

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 986 608**

51 Int. Cl.:

**F02C 1/08** (2006.01)

**F02C 3/34** (2006.01)

**H01M** (2006.01)

**H01M 8/0612** (2006.01)

**H01M 8/0668** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.11.2020 PCT/EP2020/081054**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.06.2021 WO21121762**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.11.2020 E 20799724 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.06.2024 EP 4077898**

54 Título: **Sistema de conversión de energía**

30 Prioridad:

**16.12.2019 IT 201900024162**

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

**12.11.2024**

73 Titular/es:

**ENI S.P.A. (100.0%)**

**Piazzale E. Mattei 1**

**00144 Roma, IT**

72 Inventor/es:

**MARTELLI, EMANUELE;**

**CAMPANARI, STEFANO;**

**GATTI, MANUELE y**

**SCACCABAROZZI, ROBERTO**

74 Agente/Representante:

**CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel**

ES 2 986 608 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 de conversión de energía

Antecedentes

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a un sistema de conversión de energía, que convierte combustibles gaseosos en electricidad.

Descripción de la técnica relacionada

10 El ciclo Allam es un ciclo de oxidación en el que una combinación de oxígeno puro y metano, gas natural o gas de síntesis se quema a alta presión utilizando una velocidad de flujo grande de CO<sub>2</sub> reciclado como moderador de temperatura. La presión de trabajo de la cámara de combustión es "supercrítica" y se utiliza un regenerador para precalentar la corriente reciclada. Se reporta que el ciclo Allam es capaz de lograr una eficiencia eléctrica neta del 55 - 60 % con una captura de CO<sub>2</sub> del 100 %. El ciclo opera con una temperatura de entrada de turbina de 1100 - 1300 °C (1373-1573 K) (que requiere enfriamiento de la pala y superaleaciones solidificadas direccionalmente) y una temperatura de entrada del regenerador de 650 - 750 °C (923-1023K) (que requiere aleaciones especiales, como materiales de aleación basada en Ni como Inconel 617).

20 El documento US 7709118 B2 divulga un ciclo híbrido regenerativo de celda de combustible de óxido sólido/turbina de gas (SOFC-GT) donde los gases de escape de turbina se alimentan al cátodo de SOFC. La celda de combustible se coloca corriente abajo de la turbina, operando a presión atmosférica. El ciclo de la turbina de gas utiliza aire como fluido de trabajo sin una Unidad de Separación de Aire (ASU) y no una mezcla rica en CO<sub>2</sub>. El sistema no separa y pone a disposición una corriente de CO<sub>2</sub> casi puro. El documento US 7306871 B2 divulga un ciclo híbrido que integra una turbina de gas regenerativa con una SOFC colocada corriente arriba de la cámara de combustión. Este sistema utiliza aire como fluido de trabajo sin una unidad de separación de aire y una unidad de oxidación. Las corrientes de reciclaje ricas en CO<sub>2</sub> no se utilizan como moderador de temperatura. Como resultado, este sistema no pone a disposición una corriente de CO<sub>2</sub> casi puro.

25 El documento US 9228494 B2 describe un ciclo Brayton híbrido invertido en SOFC que presenta una celda de combustible atmosférica y una cámara de combustión. El flujo de salida del ánodo SOFC, disponible a presión atmosférica, se utiliza en la cámara de combustión. El sistema presenta un menor grado de integración entre el ciclo termodinámico y la SOFC debido a que la corriente de salida de cátodo no se envía a la cámara de combustión como agente oxidante. La presión de trabajo del cátodo es atmosférica y la configuración de ciclo de Brayton es la "invertida" (con presión atmosférica en la cámara de combustión y presión subatmosférica en la salida de turbina) sin reciclaje de gas rico en CO<sub>2</sub> y regenerador.

30 Un sistema de conversión de energía adicional de acuerdo con el estado de la técnica se divulga en US 2007/163822 A1.

Sumario

35 Es el objeto de la presente invención proporcionar un sistema de conversión de energía, que convierte combustibles gaseosos (por ejemplo, pero no limitado a, gas natural, gas de síntesis, biogás, biometano, hidrocarburos ligeros, hidrógeno) o combustibles líquidos (por ejemplo, pero no limitado a, hidrocarburos ligeros, alcohol, metanol, DME), en electricidad con la posibilidad de capturar el CO<sub>2</sub> generado de una manera eficiente.

Este y otros objetos se logran por un sistema de conversión de energía de acuerdo con la reivindicación 1. Las reivindicaciones dependientes definen posibles realizaciones ventajosas de la invención.

40 La idea subyacente a la invención consta de proporcionar un sistema, que integra una unidad de celda de combustible de óxido sólido (SOFC) que trabaja en condiciones presurizadas hasta altas presiones (0,5 - 50 mPa (5 - 500 bar)) con un ciclo de oxidación semicerrado, que utiliza el calor y las corrientes de combustible y oxidante no convertidas descargadas por la celda de combustible. El ciclo de oxidación es un ciclo semicerrado de Brayton que presenta CO<sub>2</sub> como fluido de trabajo principal. Si la presión de trabajo de unidad de SOFC está por encima de la crítica, el ciclo de Brayton se convierte en un ciclo de CO<sub>2</sub> supercrítico. Aunque con menor eficiencia, el sistema también puede trabajar con presiones de ciclo máximas por debajo de la crítica de CO<sub>2</sub> (7,38 mPa (73,8 bar)). Por lo tanto, la corriente de CO<sub>2</sub> es el fluido de trabajo tanto del ciclo termodinámico como de la unidad de SOFC. Otra peculiaridad del sistema es el uso del O<sub>2</sub> no convertido descargado por la unidad de SOFC dentro de la cámara de combustión del ciclo semicerrado de Brayton.

45 El sistema se conoce como "Ciclo de CO<sub>2</sub> semicerrado de óxido sólido - SOSCO<sub>2</sub>".

Una ventaja del presente sistema es que la central tiene cero emisiones de contaminantes y gases de efecto invernadero, si se captura y almacena la corriente de CO<sub>2</sub> separada.

Además, el sistema declarado puede lograr eficiencias eléctricas netas (base LHV) más altas que las tecnologías convencionales (75 % en comparación con el 55 - 62 % de los ciclos combinados de gas natural y el 55 - 60 % del ciclo Allam) gracias a la integración optimizada con la unidad de SOFC.

El presente sistema tiene una flexibilidad operativa superior (es decir, variables operativas más independientes) en comparación a los ciclos de turbina de gas convencionales, puesto que probablemente permite lograr una mayor eficiencia de carga parcial y una menor relación de reducción mínima. Esta flexibilidad operativa es una característica muy importante para las centrales eléctricas actuales y futuras debido a la creciente penetración de las energías renovables intermitentes en la red eléctrica.

Además, el presente sistema proporciona una mayor eficiencia eléctrica neta (75 % versus 55 - 60 %) que no se puede lograr por el ciclo Allam y ciclos de oxi-turbina similares, incluso utilizando los materiales de turbina de gas más avanzados, tal como superaleaciones cristalinas individuales avanzadas.

