, tales como las pilas de combustible de óxido sólido (SOFC), pueden funcionar en sistemas de energía a gran escala que proporcionan electricidad para satisfacer necesidades industriales y municipales. Otras pueden ser útiles para aplicaciones portátiles más pequeñas tales como, por ejemplo, la alimentación de coches.

20 Una pila de combustible produce electricidad mediante una combinación electroquímica de un combustible y un oxidante a través de una capa conductora iónica. Esta capa conductora iónica, denominada también electrolito de la pila de combustible, puede ser un líquido o un sólido. Algunos tipos habituales de pilas de combustible incluyen de ácido fosfórico (PAFC), de carbonato fundido (MCFC), de membrana de intercambio de protones (PEMFC) y de óxido sólido (SOFC), generalmente todas se nombran según sus electrolitos. En la práctica, las pilas de combustible se agrupan normalmente en series eléctricas en un conjunto de pilas de combustible para producir energía a unos voltajes o corriente útiles. Por lo tanto, puede usarse una interconexión de estructuras para conectar o acoplar pilas de combustible adyacentes en serie o en paralelo.

25 En general, los componentes de una pila de combustible incluyen el electrolito y dos electrodos. Las reacciones que producen electricidad generalmente tiene lugar en los electrodos, en los que normalmente hay dispuesto un catalizador para acelerar las reacciones. Los electrodos pueden estar fabricados en forma de canales, en capas porosas, y similares, para aumentar el área superficial para que se produzcan las reacciones químicas. El electrodo que reduce electroquímicamente el oxígeno (normalmente procedente del aire) se denomina cátodo, mientras que el electrodo que oxida electroquímicamente el combustible se denomina ánodo. El electrolito porta partículas cargadas eléctricamente desde un electrodo al otro y por lo demás es sustancialmente impermeable tanto el combustible como al oxidante. En el caso de una Célula de Combustible de Óxido Sólido (SOFC), el electrolito es un óxido cerámico sólido que conduce iones negativos de oxígeno a una temperatura lo suficientemente alta (normalmente por encima de 500C). Debido a que el electrolito de una SOFC solo es conductor a una elevada temperatura, la corriente entrante de combustible en el ánodo y la corriente entrante de oxidante en el cátodo deben ser normalmente precalentadas a una elevada temperatura (normalmente por encima de 500C). Este precalentamiento normalmente se lleva a cabo a través de un intercambio de calor de recuperación con los gases de salida calientes de la pila de combustible.

40 Normalmente, la pila de combustible convierte el hidrógeno (combustible) y el oxígeno (oxidante) en agua (subproducto) para producir electricidad. El subproducto de agua puede salir de la pila de combustible en forma de vapor en las operaciones a alta temperatura. Este vapor descargado (y otros componentes de los gases de salida calientes) pueden utilizarse en turbinas y en otras aplicaciones para generar electricidad o energía adicional, proporcionando un aumento de la eficacia en la generación de energía. Si se emplea aire como oxidante, el nitrógeno del aire es sustancialmente inerte y normalmente pasa a través de la pila de combustible. Puede proporcionarse combustible de hidrógeno a través de un reformado local (por ejemplo, un reformado de vapor en el sitio) de materias primas basadas en carbono, tales como un reformado del más fácilmente disponible gas natural y de otros combustibles y materias primas hidrocarbonadas. Algunos ejemplos de combustibles hidrocarbonados incluyen gas natural, metano, etano, propano, metanol, gas de síntesis y otros hidrocarburos. El reformado del combustible hidrocarbonado para producir hidrógeno para alimentar la reacción electroquímica puede ser incorporado junto con el funcionamiento de la pila de combustible. Además, dicho reformado puede producirse de forma interna y/o externa con respecto a la pila de combustible. Para el reformado de hidrocarburos que se realiza externamente con respecto a la pila de combustible, el reformador externo asociado puede estar ubicado distante o adyacente a la pila de combustible.

55 Los sistemas de pilas de combustible que pueden reformar hidrocarburos de forma interna y/o adyacente a la pila de combustible pueden ofrecer ventajas, tales como una simplicidad en el diseño y en el funcionamiento. Por ejemplo, la reacción de reformado del vapor de los hidrocarburos normalmente es endotérmica, y por lo tanto, el reformado interno en el interior de la pila de combustible o el reformado externo en un reformador adyacente, puede utilizar el calor generado por las reacciones electroquímicas normalmente exotérmicas de la pila de combustible. Adicionalmente, los catalizadores activos en la reacción electroquímica entre el hidrógeno y el oxígeno en el interior

de la pila de combustible para producir electricidad también pueden facilitar el reformado interno de los combustibles hidrocarbonados. En las SOFC, por ejemplo, si se dispone un catalizador de níquel en un electrodo (por ejemplo, el ánodo) para mantener la reacción electroquímica, el catalizador de níquel activo también puede reformar el combustible hidrocarbonado en hidrógeno y monóxido de carbono (CO). Además, tanto el hidrógeno como el CO pueden ser producidos durante el reformado de materias primas hidrocarbonadas. Por lo tanto, las pilas de combustible, tales como las SOFC, que pueden utilizar CO como combustible (además del hidrógeno) son generalmente los candidatos más atractivos para la utilización de hidrocarburos reformados y para el reformado interno y/o adyacente de combustible hidrocarbonado.

