

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 751 129**

21 Número de solicitud: 201930285

51 Int. Cl.:

F02M 25/12 (2006.01)

F02M 35/10 (2006.01)

B01D 53/22 (2006.01)

C01B 13/02 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

28.03.2019

43 Fecha de publicación de la solicitud:

30.03.2020

71 Solicitantes:

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
(75.0%)**

**Servicio de Promoción y Apoyo a la
Investigación, Innovación y Transferencia,
Edificio Nexus (6G) - 3ª planta, Camí de Vera, s/n
46022 Valencia ES y
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS (CSIC) (25.0%)**

72 Inventor/es:

**ARNAU MARTÍNEZ, Francisco José;
BENAJES CALVO, Jesús Vicente;
CATALÁN MARTÍNEZ, David;
DESANTES FERNÁNDEZ, José María;
GARCÍA-CUEVAS GONZÁLEZ, Luis Miguel;
SERRA ALFARO, José Manuel y
SERRANO CRUZ, José Ramón**

74 Agente/Representante:

MALDONADO JORDAN, Julia

54 Título: **MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA**

57 Resumen:

La invención se refiere a un motor de combustión interna que comprende un primer ciclo de Brayton que comprende una membrana MIEC que separa el O₂ del aire de manera que la corriente de aire succionado está libre de N₂; un segundo ciclo de Brayton combinado de forma binaria con el primer ciclo de Brayton y anidado con un ciclo seleccionado de un ciclo de Otto y un ciclo Diésel realizado mediante oxcombustión. El segundo ciclo de Brayton transmite al primer ciclo de Brayton energía mecánica así como energía térmica procedente de gases de escape. El primer ciclo de Brayton proporciona al segundo ciclo de Brayton O₂ comprimido procedente de la membrana MIEC. Mediante el presente motor, se evita la emisión de NO_x a la atmósfera por la separación de N₂ en la membrana MIEC.

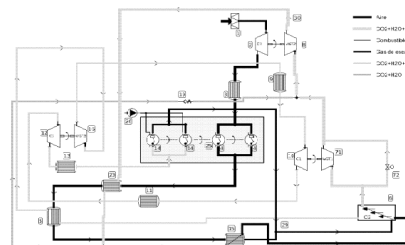


FIG. 1

ES 2 751 129 A1

DESCRIPCIÓN

MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.

5 Campo de la invención

La presente invención se refiere al campo de los motores de combustión interna, y más específicamente a un motor de combustión interna que quema hidrocarburos y no emite gases nocivos para la salud.

10 Antecedentes de la invención

Membranas MIEC

Las membranas mixtas de conducción iónica-electrónica (MIEC) son un tipo de membranas cerámicas densas, en las cuales los iones de oxígeno difunden de un lado al otro por las propiedades de la estructura cristalina debido a un gradiente de potencial químico del oxígeno entre ambos lados de la membrana. La selectividad de estas membranas es del 100% para el oxígeno. Estas membranas funcionan a temperaturas elevadas (normalmente en el intervalo de 700-1000 °C) con presiones de aire elevadas (1-2 MPa) alimentadas en el lado de retención y vacío en el lado de permeación, según Air Products & Chemicals Inc., lo que ha dado como resultado un gran avance en la comercialización de la tecnología de membranas MIEC para producciones de oxígeno puro.

El transporte del ion oxígeno es simultáneo al transporte de electrones o huecos electrónicos (portadores electrónicos), por lo que el material debe poseer suficiente conductividad electrónica en las condiciones de funcionamiento de la membrana. La fuerza impulsora responsable del transporte de oxígeno a través de la membrana es la diferencia de presión parcial de oxígeno entre ambos lados de la membrana. De este modo, el flujo de oxígeno a través de una membrana viene determinado por la temperatura y la diferencia de presión parcial del oxígeno además del espesor de la membrana.

Otro paso crucial en el proceso de separación de oxígeno en membranas de transporte iónico es el intercambio gaseoso. Como se ha mencionado, el transporte a través de la capa selectiva de separación consiste en la difusión de iones oxígeno y portadores electrónicos. Por tanto, son necesarias dos reacciones superficiales, una primera en la que el oxígeno gaseoso se adsorbe y se transforma en iones oxígeno en la superficie de la membrana expuesta a los gases de alimentación, generalmente aire comprimido, y una segunda, en la que los iones oxígeno se transforman en oxígeno

molecular y se desorbe. Por distintas razones, estas etapas de transporte pueden ser limitantes y producir una disminución del flujo de permeación a través de la membrana. Entre las distintas razones posibles, puede destacarse: (1) el espesor de la capa selectiva de separación es muy pequeño, de manera que la difusión a través del sólido es mucho
5 más rápida que el intercambio gaseoso. Normalmente, esta dimensión crítica se denomina “longitud característica” y es el cociente entre el coeficiente de difusión y la constante cinética de la reacción de intercambio gaseoso superficial en las condiciones de funcionamiento y composición de gases en contacto con la superficie de la membrana. (2) La superficie de la membrana no posee actividad catalítica apreciable para la reacción
10 de activación de oxígeno. (3) Las atmósferas gaseosas en contacto con la superficie o superficies de la membrana desfavorecen la adsorción/desorción del oxígeno molecular y su desprendimiento a través de la reacción $O_2 + 2 e^- \rightarrow O^{2-}$. En procesos relevantes desde el punto vista industrial, tanto el permeado como la alimentación suelen presentar cantidades apreciables de gases ácidos como CO_2 y SO_2 , que dificultan dicha reacción
15 ya que pasivan o inactivan la superficie y compiten con los centros de adsorción y reacción implicados en la reacción de intercambio gaseoso de oxígeno. Este efecto pernicioso se acentúa conforme se disminuye la temperatura de funcionamiento del proceso, especialmente por debajo de $850\text{ }^\circ\text{C}$, y cuando se aumenta la concentración de SO_2 y CO_2 . Especialmente negativo es el efecto del gas SO_2 , ya que concentraciones por
20 encima de 5 ppm producen efectos graves en la permeación de oxígeno a través de la membrana.

La diferencia de presión parcial de oxígeno entre ambos lados de la membrana se puede alcanzar a través de dos acciones: (a) aumentando la presión del aire a través de etapas de compresión; y/o (b) disminuyendo la presión parcial de oxígeno en el
25 permeado, lo cual es posible aplicando vacío, diluyendo el oxígeno en el permeado mediante una corriente gaseosa de arrastre o consumiendo el oxígeno en la cámara de arrastre. Esta última opción suele consistir en recircular los gases de salida del horno o caldera de combustión, aumentando al mismo tiempo la temperatura de funcionamiento. Asimismo, en línea con la segunda opción, es posible hacer pasar un gas reductor
30 (generalmente metano u otros hidrocarburos) que consume el oxígeno que penetra a través de membrana para dar productos de combustión completa o parcial y liberar calor directamente en contacto con la membrana cerámica.

Para entender las membranas MIEC, se suelen utilizar 5 criterios de clasificación basados en la estructura cristalina, la composición de fases, la composición química, la
35 geometría y la configuración de la capa densa.

Considerando su estructura cristalina, se pueden clasificar las membranas MIEC

en perovskitas, membranas derivadas de perovskitas avanzadas y fluoritas. La mayoría de las membranas MIEC tienen una estructura cristalina de tipo perovskita (ABO_3), donde A es un catión de gran tamaño y B es un catión más pequeño. Una perovskita es una red cristalina constituida por octaedros de BO_6 con iones A localizados en 12 intersticios.

5 Algunas MIEC tienen una estructura cristalina similar a una perovskita, como las de Ruddlesde-Popper (R-P) con una fórmula de $A_{n+1}B_nO_{3n+1}$ ($n=1, 2, 3, \dots$). La estructura cristalina de esta fase es similar a la de la perovskita en la que un número de bloques perovskita (n) tienen una esquina compartida con el octaedro BO_6 modificado con la capa AO a lo largo del eje c. Algunas MIEC tienen una estructura de fluorita, siendo el ejemplo

10 típico los materiales basados en CeO_2 .