Las condiciones de operación de la turbina son considerablemente menos graves y adecuadas para turbinas no enfriadas. Como comparación, en el ciclo Allam, la turbina tiene una temperatura de entrada de 1100 - 1250 °C (1373-1523K). El sistema reivindicado puede lograr una eficiencia casi óptima con temperaturas de entrada de turbina de 800 - 900 °C (1073-1173K), temperaturas adecuadas para unidades de expansión no enfriadas y materiales menos costosos (superaleaciones más convencionales, evitando la necesidad de palas de cristal individual y solidificadas direccionalmente), y una eficiencia ligeramente mayor (con un incremento de hasta el 1 %) con temperaturas de entrada de turbina de 1000 - 1100 °C (1273-1373K) con enfriamiento limitado. Se pueden lograr eficiencias muy altas, por encima del 70 %, incluso utilizando un expansor no enfriado que presenta una temperatura de entrada por debajo de 900 °C (1173K).

Otra ventaja son las temperaturas de operación menos graves del regenerador colocado a la salida de la turbina en comparación al ciclo Allam. En el sistema reivindicado, la temperatura óptima de salida de turbina está en el intervalo de 400 - 600 °C (673-873K), que también son aquí compatibles con materiales menos costosos (por ejemplo, acero de grado medio-alto, aceros inoxidables ferríticos o aceros inoxidables austeníticos convencionales). En el ciclo Allam, la turbina se descarga a temperaturas en el intervalo de 650 - 750 °C (923-1023K), lo que hace necesario utilizar aleaciones basadas en níquel muy caras (por ejemplo, Inconel 617).

Al mismo tiempo, la cámara de combustión opera con un trabajo térmico más bajo (la mayoría de la energía química del combustible se convierte en la celda de combustible) y temperaturas máximas más bajas, que corresponden a las condiciones de entrada de turbina, con respecto al ciclo Allam.

## Breve descripción de las figuras

A fin de comprender mejor la invención y apreciar las ventajas de la misma, se describirán algunas realizaciones no limitantes de ejemplo en lo siguiente con referencia a las figuras anexas, que ilustran un sistema de conversión de energía de acuerdo con posibles realizaciones de la invención.

La figura 1 es un diagrama de flujo de proceso del presente sistema de conversión de energía de acuerdo con una primera realización de la invención. El sistema de acuerdo con la primera realización comprende:

- Una unidad de SOFC A, que convierte parcialmente el combustible 1 y el oxidante 4 directamente en electricidad mediante reacciones electroquímicas;
- Una cámara de combustión B, que realiza la combustión del combustible no convertido 5 y el oxidante no convertido 6 descargados de la unidad de SOFC A con la inyección opcional de una corriente rica en CO<sub>2</sub> reciclada 9 y/o combustible adicional 7 y/u oxidante adicional 8;
- Un expansor C, expandiendo los gases de salida de cámara de combustión 10 para generar potencia mecánica.
- Un intercambiador de calor opcional D, que recupera el calor de los gases de combustión calientes 12 para precalentar la corriente de oxidante 24,26, la corriente de reciclaje utilizada como moderador de temperatura 25,9, el refrigerante de turbina opcional 11, y el agua/vapor opcional para la SOFC 2,3;
- Un enfriador E, que enfría los gases de escape 13 y transfiere el calor al entorno (por ejemplo, a una corriente de agua 27,28) tomada de un río, lago, mar o al aire) o a otro proceso/sistema;
- Un separador de recipiente de vaporización F, que separa las especies condensadas 15 (principalmente agua) de la corriente enfriada 14 de gases de escape ricos en CO<sub>2</sub>;
- Un divisor G, que divide la corriente que se va a extraer 17 de la que sale 16 del recipiente de vaporización F;
- Un tren de compresor opcional H, que comprende una o más unidades de compresor con interenfriadores opcionales para presurizar la corriente reciclada (18) a una presión adecuada para mezclarse con la corriente de oxígeno (21);
- Un divisor I, que separa la corriente de reciclaje 19 en el moderador de temperatura de la cámara de combustión 23

- y una corriente rica en CO<sub>2</sub> 20 para diluir el oxígeno 21;
- Un mezclador J, que produce la mezcla de oxidante 22;
- Un tren de compresores K, que comprende una o más unidades de compresores con interenfriadores opcionales para presurizar la corriente de oxidante 22,24 al nivel de presión requerido por la SOFC A y la cámara de combustión B;
- Un tren de compresor opcional L, que comprende una o más unidades de compresor con interenfriadores opcionales para presurizar la corriente de reciclaje 23,25 al nivel de presión requerido por la SOFC A y la cámara de combustión B;
- Un divisor M, que divide la corriente de oxidante 26 en dos flujos, el primero 4 utilizado en la unidad SOFC A y el segundo 8 (opcional) utilizado en la cámara de combustión B.

La figura 2 es una posible configuración de esquema para la unidad de SOFC del sistema de conversión de energía en la figura 1. El sistema comprende:

- Un tren de compresores N, que comprende una o más unidades de compresores con interenfriadores opcionales para presurizar el combustible 1 al nivel de presión requerido por la SOFC A y la cámara de combustión B;
- Un mezclador opcional O, que se puede utilizar también como un eyector para comprimir una corriente opcional reciclada de la salida de ánodo 40 y/o para mezclar el combustible 29 con un flujo de vapor 3 para obtener una composición química adecuada de la corriente 30 que se va a alimentar en el lado de ánodo de la unidad de SOFC S;
- Un calentador opcional P, que recupera calor de las corrientes de salida de SOFC S y/o de las corrientes de proceso calientes para calentar la mezcla de ánodos 30 al nivel de temperatura requerido por la SOFC S o por el pre-reformador R opcional;
- Un calentador opcional Q, que recupera calor de las corrientes de salida de SOFC S y/o de otro proceso/sistema para calentar la mezcla de cátodo 4 al nivel de temperatura requerido por la SOFC S;
- Un pre-reformador externo opcional R, que puede recuperar calor directamente de la reacción electroquímica que se presenta dentro de la unidad de SOFC S y/o de otro proceso/sistema, convirtiendo la mezcla de ánodo 31 para obtener una composición química adecuada para operar la unidad de SOFC S;
- Una unidad de SOFC S, que convierte la energía química de la mezcla de ánodo 32 en corriente eléctrica continua utilizando el oxígeno proporcionado por la mezcla de cátodo 33;
- Un enfriador opcional T, que transfiere calor de la corriente en la salida de ánodo 34 a otro proceso/sistema y/o al ambiente y obtiene una corriente 36 a la temperatura requerida por la cámara de combustión;
- Un enfriador opcional U, que transfiere calor de la corriente en la salida del cátodo 35 a otro proceso/sistema y/o al medio ambiente (por ejemplo, agua de enfriamiento) y que obtiene una corriente 6 a la temperatura requerida por la cámara de combustión;
- Un divisor opcional V, que divide el combustible no convertido 36 en una corriente que se va a alimentar a la cámara de combustión 5 y un flujo reciclado 37 que se va a mezclar con el combustible 29;
- Un enfriador opcional W, que transfiere calor del combustible no convertido reciclado (opcional) 37 a otro proceso/sistema y/o al entorno y que obtiene una corriente 38 a la temperatura requerida por el tren de compresores X;
- Un tren de compresores opcional X, presurizando el combustible no convertido reciclado 38 para superar las caídas de presión a través del lado de ánodo;
- Un calentador opcional Y, que recupera calor de las corrientes calientes que salen de la unidad de SOFC S y/o el enfriador opcional W y/o de otro proceso/sistema para precalentar el combustible no convertido reciclado 39;