En general, unas elevadas temperaturas de funcionamiento en el interior de la pila de combustible y la presencia del vapor del subproducto generalmente promueven el reformado interno o adyacente del hidrocarburo. Ventajosamente, el exceso de vapor de la pila de combustible puede reducir la deposición de carbono elemental en el interior de la pila de combustible y en los reformadores adyacentes. En conjunto, el reformado interno y/o adyacente y su interacción con el funcionamiento de la pila de combustible pueden mejorar la eficacia y/o la economía durante el funcionamiento de la pila de combustible.

Desafortunadamente, generalmente es difícil mantener una proporción lo suficientemente alta entre el vapor y el carbono en todas las regiones de una pila de combustible para evitar la formación de carbono elemental y la asociada deposición de carbono, especialmente si se pretende que el reformado interno se produzca sobre el electrodo (por ejemplo, el ánodo) junto con, por ejemplo, las reacciones electroquímicas. La región de la pila de combustible próxima a la entrada es especialmente vulnerable a la formación de carbono. Es decir, el combustible entrante que va a ser internamente reformado con vapor está subalimentado de vapor o de agua líquida (H₂O) debido al típico gradiente de una concentración creciente de H₂O (por ejemplo, de vapor) desde la entrada hacia la salida de la pila de combustible. La concentración de H₂O generalmente aumenta en la dirección del flujo de combustible hacia la salida, y por lo tanto, generalmente hay presente un exceso de H₂O en la región de salida de la pila de combustible. Generalmente se espera que el carbono se forme cerca de la entrada de la pila debido a que la concentración de H₂O es la más baja en la entrada. La deposición de carbono en la pila de combustible puede dar lugar a una baja transferencia de calor/masa, a daños y/o a un fallo en las pilas de combustible.

El sostenimiento de un funcionamiento a largo plazo de las pilas de combustible puede ser problemático debido a la acumulación de depósitos de carbono en el interior de la pila de combustible. Dichos depósitos de carbono son normalmente relativamente peores si las pilas de combustible se basan en materias primas basadas en carbono en lugar de las más limpias materias primas basadas en hidrógeno. Finalmente, la pila de combustible puede requerir ser apagada o sustituida, interrumpiendo la producción de electricidad y aumentando los costes de mantenimiento del sistema de la pila de combustible, por ejemplo. Además, los reformadores o los pre-reformadores usados para el reformado externo y/o para el reformado adyacente también pueden estar sometidos a una deposición de carbono significativa. Por lo tanto, estos reformadores también son generalmente apagados para su regeneración (por ejemplo, a través de vapor), aumentando los costes operativos y de mantenimiento, y reduciendo la eficacia del sistema global de la pila de combustible.

La unidad de ánodo de una SOFC normalmente oxida electroquímicamente como mucho el 80 % del combustible en productos de reacción, pasando el 20 % restante sin oxidar los gases de salida. El límite superior de utilización es debido a las elevadas concentraciones de los productos de reacción que obstaculizan la reacción química próxima al extremo corriente abajo del ánodo y que pueden causar daños en el material de la pila de combustible.

En vista de lo anterior, existe una necesidad de proporcionar una técnica que aumente la utilización de combustible de una SOFC. Adicionalmente sería beneficioso que la técnica consiguiera la separación del CO₂ de la corriente de combustible para un secuestro o para una expansión a través de una turbina, por ejemplo, para generar energía eléctrica, aumentando así la eficacia global del proceso.

El documento US 2006/115691 describe procedimientos de tratamiento de los gases de salida del ánodo para plantas generadoras con pilas de combustible de óxido sólido con captura de CO₂, en los que el combustible sin reaccionar de los gases de salida del ánodo es recuperado y reciclado, mientras que la corriente de los gases de salida resultantes consiste en CO₂ muy concentrado. El gas del combustible del ánodo y el aire del cátodo se mantienen separados a lo largo de toda la pila de la pila de combustible de óxido sólido. Se divulgan sistemas de pilas de combustible de alta temperatura, tales como sistemas de pilas de combustible de óxido sólido y sistemas de pilas de combustible de carbonato fundido. El documento US 2005/106429 describe un sistema generador de corriente eléctrica que comprende una pila de combustible a elevada temperatura que opera a una temperatura mayor de aproximadamente 250 °C, incluyendo la pila de combustible un canal de ánodo que comprende una entrada de ánodo y una salida de ánodo, mediante lo cual se somete al menos una materia prima hidrocarbonada a un reformado interno en el canal del ánodo para producir un gas de combustible que contiene hidrógeno. El sistema también incluye un medio para reciclar el hidrógeno configurado para recibir un gas de salida del ánodo desde la salida del ánodo que comprende hidrógeno y para reciclar al menos una porción del hidrógeno del gas de salida del ánodo para suministrarlo a la entrada del ánodo, siendo la temperatura del gas de salida del ánodo que sale de la pila de combustible a elevada temperatura inferior a aproximadamente 400 °C, lo que se corresponde con la pila de combustible a elevada temperatura funcionando sustancialmente en un régimen equilibrado térmicamente.