Si las membranas sólo tienen un tipo de fase cristalina se habla de membranas monofásicas. La mayoría de las membranas de perovskita son monofásicas, por ejemplo, $La_{1-x}Sr_xCo_{1-y}Fe_yO_{3-\delta}$ ($0 < x < 1$; $0 < y < 1$). Si la membrana tiene dos fases y ambas contribuyen a la permeación de oxígeno se habla de membranas de fase dual. Un ejemplo son las

15 membranas YSZ-Pd, que contienen una fluorita, YSZ, para el transporte de iones de oxígeno y una fase metálica, Pd, para el transporte de electrones. Si la membrana tiene dos o más fases y sólo una contribuye a la permeación de oxígeno se habla de material compuesto. La fase inerte se añade para mejorar alguna propiedad del material (la resistencia mecánica, por ejemplo). Por ejemplo, el material compuesto $SrCo_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-\delta}$ -

20 $SrSnO_3$ comprende dos perovskitas donde la fase $SrSnO_3$ es inerte con respecto a la permeación de oxígeno, pero mejora las propiedades mecánicas de la membrana.

Al principio del desarrollo de las membranas de tipo perovskita, los estudios se centraban en las que incorporaban Co en el sitio de la posición cristalina B debido a que las membranas basadas en Co presentan una elevada conductividad de oxígeno (por

25 ejemplo, en $Ba_{0.5}Sr_{0.5}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-\delta}$). No obstante, los cationes de cobalto pueden reducirse fácilmente a un estado de valencia menor debido a los débiles enlaces de Co-O que es inestable en entornos reductores. Por lo tanto, se han desarrollado perovskitas libres de Co. Por ejemplo, $BaCe_{0.05}Fe_{0.95}O_{3-\delta}$ presenta conductividades de oxígeno menores en comparación con la respectiva perovskita basada en Co, pero presenta

30 elevadas estabildades incluso en H_2 a elevadas temperaturas.

Las geometrías más comunes son membranas planas, tubulares y fibras huecas. Finalmente, considerando la configuración de la capa densa se habla de autosoportadas cuando las membranas están compuestas por una única capa de membrana que presenta suficiente espesor para soportar la integridad de la membrana, y asimétricas

35 cuando las capas de membrana densa tienen una capa porosa que permite utilizar espesores más pequeños ya que la integridad de la membrana esta soportada por la

capa porosa.

Para su uso práctico, las membranas de separación de oxígeno a alta temperatura a través de transporte iónico están formadas, generalmente, por los siguientes componentes:

- 5 i. Un soporte poroso, generalmente hecho o bien del mismo material del que está hecho la capa de separación o bien de un material (cerámico o metálico) compatible con la capa de separación. Compatible significa que tiene un perfil de expansión similar en función de la temperatura y que no tiene lugar una reacción entre ambas fases a altas temperaturas para dar lugar a terceras fases, que
10 generalmente dan como resultado la degradación y rotura de la membrana. La porosidad de soporte suele estar comprendida entre el 20 y el 60%, y su espesor es variable, normalmente por debajo de 2 mm.
- ii. Sobre el soporte poroso se sitúa una capa o película no porosa, preferiblemente con un espesor inferior a 150 μm . Esta capa está constituida por óxidos o mezclas
15 de óxidos y permite el transporte simultáneo de iones oxígeno y portadores electrónicos a su través.
- iii. Sobre la capa no porosa existe adherida una capa porosa con un espesor preferiblemente entre 100 y 10 μm , hecha de un material que posee conductividad mixta iónica y electrónica a la vez que actividad catalítica para la
20 adsorción/desorción de oxígeno y su disociación e ionización. Esta capa catalítica permite mejorar los procesos de incorporación y eliminación de oxígeno gaseoso.

En algunos casos, existe una capa catalítica porosa adicional entre el soporte poroso y la capa de separación no porosa que tiene la función de mejorar las etapas de intercambio gaseoso, en especial cuando el soporte poroso no posee ni actividad
25 catalítica ni permite llevar a cabo el transporte de iones oxígeno ni portadores electrónicos. Generalmente, las propiedades del soporte poroso y la capa catalítica porosa adicional son bastante semejantes, si bien por lo general el área específica superficial del soporte poroso es superior.

- Opcionalmente también puede ser necesaria otra capa no porosa adicional (v).
30 Esta capa se situaría entre la capa no porosa y la capa porosa, y serviría de protección de la capa de separación frente a posibles interacciones o reacciones de degradación en contacto con la capa (iii) o con los gases en contacto con la capa porosa. Esta capa adicional debe permitir el transporte de iones oxígeno y portadores de oxígeno a la vez que ser compatible termo-químicamente con las capas adyacentes y con los gases con
35 los que esté en contacto.

Oxicombustión

La oxicombustión consiste en la utilización de una corriente de O_2 de elevada pureza como comburente en lugar de aire, como se realiza en los procesos de combustión convencionales, alcanzando de esta forma temperaturas de llama más elevadas con menor consumo de combustible y logrando así mejorar la combustión. El uso de comburentes ricos en oxígeno hace posible obtener gases de combustión con una composición que consiste principalmente en CO_2 y vapor de agua. La elevada concentración de CO_2 de los gases de salida en el proceso de oxicombustión facilita la potencial separación del mismo (véanse, por ejemplo, los documentos 10 US20070175411A1, US20070175411A1, US9702300B2, CN102297025A).

Las membranas de oxígeno basadas en siliconas o polisulfonas también pueden aplicarse en el enriquecimiento del aire, de manera que se aumenta la concentración de oxígeno del 21% a valores superiores, normalmente por encima del 24%.

La oxicombustión apunta a ser una de las tecnologías más económicas para la 15 captura de CO_2 , siendo su principal inconveniente la elevada demanda de O_2 que presenta y el coste que la obtención de éste conlleva. El gran reto de esta tecnología se encuentra en la producción de O_2 para lograr suministrar las elevadas cantidades que se requieren.

En los reactores de membrana, las membranas se introducen con los siguientes 20 propósitos: extracción selectiva de reactivos, retención del catalizador, dosificación de un reactivo, soporte del catalizador. Todo ello conlleva aumentos de la eficiencia de las reacciones en sistemas limitados por el equilibrio termodinámico, evitando reacciones secundarias, protegiendo el catalizador de posibles compuestos que lo desactiven, etc.

25 Membranas de CO_2

Actualmente existen gran variedad de materiales que permiten el paso selectivo del CO_2 . Estos materiales van desde polímeros avanzados hasta diferentes tipos de materiales inorgánicos. Pese a esta diferenciación, existen combinaciones de estos materiales en las llamadas membranas de matriz mixta que generalmente consisten en 30 matrices poliméricas con partículas inorgánicas dispersadas en la matriz. Este tipo de tecnología aporta flexibilidad a la captura de CO_2 permitiendo actuar antes o después de la combustión. Sin embargo, este tipo de materiales generalmente presenta permeabilidad a más gases, por ejemplo, N_2 , O_2 , H_2 , etc. Para esta aplicación es necesario que la permeabilidad mayoritaria sea a CO_2 , y, adicionalmente, que la 35 permeabilidad a O_2 y a N_2 sea ínfima. Para la separación de CO_2 del resto de los gases existen diversas tecnologías:

a. Tecnología de separación de CO₂ mediante membranas poliméricas

Existen diferentes polímeros que permiten la separación selectiva del CO₂ de una corriente gaseosa. La aplicación de polímeros a la captura de CO₂ es atractiva desde el punto de vista económico debido al bajo coste, facilidad de síntesis y procesado de los polímeros, pero son materiales generalmente limitados debido a su estabilidad química, mecánica y térmica y por su baja permeabilidad. Se ha establecido un límite superior estándar de 50 para la selectividad cruzada CO₂/N₂. Generalmente, este tipo de materiales trabaja a temperaturas bajas y presiones intermedias (1 – 5 bar):

Entre los diferentes polímeros disponibles hay que destacar: (i) óxidos de polietileno reticulado (XLPEO) con permeabilidades de 420 barrers y selectividad para CO₂/CH₄ de 18 a 35°C (barrer = 10⁻¹⁰ cm³(STP)·cm/(cm²·s·cmHg)), (ii) basadas en poliamidas, como Pebax, que presenta 132 barrers y selectividades CO₂/N₂ de aproximadamente 6 a 25°C y 3 atm, (iii) basadas en poliamidas (PVAm) con permeabilidades de 41-104 GPU con selectividad CO₂/N₂ en el rango 100–197 a 25°C y 2 atm usando mezclas húmedas de CO₂ y N₂ (GPU = 10⁻⁶ cm³(STP)/(cm²·s·cmHg)). Entre otros, los productos Polaris™ and Polyactive son ejemplos comerciales de esta tecnología.