La figura 3 es un diagrama de flujo de proceso del sistema de conversión de energía reivindicado de acuerdo con una segunda realización de la invención. El sistema comprende:

- Una unidad de SOFC Z, que convierte parcialmente el combustible 41 y el oxidante 44 directamente en electricidad mediante reacciones electroquímicas;
- Una cámara de combustión AA, que realiza la combustión del combustible no convertido 45 y el oxidante no convertido 46 descargados de la unidad de SOFC Z con la inyección opcional de una corriente rica en CO<sub>2</sub> reciclada 49 y/o combustible adicional 47 y/u oxidante adicional 48;
- Un expansor AB, que expande los gases de salida de la cámara de combustión 50 para generar energía mecánica (se pueden requerir flujos de enfriamiento 51 dependiendo de la temperatura de entrada de turbina);
- Un divisor AC, que divide los gases expandidos 53 en dos corrientes, la primera 53 usada para mezclarse con una corriente de oxígeno 54 y la segunda 63 para usarse como moderador de temperatura en la segunda cámara de combustión AG;
- Un mezclador AD, que produce la mezcla de oxidante 55;
- Un divisor AE, que divide la corriente de oxidante 55 en dos flujos, el primero 56 utilizado en la segunda unidad de SOFC AF y el segundo 62 (opcional) utilizado en la segunda cámara de combustión AG;
- Una segunda unidad de SOFC opcional AF, que convierte el combustible 58 y el oxidante 56 directamente en electricidad a través de reacciones;
- Una segunda cámara de combustión AG, que realiza la combustión del combustible no convertido 60 y el oxidante no convertido 69 descargados de la unidad de SOFC AF con la inyección de la primera corriente de escape de turbina

AB 63 y/o combustible adicional 61 y/u oxidante adicional 62;

- Un segundo expansor AH, que expande los gases de salida de la cámara de combustión 64 para generar energía mecánica (se pueden requerir flujos de enfriamiento 65 dependiendo de la temperatura de entrada de turbina);
- 5 - Un intercambiador de calor opcional AI, que recupera el calor de los gases de combustión calientes 66 para precalentar la corriente de oxidante 78,80, la corriente de reciclaje utilizada como moderador de temperatura 79,49, agua/vapor opcional para las SOFC 42,41 y refrigerante de turbina opcional 51,65;
- Un enfriador AJ, que enfría los gases de escape 68 y transfiere el calor al entorno (por ejemplo, a una corriente de agua 81,82 tomada de un río, lago, mar o aire) o a otro proceso/sistema;
- 10 - Un separador de recipiente de vaporización AK, que separa las especies condensadas 69 (principalmente agua) de la corriente enfriada 68 de gases de escape ricos en CO<sub>2</sub>;
- Un divisor AL, que divide la corriente que se va a extraer 71 de la que sale 70 del recipiente de vaporización AK;
- Un tren de compresores opcional AM, que comprende una o más unidades de compresores con interenfriadores opcionales para presurizar la corriente reciclada 72 a una presión adecuada para mezclarse con la corriente de oxígeno 75;
- 15 - Un divisor AN, que separa la corriente de reciclaje 73 en el moderador de temperatura de la cámara de combustión 77 y una corriente rica en CO<sub>2</sub> 74 para diluir el oxígeno 75;
- Un mezclador AO, que produce la mezcla de oxidante 76;
- Un tren de compresores AP, que comprende una o más unidades de compresores con interenfriadores opcionales para presurizar la corriente de oxidante 76,78 al nivel de presión requerido por la SOFC Z y la cámara de combustión
- 20 AA;
- Un tren de compresores AQ, que comprende una o más unidades de compresores con interenfriadores opcionales para presurizar la corriente de reciclaje 77,79 al nivel de presión requerido por la SOFC Z y la cámara de combustión AA;
- Un divisor AR, que divide la corriente de oxidante 80 en dos flujos, el primero 44 utilizado en la unidad de SOFC Z y el segundo 48 (opcional) utilizado en la cámara de combustión AA;
- 25 - Un divisor AS, que divide el agua/vapor opcional 41 en dos flujos, el primero 43 utilizado en la unidad de SOFC Z y el segundo 57 utilizado en la segunda unidad de SOFC AF.

#### Descripción detallada

30 Con el propósito de la presente descripción y de las reivindicaciones anexas, salvo que se indique lo contrario, todos los números que expresan cantidades, porcentajes, y así sucesivamente, se van a entender como que se modifican en todos los casos por el término "aproximadamente". Además, todos los intervalos incluyen cualquier combinación de los puntos máximos y mínimos descritos e incluyen cualquier intervalo intermedio en los mismos, que pueden o pueden no enumerarse específicamente en la presente.

35 La presente divulgación, en al menos uno de los aspectos mencionados anteriormente, se puede implementar de acuerdo con una o más de las siguientes realizaciones, opcionalmente combinadas entre sí.

Con el propósito de la presente descripción y de las reivindicaciones anexas, las palabras "uno" o "una" deben leerse para incluir uno o al menos uno y el singular también incluye el plural a menos que sea obvio que significa lo contrario. Esto se hace meramente por conveniencia y para dar un sentido general de la divulgación.

40 Las figuras 1-3 muestran realizaciones de un sistema de conversión de energía y partes de este de acuerdo con la invención. El sistema de conversión de energía de acuerdo con la invención comprende:

- 1) Una unidad de celda de combustible de óxido sólido (SOFC) A que tiene un lado de ánodo y un lado de cátodo, que recibe un combustible 1 y un vapor de oxidante 4 para convertir una fracción de la potencia química del combustible 1 directamente en energía eléctrica a través de una pluralidad de reacciones electroquímicas que se presentan en el
- 45 ánodo y el lado de cátodo de la unidad de SOFC A. Las partes del combustible y del oxidante permanecen sin convertir, es decir, no se convierten directamente en energía eléctrica por la SOFC;
- 2) Una unidad de combustión B para convertir el combustible no convertido 5 y el oxidante no convertido 6 en gas de producto 10, esta unidad de combustión B que se arregla para recibir el combustible no convertido 5 y el oxidante no convertido 6 de la unidad de SOFC A;
- 50 3) Una unidad de expansor C para expandir el gas que sale de la cámara de combustión B, esta unidad de expansor C que se arregla para recibir el gas de producto 10 de la cámara de combustión B;
- 4) Una unidad de enfriador E para reducir la temperatura del gas de combustión 12 que sale de la unidad de expansión C a una temperatura cercana a la de un dissipador de calor 27 (tal como un lago, río, mar, aire, corrientes frías de otras plantas). La corriente de salida 14, que es rica en CO<sub>2</sub>, contiene especies condensadas;
- 55 5) Una unidad de recipiente de vaporización F para remover las especies condensadas 15 de la corriente rica en CO<sub>2</sub> 14; y
- 6) Una primera unidad de compresión K para incrementar la presión del oxidante 22 al valor requerido por la unidad de SOFC A y la unidad de combustión B.