Breve descripción

La presente invención se basa en un complejo de recirculación de pilas de combustible que comprende una pila de combustible que comprende:

5 un ánodo configurado para generar una corriente caliente de gases de salida del ánodo, ánodo que comprende una entrada y una salida;

un ciclo de recuperación del calor de desecho configurado para generar energía a partir del enfriamiento del ánodo caliente;

un compresor configurado para comprimir el gas de salida enfriado a través del ciclo de recuperación del calor de desecho;

10 un expansor configurado para expandir y enfriar el gas de salida comprimido; y

un sistema intercambiador de calor configurado para recibir al menos una porción del gas expandido y para preenfriar el gas de salida comprimido del ciclo de recuperación del calor de desecho antes de su enfriamiento a través del expansor, y configurado adicionalmente para eliminar mediante cambio de fase el agua (H₂O) y el dióxido de carbono (CO₂) del gas de salida que pasa a través del ciclo de recuperación del calor de desecho, y configurado
15 adicionalmente para generar una corriente de combustible que es devuelta a la entrada del ánodo de la pila de combustible con una mayor concentración molar de monóxido de carbono (CO) y de combustible de hidrógeno (H₂) de la que había inicialmente presente en el gas de salida del ánodo de la pila de combustible antes de entrar en el ciclo de recuperación del calor de desecho.

Dibujos

20 Las anteriores y otras características, aspectos y ventajas de la invención serán evidentes a partir de la siguiente descripción detallada, tomada junto con los dibujos anexos, en los que caracteres similares representan partes similares en todos los dibujos, en los que:

la Figura 1 es un diagrama simplificado que ilustra un complejo de recirculación de una pila de combustible de óxido sólido (SOFC) de acuerdo con una realización;

25 la Figura 2 es un diagrama simplificado que ilustra un complejo de recirculación de una pila de combustible de óxido sólido (SOFC) de acuerdo con otra realización;

la Figura 3 es un diagrama simplificado que ilustra un complejo de recirculación de una pila de combustible de óxido sólido (SOFC) de acuerdo con aún otra realización;

30 la Figura 4 es un diagrama simplificado que ilustra un complejo de recirculación de una pila de combustible de óxido sólido (SOFC) de acuerdo con otra realización más;

la Figura 5 es un diagrama simplificado que ilustra un complejo de recirculación de una pila de combustible de óxido sólido (SOFC) de acuerdo con otra realización más; y

la Figura 6 es un diagrama simplificado que ilustra un complejo de recirculación de una pila de combustible de óxido sólido (SOFC) de acuerdo con otra realización más.

35 Aunque las figuras de los dibujos identificadas anteriormente establecen realizaciones alternativas, también se contemplan otras realizaciones de la presente invención, como se indica en el análisis. En todos los casos, esta divulgación presenta realizaciones de la presente invención ilustradas a modo de representación y no de limitación. Los expertos en la materia pueden concebir otras numerosas modificaciones y realizaciones que estén en el ámbito y el espíritu de los principios de esta invención.

40 **Descripción detallada**

Las realizaciones descritas en el presente documento con referencia a las Figuras proporcionan ventajosamente un aumento en la eficacia de las SOFC con unas características de captura simultánea de carbono. También se contemplan otras realizaciones de la presente invención, como se ha indicado en el análisis. Los principios descritos en el presente documento pueden ser simplemente fácilmente aplicados, por ejemplo, a tecnologías comparables de
45 pilas de combustible que no son estrictamente pilas de combustible de óxido sólido. También es posible una amplia variedad de ciclos de recuperación del calor de desecho y de procedimientos para integrar esos ciclos mediante el uso de los principios descritos en el presente documento.