Debe observarse que para la separación de CO₂ a partir de aire es necesaria una gran selectividad, ya que la concentración del CO₂ en el aire es de aproximadamente el 0,035% y la del N₂ es del 78%.

b. Tecnología de separación de CO₂ mediante membranas inorgánicas

Considerando aparte las membranas basadas en carbonatos fundidos, en el grupo de membranas basadas en materiales inorgánicos para la separación de CO₂ de corrientes gaseosas se encuentran las membranas metálicas (basadas en Pd), membranas basadas en sílice, membranas de carbono y membranas basadas en zeolitas.

Las membranas metálicas están basadas en paladio y sus aleaciones. Estos materiales presentan elevadas permeabilidades a H₂. Por tanto, se emplean fundamentalmente para la separación de H₂ en sistemas de precombustión. Este tipo de membranas son una tecnología madura para sistemas de captura de CO₂ en precombustión. Sin embargo, la estabilidad de estos materiales debe mejorarse para su implementación en sistemas industriales.

Las membranas inorgánicas porosas (membranas basadas en sílice, zeolitas, organometálicas (MOF) y membranas de carbono) pueden aplicarse a la separación de

CO₂.

Las zeolitas son aluminosilicatos caracterizados por una estructura porosa homogénea y un diámetro de canal mínimo. La separación en estos materiales se produce por difusión superficial o por tamizado molecular. Se distinguen tres regímenes de separación: (i) cuando las moléculas tienen fuerzas de adsorción similares pero diferente tamaño, donde las moléculas de menor tamaño penetran más fácilmente; (ii) cuando las moléculas tienen fuerzas de adsorción diferentes y tamaños similares, donde la membrana es selectiva a la molécula que presenta mayores fuerzas de adsorción; (iii) cuando las moléculas tienen fuerzas de adsorción y tamaños diferentes, donde el mecanismo es una combinación entre la competitividad entre las fuerzas de adsorción y la difusividad. De esta manera las selectividades CO₂/N₂ y/o CO₂/CH₄ pueden maximizarse a bajas temperaturas separando los gases por el tercer régimen, o a altas temperaturas mediante el primer régimen. Entre las zeolitas cabe destacar ZSM-5 con selectividades CO₂/N₂ de 9,5 a 303 K (de -263,65°C a 29,85°C) y una permeabilidad a CO₂ de 3·10⁻⁷ mol/(m²·s·Pa) y zeolitas del tipo Y con permeabilidades a CO₂ de 4·10⁻⁷ mol/(m²·s·Pa) y selectividades de 100 y 21 para CO₂/N₂ y CO₂/CH₄, respectivamente a 303 K (29,85°C).

Las membranas basadas en sílice presentan un gran potencial para la separación CO₂/N₂ y H₂/CO₂, debido a su elevada estabilidad química, térmica y mecánica en diferentes atmósferas y condiciones. El comportamiento de este tipo de membranas está muy condicionado, entre otros factores, a su método de síntesis. Las permeabilidades están en el rango de 3·10⁻¹⁰ – 5·10⁻⁷ mol/(m²·s·Pa), alcanzando selectividades de 60 para CO₂/N₂, de 325 para CO₂/CH₄ y de 670 para CO₂/H₂ dependiendo del tipo de sílice, método de síntesis y condiciones.

Las membranas de carbono, compuestas por materiales microporosos amorfos de alto contenido en carbono, han surgido como prometedores materiales para aplicaciones de separación de gases debido a su resistencia térmica, estabilidad química en ambientes corrosivos, alta permeabilidad a los gases y excelente selectividad en comparación con las membranas poliméricas. Considerando la separación de CO₂, estos materiales alcanzan selectividades de 100 para CO₂/CH₄ con permeabilidades a CO₂ de 2000 – 10000 barrers, y selectividades de 10 para CO₂/N₂ con permeabilidades de CO₂ de 5 barrers.

c. Tecnología de separación de CO₂ mediante membranas basadas en carbonatos fundidos

Utilizando materiales similares a las cerámicas de conducción iónica (oxígeno)-

electrónica se han desarrollado materiales basados en carbonatos fundidos que permiten el paso selectivo de CO₂. Sin embargo, este tipo de membranas aún están lejos de aplicaciones industriales debido a los bajos flujos de CO₂ observados en los diferentes trabajos publicados hasta la fecha.

5

Motores de combustión interna alternativos

Los motores de combustión interna alternativos representan la tecnología más importante para vehículos terrestres y marinos tanto de transporte pesado como de pasajeros. Tanto su diseño como su maquinaria auxiliar (turbomáquinas; sistemas de inyección de combustible; bombas adicionales e intercambiadores de calor) se han optimizado profundamente durante el siglo pasado para varios tipos de combustible. Los motores alternativos de 4 tiempos lideran el transporte terrestre por su alta potencia específica, su capacidad para cumplir con las diversas normativas sobre emisiones gaseosas y acústicas contaminantes y su bajo consumo específico promedio.

15 No obstante, la necesidad de limitar las emisiones de CO₂ o incluso retirar CO₂ atmosférico y la necesidad de mejorar la calidad del aire en entornos urbanos superpoblados están presionando los límites tecnológicos de estos motores con los conceptos actuales de combustión y renovación de la carga de los mismos.

20 Oxidación en motores

Integrar un sistema de oxidación en un motor para vehículos magnifica las ventajas expuestas (mayores eficiencias y reducción de emisiones), pero complica la forma de producir el oxígeno ya que el espacio está limitado a las dimensiones del vehículo. Considerando motores que emplean oxígeno como oxidante, se han planteado 25 varias alternativas:

- (i) Almacenar oxígeno en el vehículo. Este sistema sitúa el problema de la generación de oxígeno fuera del vehículo, con lo que sólo se requiere disponer del espacio dentro del vehículo para el sistema de almacenamiento del oxígeno. Varios estudios han propuesto almacenar en el vehículo oxígeno en forma líquida para reducir espacio (véanse los documentos CN201835947U y DE3625451A1, entre otros). Sin embargo, esto aumentaría el coste del oxígeno y de un sistema de almacenamiento que requeriría bajas temperaturas para mantener el oxígeno en fase líquida. Otros estudios han planteado la idea de almacenar el oxígeno comprimido en tanques dentro del vehículo (documento 30 US 3425402). Pese a todo, este tipo de solución requeriría generar el oxígeno en otro lugar, con lo que además del gasto del sistema de almacenamiento (tanto 35

en fase líquida como en fase gaseosa) habría que considerar el gasto de operación del oxígeno. Considerando todos estos sobrecostos, a priori esta alternativa no sería viable y sería necesaria una mejora de la tecnología actual con respecto a la generación de oxígeno y su almacenamiento.