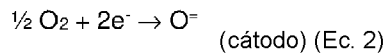
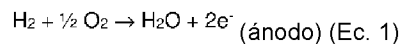
60 En una primera realización (figura 1), el sistema de conversión de energía comprende una celda de combustible de óxido

## ES 2 986 608 T3

sólido (SOFC) A de alta presión con un ciclo de oxidación Brayton semicerrado que utiliza CO<sub>2</sub> como moderador de la temperatura de combustión. La presión de ciclo máxima y la presión de operación de la unidad de SOFC A están preferentemente por encima de la presión crítica de CO<sub>2</sub> (es decir, > 7,39 mPa (73,9 bar)). En las condiciones mencionadas anteriormente, el ciclo de Brayton semicerrado es un ciclo de CO<sub>2</sub> supercrítico con ventajas en términos de eficiencia.

5 El sistema de conversión de energía puede utilizar un combustible gaseoso o líquido 1. El combustible se presurizará, opcionalmente se precalentará, entonces se alimenta al ánodo de la unidad de SOFC A en tanto que la mezcla de oxidante que contiene CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> 4, precalentada en un intercambiador de calor regenerativo D, se alimenta al lado de cátodo de SOFC.

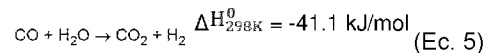
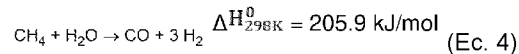
10 La unidad de SOFC A convierte una fracción de la potencia química (por ejemplo, en el intervalo 30 - 90 %, ajustable dependiendo del rendimiento deseado) del combustible directamente en potencia eléctrica a través de las reacciones electroquímicas que se presentan en los lados de ánodo y cátodo y que implican la oxidación de hidrógeno:



con la adición, aunque con una cinética más lenta, de la oxidación de monóxido de carbono:



La unidad de SOFC A se puede diseñar para funcionar con o sin reformado interno (por ejemplo, adoptando catalizadores específicos, tal como materiales basados en Ni utilizados habitualmente para SOFC disponibles comercialmente), dependiendo del tipo de combustible que se va a utilizar; en el caso de la alimentación de gas natural, el metano se convierte en hidrógeno dentro de la celda de acuerdo con las reacciones de reformado de vapor y desplazamiento de gas de agua:

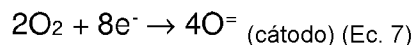
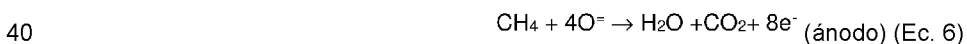


25 La reacción de reformado, que es altamente endotérmica, se produce aprovechando el calor disponible de las pérdidas de celda (convirtiendo de esta manera el calor en energía química, con una ventaja para la eficiencia eléctrica de sistema) y se impulsa por el consumo de hidrógeno permitido por las reacciones electroquímicas (Ec. 1, 2).

El vapor requerido para el reformado de hidrocarburos se puede suministrar directamente a la corriente 3 y/o a través del reciclaje de una fracción de la corriente que sale del ánodo 40. En el último caso, ya sea un eyector (O) o un ventilador X capaz de soportar altas temperaturas de gas puede proporcionar la carga de presión requerida para sostener el reciclaje de corriente.

30 Por lo tanto, el combustible comprimido que ingresa a la central eléctrica se puede mezclar con parte de la corriente reciclada de la salida de ánodo 40 y/o con vapor 3 (que se puede generar en el intercambiador de calor D). Entonces, la corriente que ingresa al lado de ánodo se puede precalentar dentro de la unidad de SOFC A a la temperatura de operación final (por ejemplo, 700 - 850 °C) usando la potencia térmica hecha disponible por el proceso electroquímico, a través de ya sea un intercambiador de calor dedicado P (por ejemplo, enfriando las corrientes de producto) o internamente en la pila de celdas de combustible.

35 Alternativamente, y siguiendo las tendencias recientes de I + D para nuevos tipos de unidades de SOFC de temperatura intermedia y baja (por ejemplo, de 600 a 800 °C, es decir, de 873 a 1073 K), la SOFC se puede diseñar para funcionar directamente con gas natural (u otra mezcla de hidrocarburos de fracción de alto metano), desarrollando internamente reacciones de oxidación directa:



## ES 2 986 608 T3

En este caso, la unidad SOFC se puede alimentar directamente con metano sin necesidad de una mezcla preliminar con vapor o escape de ánodo reciclado.

5 El combustible no convertido y el oxígeno que salen de la unidad de SOFC A se envían a la unidad de combustión B del ciclo semicerrado. Opcionalmente, para moderar la temperatura de flama, es posible reciclar una fracción de los productos de combustión (corriente 23).

10 Viceversa, opcionalmente, para incrementar la temperatura de flama y/o la temperatura de salida de la unidad de cámara de combustión B, es posible inyectar combustible y/u oxidante directamente en la cámara de combustión B combustible adicional 7 y oxidante 8. Para incrementar la eficiencia del sistema propuesto, como una opción adicional, es posible precalentar el oxidante 26, el moderador de temperatura 9 y las otras corrientes del sistema (por ejemplo, los flujos de enfriamiento de la turbina 11, si se requieren) en un regenerador de múltiples flujos D. Opcionalmente, si la concentración de combustible y/u oxígeno es demasiado baja, también se puede usar una unidad de combustión catalítica B.

Los productos de combustión 10 son principalmente CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, y pueden contener también algunas cantidades de O<sub>2</sub>, Ar, N<sub>2</sub> y otras especies químicas.

15 Los gases producto se expanden en un expansor C a una presión más baja, indicativamente en el intervalo de 0,1 – 5 mPa (1 - 50 bar). Sin embargo, este valor depende de las otras presiones y temperaturas del ciclo, y puede no limitarse a este intervalo. Dependiendo del factor de utilización de combustible (fracción del combustible de entrada oxidado electroquímicamente dentro de la celda de combustible) de la unidad de SOFC A, su temperatura operativa y la velocidad de flujo de masa de la corriente utilizada como moderador de temperatura en la unidad de combustión B, la temperatura de entrada de la turbina puede ser mayor o menor, lo que requiere adoptar un expansor C enfriado o no enfriado.

20 Si la unidad de expansión C necesita enfriarse (debido a que la temperatura de entrada de gas está por encima de la temperatura de funcionamiento máxima permitida de los materiales de la turbina), los flujos de enfriamiento 11 se pueden tomar de la corriente de CO<sub>2</sub> reciclado y pueden precalentarse en el regenerador D. Los gases de producto 10 que salen de la turbina se enfrían en el regenerador D y entonces en un enfriador E a una temperatura cercana a la del disipador de calor (por ejemplo, lago, río, mar, aire, corrientes frías de otras plantas). La mayor parte del H<sub>2</sub>O de los gases de producto se condensa, y se separa con un separador de gas-líquido F, tal como un recipiente de vaporización. La corriente de gas de salida que sale del separador 16 es rica en CO<sub>2</sub>. Una fracción se puede reciclar 18 para usarse como moderador de temperatura y/o mezclarse con la corriente de oxígeno 21 y/o usarse como flujo de enfriamiento de turbina 11, en tanto que la parte restante 17 se puede separar y ya sea ventilarse a la atmósfera o enviarse al sistema de purificación y utilización/almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Cuando se comprime la corriente rica en CO<sub>2</sub> de reciclaje por encima de la presión crítica, si el agua se condensa, es posible usar un proceso de separación líquido-líquido para remover agua adicional.