La Figura 1 es un diagrama simplificado que ilustra un complejo de recirculación pila de combustible de óxido sólido (SOFC) 10 de acuerdo con una realización. El complejo de recirculación 10 comprende una SOFC que incluye un
50 ánodo 11 y un cátodo 12. El calor procedente del gas de salida del ánodo 11 dirige un ciclo térmico de Rankine denominado en el presente documento ciclo de Rankine Orgánico (ORC) 13 para producir energía. El gas de salida

del ORC es aplicado a un compresor 14 que funciona para comprimir el gas de salida del ORC subsiguiente a la eliminación de parte del agua condensada a cerca de la temperatura y la presión ambientales, y antes de una eliminación adicional del agua condensada mediante un enfriamiento del gas de salida a la temperatura ambiente a una elevada temperatura. El gas de salida comprimido del ORC es posteriormente enfriado adicionalmente a través de un expansor 15 y de un ciclo de preexpansión que emplea, por ejemplo, un intercambiador de calor 16. De acuerdo con un aspecto, el ciclo de preexpansión funciona mediante el enfriamiento de la corriente del gas de salida comprimido del ORC mediante su contacto con el intercambiador de calor 16.

La Figura 2 es un diagrama simplificado que ilustra un complejo de recirculación de una pila de combustible de óxido sólido (SOFC) 20 de acuerdo con una realización. El complejo de recirculación de la SOFC 20 es similar al complejo de recirculación de la SOFC 10, excepto porque el complejo de recirculación de la SOFC 20 emplea una unidad de refrigeración alimentada eléctricamente 22 para mejorar adicionalmente el enfriamiento de la corriente del gas de salida comprimido del ORC durante el ciclo de preexpansión.

El enfriamiento subambiental de la corriente del gas de salida comprimido del ORC permite ventajosamente la eliminación de parte del CO₂ del caudal, tanto en forma de un líquido 24 a una presión superior a la ambiental, como en forma de un producto sólido 26 que es condensado fuera de la fase líquida a una presión superior a la ambiental y por debajo de la temperatura de fusión. De acuerdo con un aspecto, el complejo de recirculación de la SOFC 20 emplea un aparato para recoger el CO₂ sólido a partir de la corriente de gas de salida enfriada corriente abajo del expansor 15, que solidifica a partir de la fase gaseosa directamente en el punto 2-1a representado en la Figura 1.

Después de su contacto con el intercambiador de calor 16, que aumenta su temperatura en parte hacia la apropiada temperatura de la reacción, la corriente de gas residual enfriada expandida vuelve a la entrada del ánodo 11 a través de un recuperador 19 con una mayor concentración molar de CO₂ y de combustible de H₂ de la que había inicialmente presente en el gas de salida del ánodo. De acuerdo con un aspecto, parte del flujo del agua eliminada del cátodo se calienta a la apropiada temperatura de la reacción a través del gas de salida del cátodo 12 y después se aplica bien a una unidad de reforma individual corriente arriba del ánodo 11 o bien al propio ánodo 11, para generar el vapor necesario para el reformado del combustible hidrocarbonado.

Las realizaciones 10, 20, representadas respectivamente en las Figuras 1 y 2, no están tan limitadas; y debería entenderse que el complejo de recirculación de la SOFC 10 y el complejo de recirculación de la SOFC 20 pueden ser implementados en ausencia de un proceso de compresión-expansión, simplemente a través de una unidad de refrigeración alimentada eléctricamente tal como la representada en la Figura 3. La Figura 3 es un diagrama simplificado que ilustra un complejo de recirculación de una pila de combustible de óxido sólido (SOFC) 30 de acuerdo con una realización. El enfriamiento subambiental de la corriente del gas de salida comprimido del ORC permite ventajosamente que parte del CO₂ sea eliminado del flujo, ya sea en forma de un líquido 24 a una presión superior a la ambiental, o en forma de un producto sólido 26 que es condensado fuera de la fase líquida a una presión superior a la ambiental y por debajo de la temperatura de fusión.

La Figura 4 es un diagrama simplificado que ilustra un complejo de recirculación de una pila de combustible de óxido sólido (SOFC) 40 de acuerdo con una realización. En esta realización, el combustible hidrocarbonado (CH₄) es reformado mediante un aparato de reformado 42 en CO y H₂ antes de entrar en el ánodo 11 de la SOFC. Posteriormente, el CO es convertido en CO₂ mediante un aparato de cambio de agua-gas 44 en el punto 3-1a representado en la Figura 4. Después, el CO₂ resultante es eliminado en forma sólida o líquida, bien mediante un proceso de compresión-expansión 50, tal como el representado en la Figura 5, o bien mediante una unidad de refrigeración alimentada eléctricamente 22, tal como la representada en la Figura 4, o mediante ambos. La fracción de H₂ residual pasa entonces al ánodo 11, Figura 4. De acuerdo con un aspecto, cualquier H₂ que quede en el gas de salida del ánodo puede ser reciclado de nuevo a la entrada del ánodo en el punto 3-1c representado en la Figura 4 después de pasar a través de un recuperador 19 lo suficiente como para aumentar su temperatura hasta la apropiada temperatura de la reacción. De acuerdo con una realización, puede instalarse un ciclo de Rankine 13 corriente abajo del gas de salida del ánodo en el punto 3-1d representado en la Figura 4, produciendo electricidad o energía de eje a partir del calor del gas de salida del ánodo.