5 (ii) Generar el oxígeno a partir de fuentes alternativas al aire. El documento US 3709203 describe la generación del oxígeno a partir de una descomposición térmica de un perclorato de metal alcalino, según el documento US 3961609A el oxígeno se genera mediante electrolisis de agua, y según el documento US2775961A a partir de peróxido de hidrógeno. Sin embargo, debido a las elevadas demandas de oxígeno que estos sistemas necesitan, no parece probable que integrar alguna de estas soluciones a un motor para un vehículo sea viable y competitivo con respecto a la tecnología actual.

10 (iii) Generar el oxígeno a partir del aire:

a. Introduciendo sistemas de filtrado (documento US 3961609A) o adsorción PSA (documento WO 2005083243). Este tipo de solución presenta el inconveniente de que para satisfacer la demanda de oxígeno se requerirían sistemas muy grandes.

15 b. Utilizando membranas basadas en siliconas o polisulfonas (documentos US20030024513A1, US5636619A, US5678526, US5636619, US2006/0042466A1, CN101526035A). Sin embargo, este tipo de sistemas se han planteado en mayor medida para el enriquecimiento del oxígeno en el aire que para la generación de oxígeno puro, de manera que las áreas de membrana necesarias para conseguir un grado de pureza aceptable para el proceso harían inviable el proceso.

20 c. Utilizando membranas basadas en conductores cerámicos. (c1) Utilizando una celda electroquímica mediante un electrolito cerámico conductor de iones oxígeno (documento US 20090139497A1); no obstante, este sistema necesitaría de una demanda de energía eléctrica que se debería sacar necesariamente del motor disminuyendo de esta manera la eficiencia del sistema. (c2) Utilizando membranas de conducción mixta electrónica y de iones oxígeno (documento US20130247886A1) donde el oxígeno se separa selectivamente de la corriente de aire. Este proceso requiere grandes cantidades de calor para mantener la temperatura en torno a 700-1000 °C. Para ello este sistema usa el calor de los gases de salida del motor.

35

Sumario de la invención

La presente invención tiene como objetivo proporcionar un motor de combustión interna que aporte ventajas con respecto al estado de la técnica anteriormente descrito. Más particularmente, la presente invención da a conocer un motor de combustión interna tal como se define en la reivindicación 1 adjunta, que reduce la contaminación al reducir, 5 o incluso evitar, la emisión de NOx a la atmósfera.

En las reivindicaciones dependientes se dan a conocer realizaciones adicionales del motor de la presente invención que aportan ventajas adicionales con respecto a la técnica anterior.

Más específicamente, en su aspecto más amplio, la presente invención da a 10 conocer un motor de combustión interna, del tipo que succiona aire atmosférico como comburente y usa hidrocarburos como combustible, que comprende:

- un primer ciclo de Brayton regenerativo de compresiones de aire con enfriamiento intermedio y expansiones de nitrógeno con recalentamiento, por mezcla de una parte del nitrógeno, que comprende una membrana MIEC que 15 separa el O₂ del aire comprimido, de manera que la corriente de aire succionado está libre de N₂, y un aire empobrecido procedente del rechazo de la membrana MIEC se envía directamente a una corriente de gases de escape evitando su participación en una combustión posterior, en el que parte de las compresiones de aire se realizan en al menos un primer cilindro del motor;
- un segundo ciclo de Brayton con compresión con enfriamiento intermedio, combinado de forma binaria con el primer ciclo de Brayton (cediéndole calor) y anidado con un ciclo seleccionado de un ciclo de Otto y un ciclo Diésel realizado mediante oxicomustión en al menos un segundo cilindro del motor, 20 en el que el segundo ciclo de Brayton transmite al primer ciclo de Brayton energía mecánica mediante el acoplamiento del al menos un primer cilindro con el al menos un segundo cilindro a través de un cigüeñal, así como energía térmica procedente de gases de escape;

en el que el primer ciclo de Brayton proporciona al segundo ciclo de Brayton O₂ comprimido procedente de la membrana MIEC; 30 mediante lo cual se evita la emisión de NOx a la atmósfera por la separación de N₂ en la membrana MIEC.

Tal como entenderá fácilmente un experto en la técnica, cuando se menciona en el presente documento que un motor “comprende un primer ciclo de Brayton”, y expresiones similares, esto debe interpretarse como que el motor “comprende medios 35 necesarios para llevar a cabo un primer ciclo de Brayton”. En tales casos, no se pretende limitar la presente invención a ninguna combinación de medios específica, y debe

entenderse que cualquier medio adecuado para llevar a cabo dicho ciclo de Brayton (o similar) queda abarcado por la presente invención.

Según otro aspecto, la presente invención también da a conocer un método de funcionamiento de motor de combustión interna, del tipo que succiona aire atmosférico
5 como comburente y usa hidrocarburos como combustible, comprendiendo el método:

- un primer ciclo de Brayton regenerativo de compresiones de aire con enfriamiento intermedio y expansiones de nitrógeno con recalentamiento, por mezcla de una parte del nitrógeno, que comprende separar el O₂ del aire comprimido, de manera que la corriente de aire succionado está libre de N₂, y
10 un aire empobrecido procedente del rechazo de la separación se envía directamente a una corriente de gases de escape evitando su participación en una combustión posterior;
- un segundo ciclo de Brayton con compresión con enfriamiento intermedio, combinado de forma binaria con el primer ciclo de Brayton (cediéndole calor) y anidado con un ciclo seleccionado de un ciclo de Otto y un ciclo Diésel
15 realizado mediante oxicomustión,

en el que el segundo ciclo de Brayton transmite al primer ciclo de Brayton energía mecánica así como energía térmica procedente de gases de escape;

en el que el primer ciclo de Brayton proporciona al segundo ciclo de Brayton O₂
20 comprimido procedente de la separación;

mediante lo cual se evita la emisión de NO_x a la atmósfera por la separación de N₂.

Tal como se describirá de manera más detallada a continuación en el presente documento, la presente invención integra membranas basadas en materiales cerámicos
25 conductores mixtos electrónicos y de iones oxígeno de manera que se recupera toda la energía necesaria para la membrana MIEC de separación de O₂ de la principal fuente de calor residual (como son los gases de escape a la salida de los cilindros) y aprovecha los aumentos de temperatura que ofrece la oxicomustión para suministrar a la membrana la temperatura necesaria sin desperdicio de calor. También se pretende aprovechar la alta
30 capacidad de compresión de los cilindros de los motores alternativos (hasta 25 MPa) para conseguir las condiciones de presión idóneas. Se necesitan presiones altas para los siguientes procesos, que se proporcionan en al menos algunas de las realizaciones preferidas según la presente invención: maximizar la diferencia de presión parcial entre el aire y el O₂ para maximizar la productividad de la membrana de O₂; maximizar la
35 separación del CO₂ atmosférico del aire; y finalmente, comprimir hasta licuar el CO₂ (superar su presión crítica de 7,5 MPa).

Las turbomáquinas de los sistemas de sobrealimentación de los motores no se usan en la presente invención para el proceso de compresión del aire antes de su separación ni para la densificación del CO₂ (a diferencia del documento US20130247886A1) debido a las bajas relaciones de compresión que proporcionan 5 (presión máxima inferior a 0,6 MPa a nivel del mar). No existen desarrollos de turbocompresores en turbogrupos para presiones superiores a los 0,6 MPa, y son muy ineficientes en las cercanías de esos valores.

Tampoco se aprovecha la temperatura asociada a la compresión del aire en los turbocompresores (también a diferencia del documento US20130247886A1) debido a la 10 mucha menor eficiencia de los procesos de compresión isentrópicos e irreversibles frente a los isoterms. Ahora bien, en la presente invención el aire comprimido siempre se enfría antes de pasar a la siguiente etapa de compresión para que el proceso sea lo más isoterms (y por tanto más eficiente) posible. Esto se hace o bien con intercambiadores de calor que usan agua para enfriar la carga de aire (comúnmente WCAC), o bien con ciclos 15 de Brayton a vacío que convierten calor en presión (CBV). Tanto CBV como WCAC retiran calor del fluido y lo transmiten al entorno antes de la siguiente compresión, lo cual, aunque parezca un gasto de energía, es en realidad una ganancia que se rentabiliza en dicha siguiente etapa de compresión. Incluso se busca conseguir la máxima relación de compresión, mecánicamente posible, dentro de los cilindros del motor de cuatro tiempos, 20 ya que al realizarse el proceso de compresión del aire en cuatro carreras el aire permanece largo tiempo en los cilindros, contribuyendo esa residencia a su enfriamiento contra el refrigerante del motor. Este enfriamiento del aire a alta presión hace el proceso más cercano al isoterms y nuevamente más eficiente. Este uso innovador de las cuatro carreras del motor, sin que medie combustión en esos cilindros, se describe por primera 25 vez en el presente documento.