Dependiendo de las especificaciones del destino final del CO<sub>2</sub> (por ejemplo, un pozo de inyección para la recuperación mejorada de petróleo o cualquier otra opción de almacenamiento o utilización), podría ser necesario tratar la corriente de CO<sub>2</sub> separada en una unidad de purificación de CO<sub>2</sub> (una planta convencional capaz de producir CO<sub>2</sub> líquido casi puro).

35 También es posible recuperar calor en el regenerador D del compresor principal de la Unidad de Separación de Aire (ASU) y/o los interenfriadores de los compresores H,K,L y/o de fuentes de calor cercanas. Esto puede dar por resultado una mejora adicional de la eficiencia del sistema de conversión de energía propuesto.

Para los sistemas que utilizan gas natural y O<sub>2</sub> de 99,5 % de pureza producidos por una unidad de separación de aire criogénica disponible comercialmente, el mejor rendimiento del sistema se logra adoptando los parámetros de operación reportados en la tabla 1.

40 Tabla 1 - intervalos indicativos de presiones y temperaturas de operación para las corrientes clave.

Tipo de parámetro	Intervalo de operación
Presión de trabajo de las unidades de SOFC (A) y de la cámara de combustión (B)	0,5 - 50 mPa (5 - 500 bar)
Presión de salida de expansor (C)	0,1 – 5 mPa (1 - 50 bar)
Temperatura de trabajo de la unidad de SOFC (A)	600 - 1000 °C
Temperatura de entrada de expansor (C)	800 - 1500 °C
Temperatura del moderador de temperatura (9) y la corriente de oxígeno (26) que sale del regenerador (D)	400 - 800 °C

Vale la pena observar que el sistema es capaz de trabajar con buenas eficiencias también si las condiciones de operación están fuera de los intervalos especificados anteriormente, incluso si las presiones de la unidad de SOFC A y la unidad de combustión B están por debajo de la presión crítica de CO<sub>2</sub>.

45 En otra realización de ejemplo, también es posible usar un segundo paso de oxidación después de la expansión (configuración de recalentamiento), adicionando una segunda unidad de SOFC AF y/o una segunda unidad de combustión

AG que alimenta opcionalmente combustible adicional 61 y oxidante 62. Entonces, el fluido de trabajo se puede expandir aún más en un segundo expansor AH antes de ingresar al regenerador AI (ver figura 3). Este esquema puede incrementar además la producción de energía de la central y conducir a un menor costo de inversión específico (costo de central total/potencia eléctrica neta), especialmente para diseños con una SOFC, dos cámaras de combustión y dos expansores.

5 Esta segunda realización también podría presentar un intervalo operativo más amplio debido a la posibilidad de ajustar la velocidad de flujo de combustible alimentado a las diferentes SOFC y/o cámaras de combustión.

Simulación y optimización de una posible realización del sistema de conversión de energía.

El ciclo mostrado en la figura 1 se ha modelado usando un software de simulación de procesos y su eficiencia se ha optimizado usando un algoritmo de optimización sistemática.

10 Los supuestos en la base de la simulación de proceso se reportan a continuación:

- No se utiliza ningún oxidante adicional ni combustible adicional en la cámara de combustión (es decir, las corrientes 8 y 7 tienen una velocidad de flujo de masa de cero).
- El regenerador H se utiliza para precalentar las corrientes del moderador de temperatura 9, los flujos de enfriamiento 11, el oxidante 26 y para evaporar el agua y sobrecalentar el vapor 3.
- 15 - El combustible es un gas natural con composición reportada en la tabla 2:

Tabla 2 - Composición del combustible considerado en el ejemplo de simulación

Tipo de molécula	Composición, base molar
CH <sub>4</sub>	89,00 %
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	7,00%
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,00%
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,05%
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,05%
i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,005%
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,005%
CO <sub>2</sub>	2,00 %
N <sub>2</sub>	0,89 %

- El oxígeno se proporciona a 12 mPa (120 bar) y 15 °C (288K), por lo que el compresor H presuriza la corriente de 19 a 20 12 mPa (120 bar).
- La corriente 2 es agua líquida a 15 °C (288K), 0,1013 mPa (1,013 bar).
- Se utiliza una corriente de oxígeno que corresponde al 3% de exceso con respecto a la condición estequiométrica (considerando el oxígeno ya disponible en el fluido de trabajo) para producir la corriente de oxidante.
- La ecuación de estado GERG-2008 se utiliza para estimar las propiedades termodinámicas de las corrientes (con respecto a esto, ver: O. Kunz, and W. Wagner, "The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gas and other mixes: An expansion of GERG-2004", Journal of Chemical and Engineering Data, vol. 57(11), pp. 3032-3091, 2012, doi: 10.1021/jc300655b).
- 25 - La eficiencia de la turbina y el requisito de flujo de enfriamiento se calculan de acuerdo con el modelo presentado en R. Scaccabarozzi, M. Gatti y E. Martelli, "Thermodynamic analysis and numerical optimization of the NET Power oxy-combustion cycle", Applied Energy, vol. 178, pp. 505-526, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.06.060, con eficiencia isentrópica de los pasos de expansión de 89% y temperatura máxima de metal permitida por los materiales de álabe de 860°C.
- 30 - Se asumen eficiencias isentrópicas del 90 % y 85 % respectivamente para las etapas de vapor y compresor supercrítico.
- Se considera una caída de presión relativa del 5% (con respecto a la presión de entrada) para la corriente que sale de la turbina. El valor se reduce progresivamente en la compresión interenfriada a fin de alcanzar un valor del 1 % en el lado frío del regenerador.
- 35 - Se utilizan dos enfoques de temperatura mínima en el regenerador: Se asumen 5 °C (278K) en el lado frío para maximizar la recuperación de calor, se utilizan 20 °C (293K) en el extremo caliente para limitar el área de transferencia de calor requerida a altas temperaturas.
- 40 - Se asume una temperatura del agua de refrigeración de 15 °C (288K).
- Se asume una temperatura de aproximación mínima de 11 °C (284K) para los enfriadores (intercambio de calor con agua de enfriamiento), lo que lleva a una temperatura mínima del fluido de trabajo en el condensador y los interenfriadores de 26 °C (299K).