La Figura 6 es un diagrama simplificado que ilustra un complejo de recirculación de una pila de combustible de óxido sólido (SOFC) 60 de acuerdo con una realización. El complejo de recirculación de la SOFC 60 funciona de una forma similar al descrito en el presente documento para el complejo de recirculación de la SOFC 10 o el complejo de recirculación de la SOFC 20, excepto porque el combustible (CH₄), después de ser reformado en el punto 4-1a representado en la Figura 6, puede ser introducido cascada abajo del ánodo en el punto 4-1b representado en la Figura 6 con objeto de prevenir la carbonización en el ánodo 11. De acuerdo con una realización, el reformado del combustible se consigue mediante el uso de un proceso/estructura tal como el representado en la Figura 4, para proporcionar una fracción de H₂ residual al ORC 13.

Como explicación de resumen, en el presente documento se han descrito sistemas y procedimientos para potenciar el rendimiento global de una pila de combustible de óxido sólido (SOFC) separando simultáneamente una corriente prácticamente pura de CO₂ para el secuestro o para su uso en la generación de energía eléctrica para aumentar adicionalmente la eficacia global del proceso. Los sistemas y los procedimientos aumentan ventajosamente la eficacia de la SOFC hasta más del 50 % con una captura simultánea de carbono. Las

realizaciones en particular que hacen uso de los principios del presente documento dan como resultado una pila de combustible de óxido sólido con una eficacia igual o superior al 60 %.

REIVINDICACIONES

1. Un complejo de recirculación de pilas de combustible (10; 20) que comprende:
una pila de combustible que comprende un ánodo (11) configurado para generar un gas de salida caliente, comprendiendo el ánodo una entrada y una salida;
- 5 un ciclo de recuperación del calor de desecho configurado para generar energía a partir del enfriamiento del ánodo caliente (11);
un compresor (14) configurado para comprimir el gas de salida generado a través del ciclo de recuperación del calor de desecho;
un expansor (15) configurado para expandir y enfriar el gas de salida comprimido;
- 10 un sistema intercambiador de calor (16) configurado para recibir al menos una porción del gas expandido y para preenfriar el gas de salida comprimido del ciclo de recuperación del calor de desecho antes de su enfriamiento a través del expansor (15), y configurado adicionalmente para eliminar mediante cambio de fase el agua (H₂O) y el dióxido de carbono (CO₂) del gas de salida que pasa a través del ciclo de recuperación del calor de desecho, y configurado adicionalmente para generar una corriente de combustible que es devuelta a la entrada del ánodo (11)
- 15 de la pila de combustible con una mayor concentración molar de monóxido de carbono (CO) y de combustible de hidrógeno (H₂) de la que había inicialmente presente en el gas de salida del ánodo (11) de la pila de combustible antes de entrar en el ciclo de recuperación del calor de desecho.
2. El complejo de recirculación de pilas de combustible de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la pila de combustible comprende una pila de combustible de óxido sólido.
- 20 3. El complejo de recirculación de pilas de combustible de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el ciclo de recuperación del calor de desecho comprende un ciclo de Rankine Orgánico (13).
4. El complejo de recirculación de pilas de combustible de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el sistema intercambiador de calor (16) y el expansor (15) están configurados conjuntamente para eliminar el CO₂ en forma sólida condensado a partir del gas expandido generado a través del expansor (15), en forma líquida condensado a partir de la corriente de combustible generada a través del sistema intercambiador de calor antes de devolver la corriente de combustible a la entrada de la pila de combustible, o ambos.
- 25 5. El complejo de recirculación de pilas de combustible de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende adicionalmente una unidad de refrigeración alimentada eléctricamente configurada para enfriar adicionalmente el gas de salida del ciclo de recuperación del calor de desecho que pasa a través del sistema intercambiador de calor
- 30 (16).
6. El complejo de recirculación de pilas de combustible de acuerdo con la reivindicación 5, en el que la unidad de refrigeración alimentada eléctricamente y el sistema intercambiador de calor (16) están configurados conjuntamente para eliminar el CO₂ en forma sólida condensado a partir de la corriente de combustible generada a través del sistema intercambiador de calor (16) antes de devolver la corriente de combustible a la entrada de la pila de combustible, en forma líquida condensado a partir de la corriente de combustible generada a través del sistema intercambiador de calor antes de devolver la corriente de combustible a la entrada de la pila de combustible, o ambos.
- 35 7. El complejo de recirculación de pilas de combustible de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la pila de combustible comprende adicionalmente un cátodo (12) configurado para generar una conducción de calor suplementaria del ciclo de recuperación del calor de desecho, de forma que la energía generada a través del ciclo de recuperación del calor de desecho sea mayor que la energía generada a través del ciclo de recuperación del calor de desecho en respuesta únicamente al enfriamiento del ánodo caliente (11).
- 40 8. El complejo de recirculación de pilas de combustible de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la pila de combustible, el ciclo de recuperación del calor de desecho, el compresor, el expansor y el sistema intercambiador de calor proporcionan conjuntamente una pila de combustible que funciona con una eficacia mayor de aproximadamente el 50 %.
- 45 9. El complejo de recirculación de pilas de combustible de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende adicionalmente:
un sistema de reformado del combustible hidrocarbonado configurado para generar monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂); y
- 50 un reactor de cambio de agua-gas para convertir el CO en dióxido de carbono (CO₂).