La razón última de la búsqueda de la máxima eficiencia energética en todos los procesos es conseguir un grupo propulsor / motor de oxcombustión que presente al menos alguna de las siguientes características: que no emita o emita ínfimas cantidades de gases contaminantes; que atrape el CO₂ producido en la combustión y retire del 30 ambiente todo o parte del CO₂ atmosférico; que sea compacto y liviano para poder auto-transportarse y; por último, que sea competitivo con los motores de combustión interna actuales en cuanto al consumo de combustible.

Para conseguir este último objetivo, la presente invención describe, en alguna de sus realizaciones preferidas, un sistema de regulación de la carga del motor totalmente 35 novedoso. Éste evita la mariposa de estrangulación del flujo para regular la carga del motor en los motores de encendido provocado (SI) con oxcombustión de mezcla

homogénea. Esto se hace usando los turbogrupos, no para sobrealimentar los cilindros de combustión (como propone el documento US20130247886A1), sino para sobrealimentar los cilindros que comprimen el aire antes de las membranas y usa la regulación de la producción de O₂ de las MIEC para regular la carga. Evitar el uso de la mariposa elimina las pérdidas de bombeo de los motores SI de combustión premezclada durante la regulación de su carga, que es la principal ineficiencia de éstos. La segunda ineficiencia que se evita, con la oxicomustión, en los SI de combustión premezclada es el enriquecimiento de la mezcla (más allá del dosado estequiométrico: $\lambda < 1$) para controlar la temperatura de los gases de escape. Éste control de temperatura se realiza en la presente invención diluyendo la mezcla O₂-combustible con el CO₂ puro usado para barrer el lado del O₂ en la MIEC en vez de con el combustible. La disposición propuesta de los turbogrupos y de la MIEC permite realizar de forma independiente tanto el control de la tasa de producción de O₂ como el control de su tasa de dilución con CO₂. Ésta disposición de turbomáquinas y membrana permite hacer ambos controles de manera más eficiente que las descritas hasta ahora en el estado de la técnica, pues se realiza el control de la presión expandiendo el flujo en las turbinas; en vez de la ineficiente laminación de la presión en válvulas de regulación (esto último es lo que se ha propuesto, por ejemplo, en el documento US20130247886A1).

Además, la presente invención propone en alguna de sus realizaciones preferentes usar el CO₂ líquido durante el ciclo de combustión del motor alternativo. Esto permite recuperar gran parte de la energía necesaria para licuar el CO₂ en un ciclo motor supercrítico con este fluido que funciona de forma simultánea y conjugada con el ciclo de O₂. Ambos ciclos comparten algunos de sus procesos, fundamentalmente el de aumento del estado térmico y el de expansión del fluido. Ni el ciclo supercrítico de CO₂ aquí explicado, ni el ciclo conjugado de O₂, con el que comparte algunos de sus procesos, han sido descritos por fuentes anteriores a la presente invención.

Durante el licuado del CO₂, para posteriormente almacenarlo y transferirlo a los centros de procesado pertinentes, se produce un porcentaje (de alrededor del 2% de la masa total de sustancia trasegada) de agua líquida, que tiene que separarse necesariamente del CO₂. Como diferencia adicional de la presente invención con respecto al documento US20130247886A1, el agua separada a alta presión se valoriza energéticamente expandiéndose en estado vapor en una de las turbinas. Este uso tiene la virtud, por un lado, de emitir el agua en forma vapor frente a un chorreo líquido y; por otro lado, de reducir el consumo energético para conseguir la presión necesaria del aire en las membranas de separación del O₂.

Breve descripción de los dibujos

La presente invención se entenderá mejor con referencia a los siguientes dibujos que ilustran realizaciones preferidas de la misma, proporcionadas a modo de ejemplo, y que no deben interpretarse como limitativas de la invención de ninguna manera:

- 5 La figura 1 muestra un diagrama de un motor de oxidcombustión premezclada según una primera realización preferida de la presente invención, con mezcla homogénea y estequiométrica, de alta potencia específica, alta eficiencia, con MIEC para separar el O_2 del aire, sin emisión de gases nocivos para la salud pero con emisiones netas positivas de CO_2 .
- 10 La figura 2a muestra un diagrama de un motor de oxidcombustión premezclada según una segunda realización preferida de la presente invención, con mezcla homogénea y estequiométrica, de alta potencia específica, alta eficiencia, sin emisión de gases nocivos para la salud, con MIEC para separar el O_2 del aire, con membrana polimérica para separar CO_2 y con emisiones netas negativas de CO_2 .
- 15 La figura 2b muestra un diagrama de un motor de oxidcombustión premezclada según una alternativa del motor mostrado en la figura 2a, con mezcla homogénea y estequiométrica, de alta potencia específica, alta eficiencia, sin emisión de gases nocivos para la salud, con MIEC para separar el O_2 del aire, con membrana basada en carbonatos fundidos para separar CO_2 del aire y con emisiones netas negativas de CO_2 .
- 20 La figura 3 muestra un diagrama de un motor de oxidcombustión por difusión según una tercera realización preferida de la presente invención, con mezcla estratificada y pobre, de alta potencia específica, alta eficiencia, con MIEC para separar el O_2 del aire, sin emisión de gases nocivos para la salud pero con emisiones netas positivas de CO_2 .
- La figura 4a muestra un diagrama de un motor de oxidcombustión por difusión
25 según una cuarta realización preferida de la presente invención, con mezcla estratificada y pobre, de alta potencia específica, alta eficiencia, sin emisión de gases nocivos para la salud, con MIEC para separar el O_2 del aire, con membrana polimérica para separar CO_2 del aire y con emisiones netas negativas de CO_2 .
- La figura 4b muestra un diagrama de un motor de oxidcombustión por difusión
30 según una alternativa del motor de la figura 4a, con mezcla estratificada y pobre, de alta potencia específica, alta eficiencia, sin emisión de gases nocivos para la salud, con MIEC para separar el O_2 del aire y membrana basada en carbonatos fundidos para separar CO_2 del aire y con emisiones netas negativas de CO_2 .
- La figura 5a muestra un esquema del ciclo de Brayton a vacío (CBV).
- 35 La figura 5b muestra un diagrama T-s del ciclo de Brayton a vacío (CBV) idealizado y calculado para una situación concreta.

La figura 6 muestra un ciclo supercrítico del CO₂ anidado con el ciclo Diésel del O₂, correspondiente a la realización 4 de las figuras 4a y 4b.

La figura 7 muestra un ciclo Diésel del O₂ anidado con el ciclo de Brayton de compresión con enfriamiento intermedio correspondiente a la realización 4 de las figuras 5 4a y 4b.

La figura 8 muestra una gráfica de la regulación de la temperatura de combustión para distintos grados de carga y en base a la tasa de EGR; esto es para un motor según la realización de la figura 1.

La figura 9 muestra una gráfica de la eficiencia de la MIEC durante la regulación de la temperatura de combustión para distintos grados de carga; esto es para un motor según la realización de la figura 1.

La figura 10 muestra una gráfica del par efectivo a plena carga y a cargas parciales para un motor según la realización de la figura 1.

La figura 11 muestra una gráfica del consumo específico a plena carga y a cargas parciales para un motor según la realización de la figura 1.