45 Con respecto a la unidad de SOFC, los supuestos son los siguientes:

## ES 2 986 608 T3

- No se utilizan los calentadores opcionales P, Q, Y y los enfriadores T, U, W.
- La corriente de reciclaje 37 se utiliza para reciclar una fracción del flujo de salida de ánodo (que contiene agua útil y especies de combustible no convertidas) a la entrada de ánodo.
- Se utiliza un compresor de reciclaje X con eficiencia isentrópica 0,7.
- 5 - La unidad de SOFC presurizada opera con una relación entre los átomos de carbono y oxígeno igual a 2,5, elegida para evitar la coquización en el electrodo de ánodo.
- Se ha asumido un valor máximo de potencia por unidad de área de 0,5 W/cm<sup>2</sup> (correspondiente a una corriente específica de alrededor de 0,6 A/cm<sup>2</sup>) para evitar riesgos de tensiones térmicas excesivas.
- 10 - Se asume que la Resistencia Específica de Área (ASR) de la unidad de SOFC es de 0,28 Q/cm<sup>2</sup>, que comprende todas las pérdidas que afectan la pila de celdas de combustible (por ejemplo, activación, óhmica, concentración), en tanto que se asume que el alternador que convierte la corriente continua a corriente alterna se caracteriza por una eficiencia del 98%.
- 15 - Para evitar pérdidas de concentración que reducirían la eficiencia de conversión, se considera un factor de utilización máximo (fracción del combustible alimentado oxidado dentro de la unidad de SOFC, este valor es diferente del referido a la pila de celdas de combustible si el reciclaje en el lado del ánodo no es nulo) de 85% y una concentración mínima de oxígeno en la salida del cátodo de 10% en mol.
- La caída de presión relativa a través de la unidad SOFC se fija en 0,5%.

Bajo el supuesto mencionado anteriormente, el sistema propuesto aún se puede diseñar y operar en una gran variedad de condiciones debido a la posibilidad de variar (i) la unidad de SOFC A y la presión operativa de la cámara de combustión B, (ii) la presión de salida del expansor C, (iii) la fracción del combustible no convertido 40 reciclado de regreso a la entrada del ánodo, (iv) la velocidad de flujo de masa del moderador de temperatura 9 de la cámara de combustión, (v) la temperatura de salida del regenerador del oxidante 26, el moderador de temperatura 9 y el vapor 3, (vi) la temperatura de salida del regenerador de los flujos de enfriamiento del expansor 11, y (vii) la fracción de la corriente reciclada 20 mezclada con el oxígeno para producir el flujo de oxidante. Para determinar las condiciones de diseño y operación más eficientes, las variables independientes listadas anteriormente se han optimizado utilizando un enfoque sistemático de optimización de procesos.

La función objetivo que se va a maximizar es la eficiencia eléctrica neta (la potencia eléctrica neta del sistema integrado dividió la potencia química del combustible de entrada, base de LHV). Las restricciones de optimización consideradas en este ejemplo se resumen en la tabla 3:

30 Tabla 3 - Restricciones técnicas consideradas en el ejemplo de optimización.

Parámetro	Valor	Unidad
Concentración de oxígeno en la salida de cátodo de SOFC (35) % mol (mínimo)	10	% en mol
Concentración de agua en la salida de ánodo de SOFC (34) (máximo)	60	% en mol
Diferencia de temperatura dentro del regenerador (D) (mínimo)	5	°C
Diferencia de temperatura en el extremo caliente del regenerador (D) (mínimo)	20	°C
Temperatura del metal permitida por expansor (C) (máxima)	860	°C
C/O en la entrada de ánodo de SOFC (A)	2,5	-

En la optimización se asume que el oxidante, el moderador de temperatura y el vapor para la unidad de SOFC salen del regenerador a la misma temperatura. Además, se asume que el oxidante proporciona 3 % de exceso de oxígeno en comparación a la condición estequiométrica.

35 El problema de optimización se ha abordado utilizando un algoritmo de optimización desarrollado específicamente con propósitos de optimización de procesos y sistemas de energía.

Los resultados de optimización se reportan en la tabla 4:

Tabla 4 - Resultados clave del ejemplo de optimización y simulación.

Parámetro	Valor	Unidad
velocidad de flujo de gas natural	10,75	kg/s
Gas natural LHV	46,49	MJ/kg
Velocidad de flujo de masa de oxígeno	40,37	kg/s
Velocidad de flujo de masa de reciclaje total	148,2	kg/s
Velocidad de flujo de masa de entrada de turbina	187,7	kg/s
Presión de operación de SOFC	35,27 mPa (352,7 bar)	bar
Temperatura de operación de SOFC	800,0	°C
Presión de entrada de turbina	34,92 mPa (349,2 bar)	bar
Temperatura de entrada de turbina	1025,9	°C
Presión de salida de turbina	1,45 mPa (14,5 bar)	bar

## ES 2 986 608 T3

Temperatura de salida de turbina	521,0	°C
Temperatura de la corriente de reciclaje en la entrada de SOFC	501,0	°C
Salida de energía eléctrica de SOFC	340	
	640	kW
Potencia de salida de álabe de turbina	128	
	193	kW
Consumo de energía de álabe de compresor	25	
	597	kW
Consumo de potencia de unidad de separación de aire	56	
	148	kW
Salida de potencia neta	377	
	050	kW
Entrada térmica de combustible (base de LHV)	500,0	MW
<u>Eficiencia eléctrica neta</u>	<u>75,41</u>	<u>%</u>

La SOFC produce el 72,7 % de la salida de potencia bruta de la central, en tanto que la turbina representa el 27,3 % restante. La compresión interenfriada y la ASU son las dos penalizaciones principales, que consumen el 5,5 % y el 12,0 % de la salida de potencia bruta, respectivamente.

- 5 La compresión del CO<sub>2</sub> capturado, enviado al almacenamiento, representa sólo el 0,8 % por ciento y los auxiliares restantes el 0,9 % de la producción bruta.

La eficiencia eléctrica neta resultante es de 76,2% sin captura de CO<sub>2</sub> (es decir, ventilando el exceso de CO<sub>2</sub> no reciclado), y 75,4% con captura de CO<sub>2</sub>.