10. El complejo de recirculación de pilas de combustible de acuerdo con la reivindicación 9, que comprende adicionalmente una vía de reciclado del H₂ configurada para devolver una corriente de únicamente de combustible de H₂ a partir del ciclo de recuperación del calor de desecho evacuado a la entrada del ánodo (11) de la pila de combustible.

- 5 11. El complejo de recirculación de pilas de combustible de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, que comprende:
un sistema de reformado del combustible hidrocarbonado configurado para eliminar el carbono de un combustible hidrocarbonado y para introducir el combustible reformado en el complejo de recirculación de pilas de combustible corriente abajo de la salida del ánodo (11) de la pila de combustible.

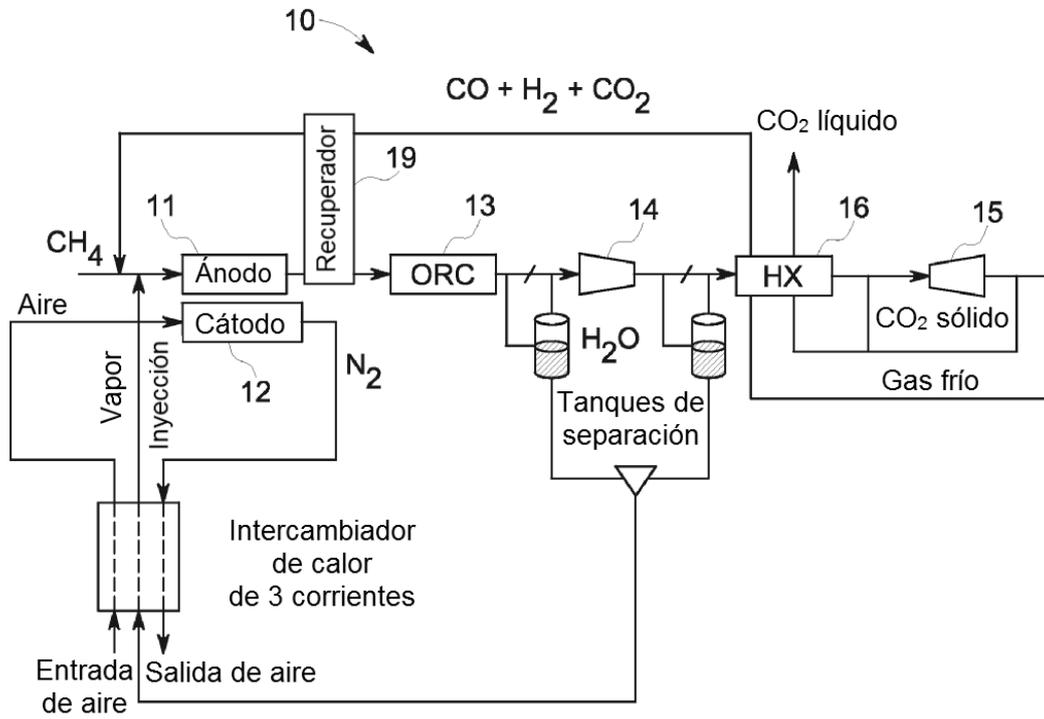


FIG. 1

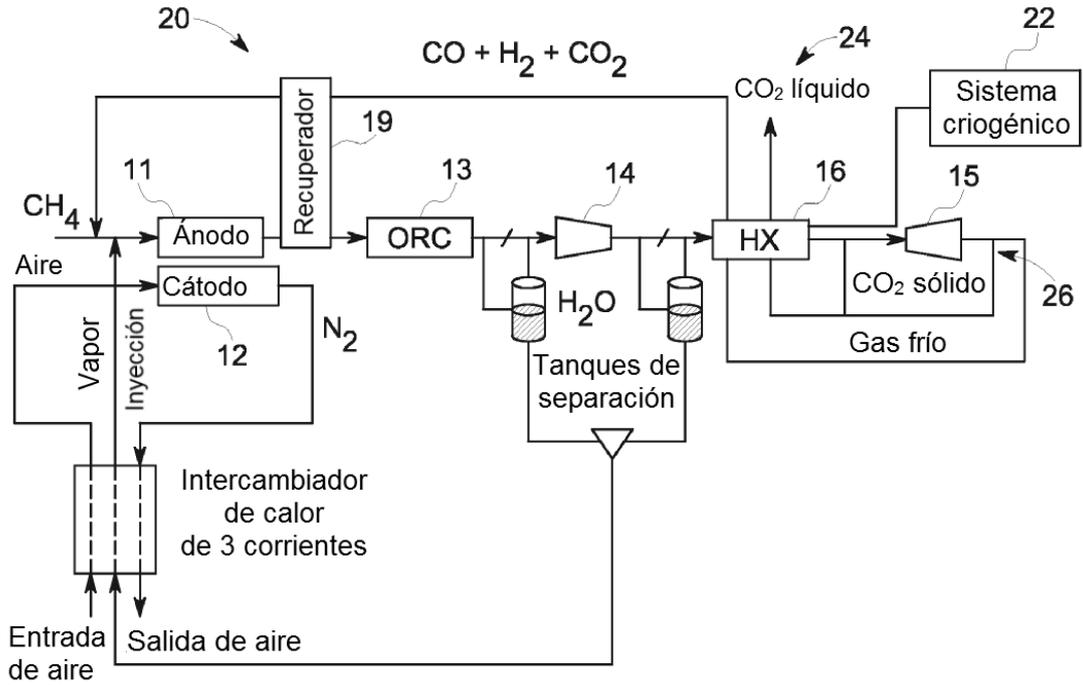


FIG. 2

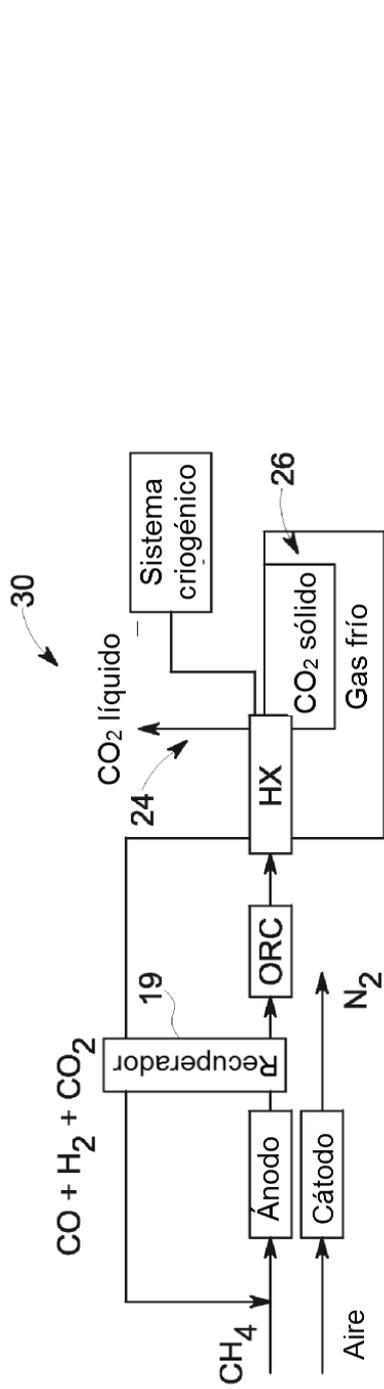


FIG. 3

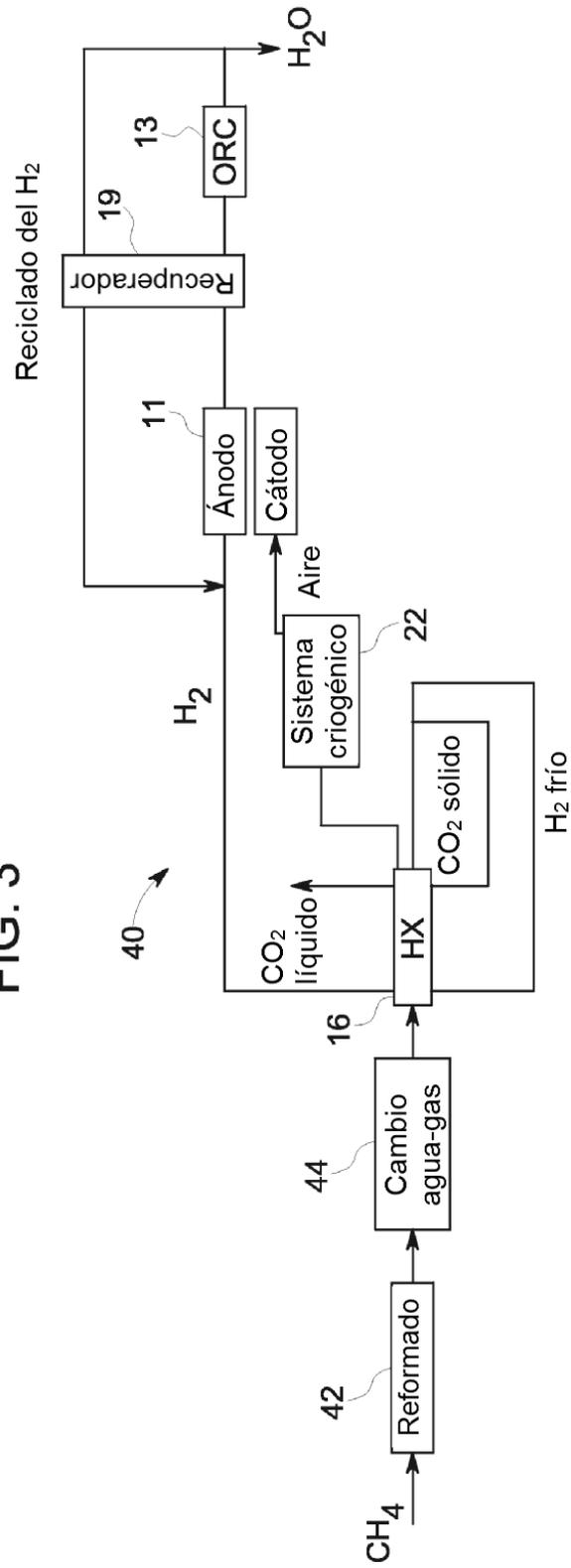


FIG. 4

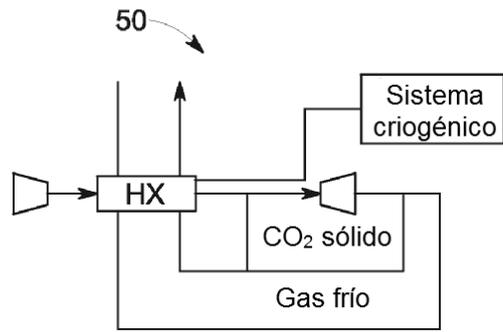


FIG. 5

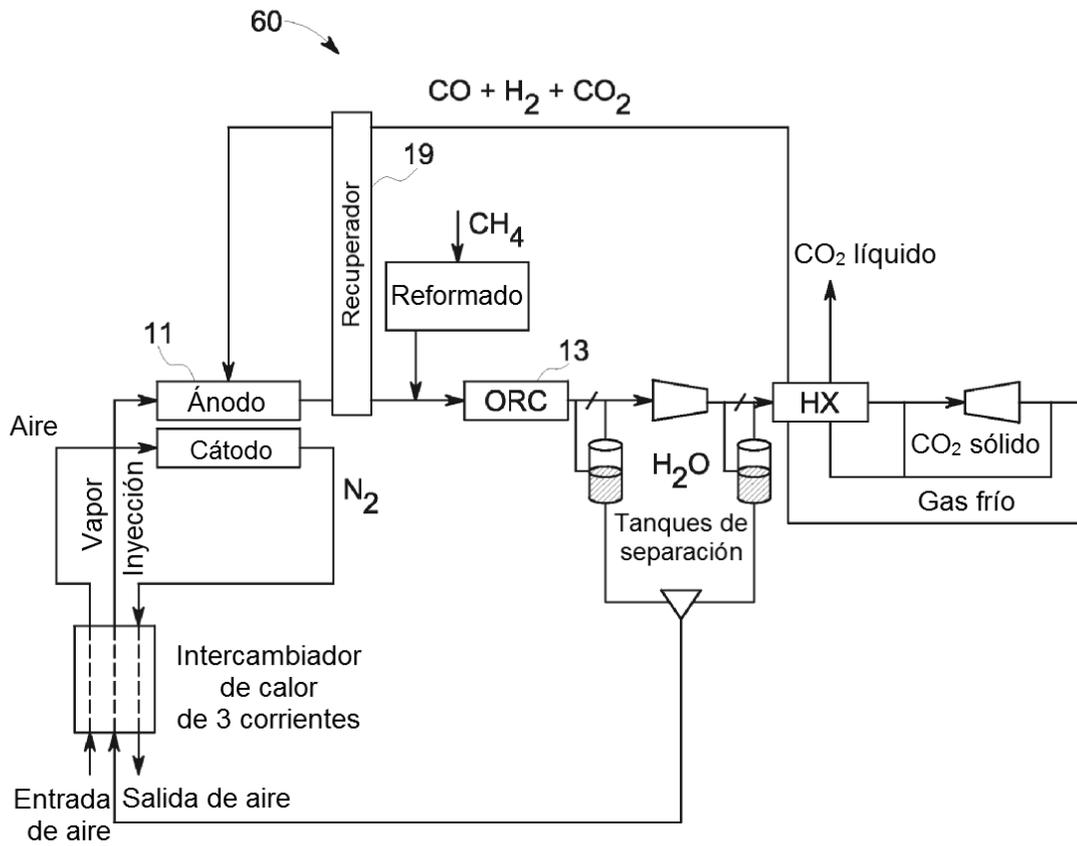


FIG. 6