La figura 12 muestra una gráfica de la potencia efectiva a plena carga y a cargas parciales para un motor según la realización de la figura 1.

La figura 13 muestra una gráfica de los resultados del ciclo dentro del cilindro de combustión para un motor según la realización de la figura 1.

20

Descripción detallada de las realizaciones preferidas

Tal como se mencionó anteriormente, la presente invención da a conocer un motor de combustión interna, del tipo que succiona aire atmosférico como comburente y usa hidrocarburos como combustible, que comprende:

- 25 - un primer ciclo de Brayton regenerativo de compresiones de aire con enfriamiento intermedio y expansiones de nitrógeno con recalentamiento, por mezcla de una parte del nitrógeno, que comprende una membrana MIEC (6) que separa el O₂ del aire comprimido, de manera que la corriente de aire succionado está libre de N₂, y un aire empobrecido procedente del rechazo de
- 30 la membrana MIEC (6) se envía directamente a una corriente de gases de escape evitando su participación en una combustión posterior, en el que parte de las compresiones de aire se realizan en al menos un primer cilindro (4), preferiblemente dos primeros cilindros (4), del motor;
- 35 - un segundo ciclo de Brayton con compresión con enfriamiento intermedio, combinado de forma binaria con el primer ciclo de Brayton y anidado con un ciclo seleccionado de un ciclo de Otto y un ciclo Diésel realizado mediante

oxicombustión en al menos un segundo cilindro (14), preferiblemente dos segundos cilindros (14), del motor,

en el que el segundo ciclo de Brayton transmite al primer ciclo de Brayton energía mecánica mediante el acoplamiento del al menos un primer cilindro (4) con el al menos un segundo cilindro (14) a través de un cigüeñal (25), así como energía térmica procedente de gases de escape;

en el que el primer ciclo de Brayton proporciona al segundo ciclo de Brayton O_2 comprimido procedente de la membrana MIEC (6);

mediante lo cual se evita la emisión de NO_x a la atmósfera por la separación de N_2 en la membrana MIEC (6).

Según una realización preferida, la energía mecánica neta producida por el primer ciclo de Brayton se usa para sobrealimentar el segundo ciclo de Brayton a través de un compresor C1 (10).

Según otra realización preferida, la membrana MIEC (6) produce O_2 puro separado del aire atmosférico. El término "puro" (por ejemplo, aplicado a alguna corriente gaseosa, tal como " O_2 puro") no debe interpretarse en la presente memoria en un sentido estricto limitativo. Por ejemplo, en este caso, la corriente de O_2 producida puede no ser pura al 100%, sino contener también alguna cantidad menor, por ejemplo, de CO_2 . Sin embargo, esta corriente de O_2 puro (o de O_2 sustancialmente puro) se ha separado del N_2 , de modo que se evita la producción de NO_x en una oxicombustión posterior, y por tanto la emisión de dichos NO_x a la atmósfera.

Según otra realización preferida, la membrana MIEC (6) produce O_2 diluido con CO_2 . El CO_2 con el que se diluye el O_2 en este caso puede o bien obtenerse del aire atmosférico, o bien producirse por la combustión con hidrocarburo en el segundo ciclo de Brayton.

Según otra realización preferida, siempre hay una etapa de enfriamiento después de cada etapa de compresión.

Según otra realización preferida, se recupera calor de todas las fuentes residuales mediante combinación de los ciclos de Brayton primero y segundo realizando regeneraciones antes de cada enfriamiento.

Según otra realización preferida, la energía mecánica producida por el segundo ciclo de Brayton se usa además para comprimir CO_2 producido hasta licuarlo. Dicho CO_2 puede comprimirse, por ejemplo, hasta al menos 7,5 MPa. Además, el segundo ciclo de Brayton puede estar anidado con un ciclo de Otto, y el motor comprende al menos un pistón adicional (22) así como válvulas antirretorno (una primera válvula antirretorno (33) a la entrada y una segunda válvula antirretorno (19) aguas abajo del mismo) para

succionar y comprimir CO₂ sobrante acumulado en conductos del motor.

Según otra alternativa de esta última realización preferida, el segundo ciclo de Brayton está anidado con un ciclo Diésel, y se usa la carrera de escape de los segundos cilindros (14) para comprimir el CO₂, mediante el uso de válvulas antirretorno primera y
5 segunda (33, 19) que permiten la descarga de CO₂ y la admisión de O₂ sustancialmente puro. Este O₂ sustancialmente puro se emplea como gas de arrastre en membranas de separación selectivas de CO₂.

Según otra realización preferida, el motor comprende además un ciclo de Brayton a vacío (CBV) para enfriar más intensamente el O₂ sustancialmente puro, o el O₂ diluido
10 con CO₂, antes de una compresión posterior.

Según otra realización preferida, el motor comprende un primer depósito (20) de almacenamiento de CO₂ licuado producido. Dicho CO₂ almacenado en el primer depósito (20) puede usarse para bombear combustible desde un segundo depósito (27) hacia los segundos cilindros (14) del motor, estando ambos depósitos primero y segundo (20, 27)
15 en un mismo tanque separados por una membrana flexible (sustituyendo a la bomba de baja presión que se usa en los sistemas de inyección de tipo "common rail"; que son los más extendidos de los motores actuales de encendido por compresión) y/o puede transferirse a un surtidor de una red logística de CO₂ externa.

Según otra realización preferida, la membrana MIEC (6) se basa en materiales
20 cerámicos cristalinos que presentan conducción mixta de portadores electrónicos e iones oxígeno.

Según otra realización preferida, en la que el motor es de tipo de encendido provocado (SI), se emplean turbogrupos para sobrealimentar los primeros cilindros (4) y se emplea la regulación de la producción de O₂ de la membrana MIEC (6) para regular la
25 carga del motor.

Según otra realización preferida, en la que el motor es de tipo de encendido por compresión (CI), se emplean turbogrupos para sobrealimentar los primeros cilindros (4) y se emplea la regulación de la producción de O₂ de la membrana MIEC (6) para regular la relación de compresión efectiva del fluido de trabajo en el ciclo del motor.

30 En otro aspecto, la presente invención da a conocer un método de funcionamiento de motor de combustión interna, del tipo que succiona aire atmosférico como comburente y usa hidrocarburos como combustible, comprendiendo el método:

- un primer ciclo de Brayton regenerativo de compresiones de aire con enfriamiento intermedio y expansiones de nitrógeno con recalentamiento, por
35 mezcla de una parte del nitrógeno, que comprende separar el O₂ del aire comprimido, de manera que la corriente de aire succionado está libre de N₂, y

un aire empobrecido procedente del rechazo de la separación se envía directamente a una corriente de gases de escape evitando su participación en una combustión posterior;

- 5 - un segundo ciclo de Brayton con compresión con enfriamiento intermedio, combinado de forma binaria con el primer ciclo de Brayton y anidado con un ciclo seleccionado de un ciclo de Otto y un ciclo Diésel realizado mediante oxicomustión,

en el que el segundo ciclo de Brayton transmite al primer ciclo de Brayton energía mecánica así como energía térmica procedente de gases de escape;

- 10 en el que el primer ciclo de Brayton proporciona al segundo ciclo de Brayton O_2 comprimido procedente de la separación;

mediante lo cual se evita la emisión de NO_x a la atmósfera por la separación de N_2 .

- 15 Según una realización preferida del método, la energía mecánica neta producida por el primer ciclo de Brayton se usa para sobrealimentar el segundo ciclo de Brayton.

- 20 Según una realización preferida del método, el primer ciclo de Brayton produce O_2 puro separado del aire atmosférico. Alternativamente, el primer ciclo de Brayton produce O_2 diluido con CO_2 . En este caso, el CO_2 con el que se diluye el O_2 puede obtenerse del aire atmosférico o puede producirse por la combustión con hidrocarburo en el segundo ciclo de Brayton.

Según una realización preferida del método, siempre hay una etapa de enfriamiento después de cada etapa de compresión.