- 10 Los índices de rendimiento resultantes son sobresalientes en comparación a los sistemas de energía de última generación y avanzados (con y sin captura de CO<sub>2</sub>) que presentan eficiencias en el intervalo de 60 a 63 % para los sistemas sin captura, y de 40 a 46 % para los sistemas con captura.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de conversión de energía que comprende:
  - una unidad de celda de combustible de óxido sólido (SOFC) (A) que tiene un lado de ánodo y de cátodo, configurada para recibir un combustible (1) y una corriente de oxidante (4) y para convertir una fracción de la potencia química del combustible (1) directamente en potencia eléctrica a través de una o más reacciones electroquímicas que se presentan en el lado de ánodo y cátodo de la unidad de SOFC (A) que implica este combustible (1) y este oxidante (4), partes del combustible (1) y de la corriente de oxidante (4) que se mantienen sin convertir después de estas reacciones electroquímicas;
  - una unidad de combustión (B) arreglada para recibir el combustible no convertido (5) y el oxidante no convertido (6) de la unidad de SOFC (A), configurada para la combustión del combustible no convertido (5) usando el oxidante no convertido (6), convirtiendo de esta manera el combustible no convertido (5) y el oxidante no convertido (6) en gas de producto (10);
  - una unidad de expansión (C) arreglada para recibir el gas de producto (10) que sale de la cámara de combustión (B) y configurada para expandir este gas de producto (10) que sale de la cámara de combustión (B) en gas de combustión (12);
  - una unidad de enfriador (E) en relación térmica con un disipador de calor (27) y configurada para enfriar este gas de combustión (12) que sale de la unidad de expansor (C);
  - un separador (F) para remover las especies condensadas (15) del gas enfriado (14) que sale de la unidad de enfriador (E), obteniendo de esta manera una corriente reciclada (18);
  - un mezclador (J), que produce esta corriente de oxidante al mezclar al menos una parte de la corriente reciclada (18) con una corriente de oxígeno externa (21);
  - una primera unidad de compresión (K) configurada para incrementar la presión de este oxidante (26, 4, 8) a un valor adecuado para la unidad de SOFC (A) y la unidad de cámara de combustión (B), en donde este oxidante de presión incrementada se utiliza por la unidad de SOFC (A); y
  - un divisor (M) que divide la corriente de oxidante de presión incrementada en un primer flujo (4) utilizado en la unidad de SOFC (A) y en un segundo flujo (8) utilizado en la cámara de combustión (B).
2. El sistema de conversión de energía de acuerdo con la reivindicación 1, donde la unidad de SOFC (A) se configura para trabajar con una corriente de oxidante (4) compuesta de una mezcla de CO<sub>2</sub> y oxígeno.
3. El sistema de conversión de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la unidad de SOFC (A) se configura para trabajar a presiones comprendidas en el intervalo entre 0,5 y 50 mPa (5 y 500 bar).
4. El sistema de conversión de energía de acuerdo con la reivindicación 3, donde la unidad de SOFC (A) se configura para trabajar a presiones comprendidas en el intervalo entre 25 y 36 mPa (250 y 360 bar).
5. El sistema de conversión de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la unidad de SOFC (A) se configura para trabajar a temperaturas comprendidas en el intervalo entre 650 y 850 °C.
6. El sistema de conversión de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la unidad de expansión (C) se configura tal que la presión de salida de gas de combustión esté entre 0,1 y 5 mPa (1 y 50 bar).
7. El sistema de conversión de energía de acuerdo con la reivindicación 6, donde la unidad de expansor (C) se configura tal que la presión de salida de gas de combustión esté entre 1 y 3 mPa (10 y 30 bar).
8. El sistema de conversión de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la unidad de combustión (B) se configura para quemar combustible adicional (7) y/o un oxidante adicional (8) además de este combustible no convertido (5) y de este oxidante no convertido (6) que sale de la unidad de SOFC (A).
9. El sistema de conversión de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-8, donde la unidad de SOFC (A) se configura para funcionar con un proceso de reformado interno.
10. El sistema de conversión de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-8, donde la unidad de SOFC (A) se configura para funcionar con un proceso de pre-reformado (R).
11. El sistema de conversión de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la unidad de combustión (B) es una unidad de combustión catalítica.
12. El sistema de conversión de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además una unidad de intercambiador de calor (D) para precalentar al menos una de las corrientes que ingresan a la SOFC (A) y/o la cámara de combustión (B), en donde esta unidad de intercambiador de calor (D) está en relación térmica con el gas de escape del expansor (C) y/o con otras corrientes calientes del propio sistema de conversión de energía y/o

con una o más centrales adicionales.

13. El sistema de conversión de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además uno o más calentadores y/o uno o más enfriadores (P,Q,T,U,W,Y) para modificar las temperaturas de las corrientes que entran y/o que salen de la SOFC a los valores deseados.

5 14. El sistema de conversión de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además una segunda unidad de compresor (H) para comprimir esta corriente reciclada (18), obteniendo de esta manera una corriente reciclada comprimida (19).

10 15. El sistema de conversión de energía de acuerdo con la reivindicación 14, que comprende además una tercera unidad de compresor (L) para comprimir al menos una porción (23) de esta corriente reciclada comprimida (19) a una presión adecuada para la cámara de combustión (B).

16. El sistema de conversión de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la unidad de SOFC se configura para recibir adicionalmente una corriente de vapor (3).

15 17. El sistema de conversión de energía de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además al menos una segunda unidad de SOFC (AF) y/o al menos una segunda unidad de combustión (AG) después de la unidad de expansión.