- 25 Según una realización preferida del método, se recupera calor de todas las fuentes residuales mediante combinación de los ciclos de Brayton primero y segundo realizando regeneraciones antes de cada enfriamiento.

- 30 Según una realización preferida del método, la energía mecánica producida por el segundo ciclo de Brayton se usa además para comprimir CO_2 producido hasta licuarlo. Por ejemplo, puede comprimirse el CO_2 hasta al menos 7,5 MPa. Además, el segundo ciclo de Brayton puede estar anidado con un ciclo de Otto, y el método comprende succionar y comprimir CO_2 sobrante acumulado en conductos del motor.

Según otra alternativa, el segundo ciclo de Brayton está anidado con un ciclo Diésel, y el método comprende comprimir el CO_2 , permitiendo la descarga de CO_2 y la admisión de O_2 sustancialmente puro, empleándose este último como gas de arrastre en membranas de separación selectivas de CO_2 .

- 35 Según una realización preferida, el método comprende además un ciclo de Brayton a vacío (CBV) para enfriar más intensamente el O_2 sustancialmente puro, o el O_2

diluido con CO₂, antes de una compresión posterior.

Según una realización preferida, el método comprende almacenar CO₂ licuado producido. Dicho CO₂ licuado puede usarse para bombear combustible hacia los cilindros del motor y/o puede transferirse a un surtidor de una red logística de CO₂ externa.

5 A continuación, se proporciona una descripción detallada de realizaciones preferidas de la presente invención, haciendo referencia a las figuras adjuntas, con el fin de ilustrar adicionalmente, y no de limitar, las enseñanzas divulgadas por la presente invención.

10 Realización 1: Motor de encendido provocado (SI) de mezcla premezclada sin emisiones de gases contaminantes y sin captura de CO₂

La realización 1 está indicada para motores de encendido provocado (SI) de mezcla premezclada (homogénea) sin captura de CO₂. La realización 1 se basa en un proceso de combustión por deflagración, con velocidad subsónica y sin auto-encendido
15 de la mezcla, para la producción de potencia mecánica neta.

El grado de carga (porcentaje del par máximo) del motor se controla por la tasa de producción de O₂ en la membrana MIEC (6). Esto reduce las pérdidas de bombeo al eliminar el uso de válvulas de mariposa para estrangular el flujo de aire.

La temperatura de combustión se controla por la dilución de la mezcla de
20 comburente (O₂) y combustible (HxCyOz) con CO₂ y H₂O procedente de la propia combustión y pre-enfriado. Esto evita el uso de combustible para esta tarea (práctica estándar en los SI actuales).

En la realización 1 no se propone capturar el CO₂ emitido por el motor. Pero proporciona una mejora de la eficiencia energética con respecto a los motores SI actuales
25 y elimina las emisiones de gases contaminantes (CO, THC, PM y NOx) en origen (cámara de combustión) y en la membrana MIEC (6), minimizando la necesidad de postratamiento para limpieza de los gases de escape, lo que supone un ahorro considerable del coste de producción del motor. En la actualidad se estima que el postratamiento para la limpieza de gases es del orden del 30% del coste total del grupo
30 moto-propulsor. Además, debido a la oxicomustión se garantiza que se minimizan las emisiones de gases contaminantes durante el proceso de arranque en frío. Esto no sucede en los motores actuales, debido al tiempo necesario para calentar (activar) los grandes sistemas de postratamiento necesarios para la limpieza de gases de escape.

La realización 1 se ha representado en la figura 1. En la realización 1 el aire
35 atmosférico entra al motor a través de un filtro (1) succionado por un compresor (C2) (2). El compresor C2 (2) forma parte de un turbogruppo y está acoplado mecánicamente a una

turbina de geometría variable (VGT2) (8). El compresor C2 (2) trasiega aire usando la energía que recupera la turbina VGT2 (8) del N_2 , CO_2 y H_2O rechazados en la membrana MIEC (6); y el CO_2 y H_2O no recirculados a los segundos cilindros (14) del motor, que circulan por el conducto que sale de una membrana MIEC catalítica (15) y confluye con el
5 conducto proveniente del rechazo de la membrana MIEC (6). En condiciones nominales el aire a la salida del compresor C2 (2) tiene una presión y una temperatura de 0,4 MPa y 473 K (199,85°C) aproximadamente. El aire pasa por un primer enfriador de carga del motor con agua (en inglés: "*water-cooler of air charge*", WCAC) (3). A la salida del primer enfriador WCAC (3) la temperatura desciende hasta 323 K (49,85°C) aproximadamente lo
10 que hace más isoterma la compresión posterior en los primeros cilindros (4) del motor.

Posteriormente se succiona el aire por la mitad de los primeros cilindros (4) del motor. En la realización 1 se representa un motor de 4 cilindros y 4 tiempos, con lo que son 2 cilindros los que succionan el aire. Los primeros cilindros (4) actúan como bombas comprimiendo el aire hasta aproximadamente 0,9 MPa y 473 K (199,85°C). Los primeros
15 cilindros (4) son preferiblemente idénticos al resto de cilindros del motor compartiendo el cigüeñal (25), el árbol de levas y la distribución, y teniendo como única singularidad que no se les inyecta combustible. Al ser un motor de 4 tiempos el aire permanece 4 carreras en el interior de los primeros cilindros (4) con lo que se comprime y se enfría con el agua de refrigeración del motor (aproximadamente a 363 K (89,85°C)) lo que contribuye a
20 hacer más isoterma la compresión. Estos primeros cilindros (4) funcionan como sistema de arranque del conjunto de turbomáquinas, para poner en marcha el flujo de aire y las turbinas del ciclo. Para ello se mueven, hasta el arranque del sistema, por un motor de arranque convencional de los usados en los motores alternativos.

A la salida de los primeros cilindros (4) el aire se calienta en un primer
25 regenerador (23) que baja su presión hasta 0,87 MPa y eleva su temperatura hasta aproximadamente 573 K (299,85°C), usando para ello la energía térmica de un flujo de CO_2 , H_2O y N_2 . Este flujo de N_2 , CO_2 y H_2O sale por el conducto (30) situado aguas abajo de la turbina VGT2 (8). Este flujo de N_2 , CO_2 y H_2O supone aproximadamente el 100% del caudal total de gases trasegados por el motor y se encuentra a una temperatura
30 aproximada de 800 K (526,85°C) y una presión de 0,1 MPa. A la salida del primer regenerador (23) el aire se calienta en un segundo regenerador (5) que baja su presión hasta 0,85 MPa y eleva su temperatura hasta aproximadamente 673 K (399,85°C), usando para ello la energía térmica del O_2 producido por la membrana MIEC (6) y de los gases de escape usados para arrastrar el O_2 intercambiado en la membrana MIEC (6) y
35 bajar la presión parcial del O_2 en la cámara de arrastre.

A la salida del segundo regenerador (5) el aire se calienta de nuevo en una

membrana MIEC catalítica (15) (esta membrana presenta un catalizador que favorece la oxidación completa del CO y los HC a CO₂ y H₂O con el O₂ del entorno) que baja su presión hasta 0,8 MPa y eleva su temperatura hasta aproximadamente 723 K (449,85°C), usando para ello la energía térmica de los gases de escape de la combustión de los segundos cilindros (14). En la membrana MIEC catalítica (15) los gases de escape ceden su calor al aire (actúa como regenerador) y tanto CO como HC se oxidan hasta que todo el flujo de gases está compuesto únicamente por CO₂ y H₂O. De este modo se reduce al 20% la necesidad de postratamiento para limpieza de gases de este motor, ya que este flujo de gases de escape supone aproximadamente el 20% del caudal total de gases de escape trasegados por el motor. Tras la membrana MIEC catalítica (15) el aire a 0,8 MPa de presión entra en la membrana MIEC (6) donde alcanza la temperatura de trabajo de la membrana MIEC (6) (aproximadamente 1173 K (899,85°C)) gracias al intercambio de calor con los gases de escape que provienen del proceso de oxidación de los segundos cilindros (14) y que se usan para barrer el O₂ intercambiado en la membrana MIEC (6). Este flujo de gases de escape que provienen del proceso de oxidación de los segundos cilindros (14) supone aproximadamente el 80% del caudal de gases de escape.