DIBUJOS

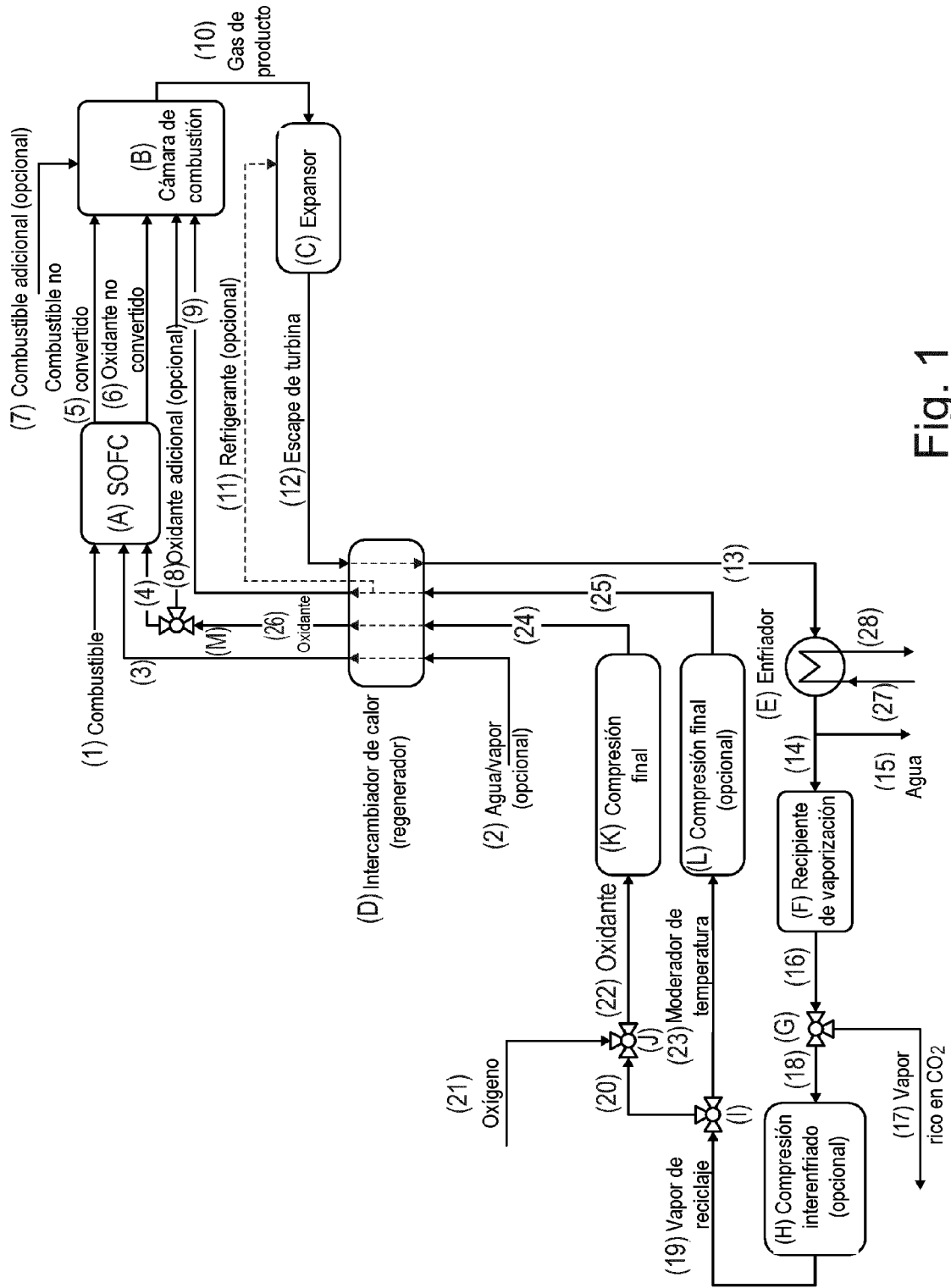


Fig. 1

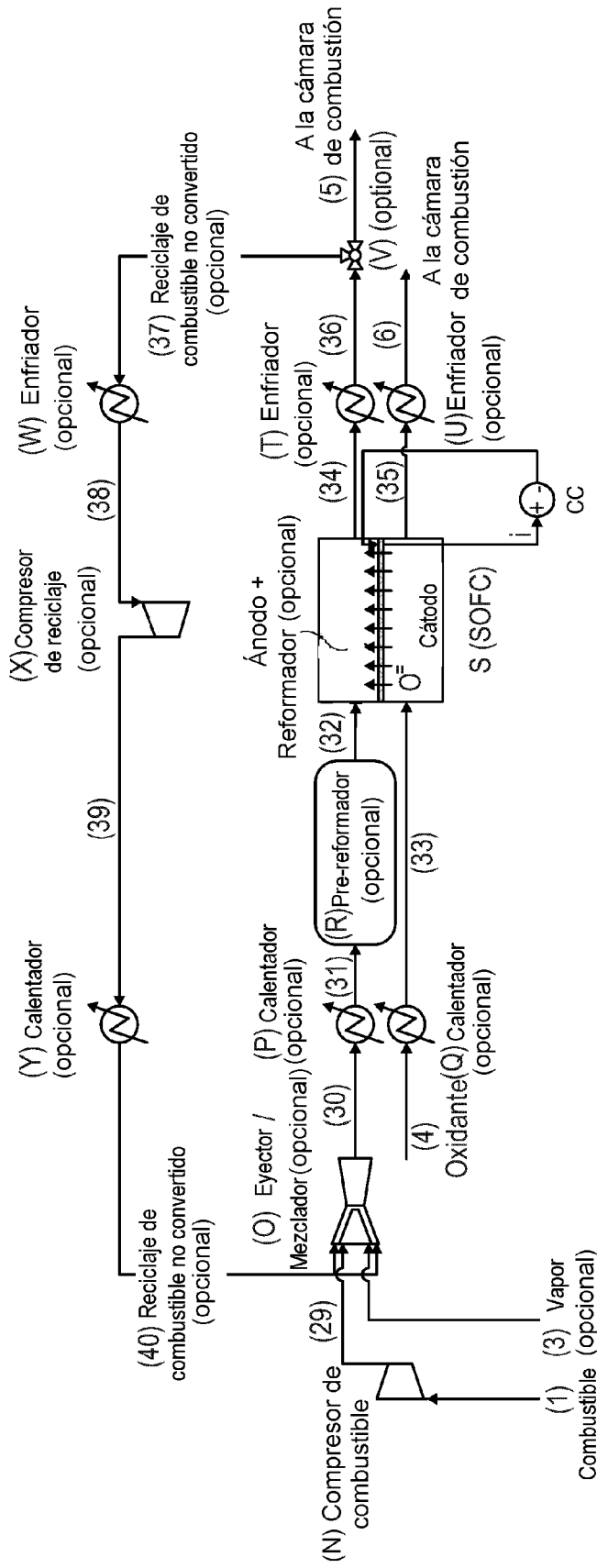


Fig. 2

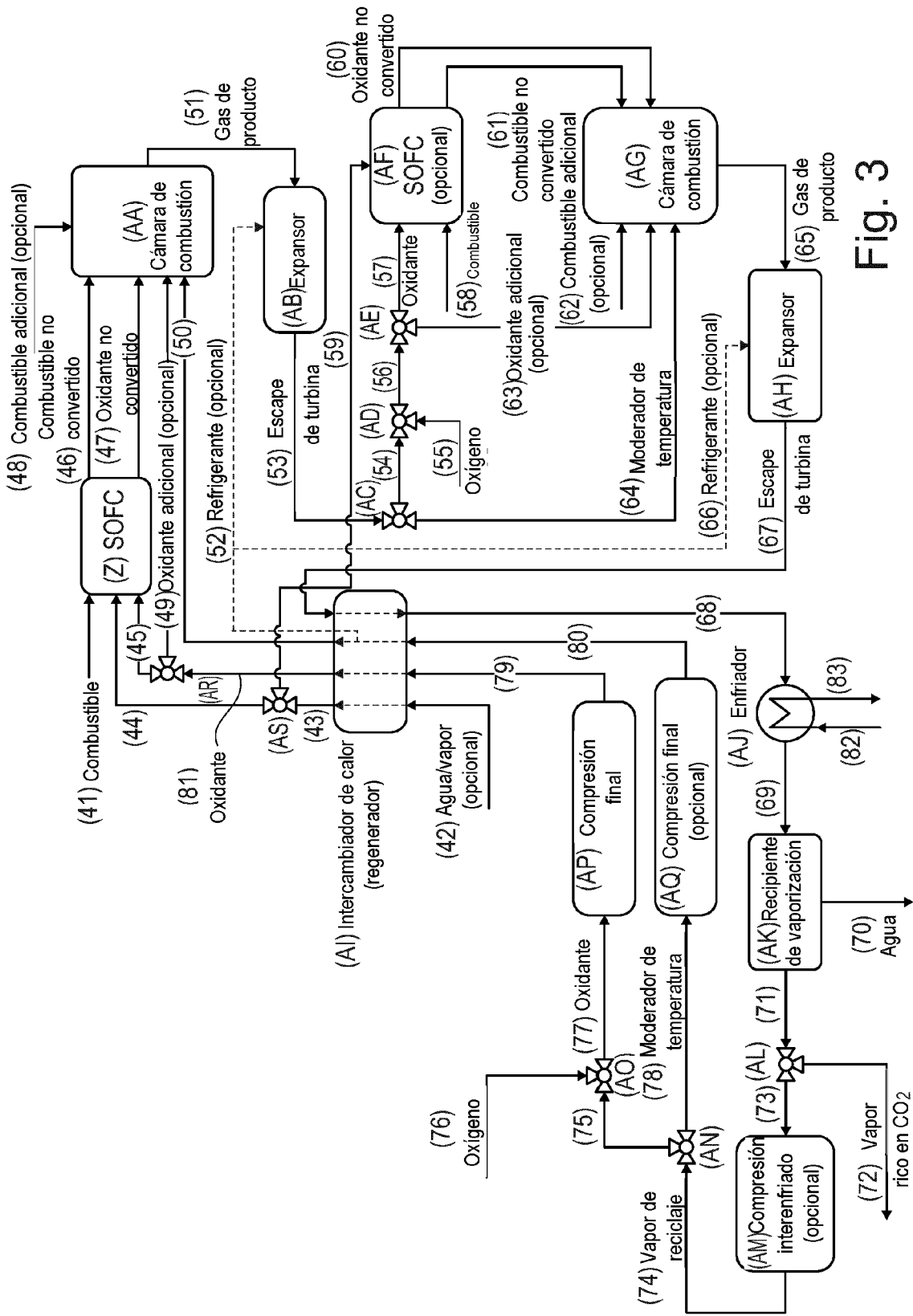


Fig. 3