El rechazo de la membrana MIEC (6) es fundamentalmente N₂ a 0,8 MPa y 1173 K (899,85°C); supone aproximadamente el 80% de la masa de gas trasegada por el sistema y pasa por una turbina VGT1 (71) o por una válvula de control (72). La turbina VGT1 (71) y la válvula de control (72) forman parte de un turbogruppo junto con el compresor C1 (10), al cual está unida mecánicamente la turbina VGT1 (71). La turbina VGT1 (71) valoriza energéticamente el flujo de N₂ rechazado de la membrana MIEC (6), recuperando su energía para mover el compresor C1 (10). La válvula de control (72) regula el flujo de energía al compresor C1 (10). El compresor C1 (10) trasiega una mezcla de CO₂, H₂O y O₂ que proviene de la salida del arrastre de la membrana MIEC (6). El compresor C1 (10) trasiega aproximadamente el 95% del flujo de gases del motor. Como consecuencia, la válvula de control (72) regula el flujo de CO₂ y H₂O usado para diluir el O₂ y, por ende, la temperatura de combustión y de los gases de escape de la combustión. En conclusión, la temperatura de los gases de escape del motor, a la salida de los segundos cilindros (14), se regula por la válvula de control (72); y lo es a un valor aproximado de 1273 K (999,85°C) en condiciones nominales.

Normalmente, la válvula de control (72) trabaja parcialmente abierta para regular la presión del compresor C1 (10). Una parte del N₂ rechazado en la membrana MIEC (6) circula a través de la turbina VGT1 (71), expandiéndose y enfriándose. La otra parte del N₂ rechazado circula a través de la propia válvula de control (72), sin enfriarse. Esta otra

parte del N_2 se mezcla aguas abajo de la turbina VGT1 (71) con el N_2 frío y expandido, recalentándolo, y en consecuencia aumentando su temperatura.

Tras pasar por la válvula de control (72) y/o por la turbina (71) el N_2 de rechazo de la membrana MIEC (6) (aproximadamente el 80% del flujo de aire) se mezcla con el CO_2 y H_2O que provienen de la segunda válvula antirretorno (19) y ambos flujos se valorizan en la turbina de geometría variable VGT2 (8) que se usa para mover el compresor C2 (2). Las condiciones nominales aproximadas de entrada a la turbina VGT2 (8) son 0,3 MPa y 873 K (599,85°C). La geometría variable de la turbina VGT2 (8) se utiliza para regular el grado de carga del motor de combustión. Cuando la turbina VGT2 (8) se cierra aumenta el flujo de aire a través de la membrana MIEC (6) y la presión de trabajo en la membrana MIEC (6). Por lo tanto, aumenta la producción horaria de O_2 y la cantidad de combustible que se puede inyectar en condiciones estequiométricas. Sucede a la inversa cuando la turbina VGT2 (8) se abre. El tamaño mínimo (apertura mínima) de la turbina VGT2 (8) se elige en consonancia con la cilindrada del motor alternativo para fijar la potencia máxima del sistema a cada régimen de giro del motor. La apertura máxima de la turbina VGT2 (8) determina la carga mínima (en vacío) del motor alternativo a cada régimen de giro. La turbina VGT2 (8) también puede comprender una válvula de alivio (o WG). Cuando la turbina VGT2 (8) o su válvula de alivio se abren al máximo la energía del compresor C2 (2) se reduce a cero, con lo cual se reducen tanto la presión de trabajo de la membrana MIEC como el caudal de aire trasegado.

Si se desea reducir aún más la carga del motor, hasta bajarla a cero, entonces se abre la válvula de control (72) evitando la turbina VGT1 (71) con lo que la energía del compresor C1 (10) se reduce a cero. En este caso se detiene el flujo de gases de escape (en los que se encuentra el CO_2) hacia la membrana MIEC (6). Esto iguala la presión parcial del O_2 a ambos lados de la membrana MIEC (6) y detiene el flujo de producción de O_2 dejando en vacío la carga del motor de esta realización 1.

A la salida de la turbina VGT2 (8) la mezcla de N_2 , CO_2 y H_2O a presión de 0,1 MPa y temperatura de 800 K (526,85°C), aproximadamente, se hace pasar por el primer regenerador (23) para ceder su calor al aire antes de descargar esta mezcla de gases (exenta de gases nocivos para la salud) a la atmósfera.

La mezcla del O_2 , intercambiado por la membrana MIEC (6), y del CO_2 y H_2O , usados para arrastrar y bajar la presión parcial del O_2 , salen por el extremo correspondiente de la membrana MIEC (6), hacia los segundos cilindros (14) de combustión, succionada por el compresor C1 (10). Esta mezcla sale a una presión y temperatura nominales aproximadamente de 0,3 MPa y 1173 K (899,85°C) respectivamente, y supone aproximadamente el 105% del caudal de aire trasegado por el

motor. El calor de la mezcla de CO_2 , H_2O y O_2 se recupera primero en el segundo regenerador (5) para calentar el aire a la salida del primer regenerador (23). A la salida del segundo regenerador (5) tiene unas condiciones nominales de 0,25 MPa y 673 K (399,85°C) aproximadamente. Esta corriente se valoriza en una turbina de geometría variable (VGT3) (16) a la salida del segundo regenerador (5) que se usa para mover un compresor (C3) (12) acoplado mecánicamente en otro turbogrupo. El compresor C3 (12) se usa para sobrealimentar los segundos cilindros (14), como los turbosobrealimentadores al uso, usando la energía recuperada por la turbina VGT3 (16). La turbina VGT3 (16) se cierra para mantener constante la presión a la salida del compresor C3 (12) a un valor nominal de 0,6 MPa en cualquier condición de funcionamiento del motor. A la salida de la turbina VGT3 (16) las condiciones nominales del flujo son aproximadamente 0,1 MPa y 473 K (199,85°C). La mezcla comburente que continúa hacia los segundos cilindros (14) se enfría en un segundo enfriador WCAC (9) hasta 323 K (49,85°C). A continuación, se comprime en el compresor C1 (10) hasta 0,3 MPa y 473 K (199,85°C) siendo las condiciones del compresor C1 (10) las impuestas por la válvula de control (72) para mantener la temperatura de los gases de escape alrededor de los 1273 K (999,85°C), como ya se ha descrito. Después del compresor C1 (10), la mezcla de CO_2 , H_2O y O_2 se enfría de nuevo hasta 323 K (49,85°C) en un tercer enfriador WCAC (11) y se comprime en el compresor C3 (12) hasta 0,6 MPa y 473 K (199,85°C). Para ello se usa la energía de la turbina VGT3 (16) que regula la presión a la salida del compresor C3 (12) igual al 0,6 MPa, como ya se ha descrito. Finalmente, la mezcla se vuelve a enfriar en un cuarto enfriador WCAC (13) hasta 323 K (49,85°C) antes de succionarse por los segundos cilindros (14), que en esta realización son 2 por ser la mitad de los de un motor de 4 cilindros y cuatro tiempos que se ha usado como ejemplo; como se estableció al principio de la descripción de la presente realización.

En los segundos cilindros (14) se inyecta un hidrocarburo HxCyOz , con una bomba de combustible (26), a la mezcla de CO_2 , H_2O y O_2 en proporción estequiométrica con el O_2 . En dichos segundos cilindros (14) se realiza un ciclo de combustión premezclada de encendido provocado y similar al ciclo Otto. Los segundos cilindros (14) producen energía para mover los primeros cilindros (4) que trasiegan el aire para la membrana MIEC (6) pues están acoplados en el mismo cigüeñal (25). Los segundos cilindros (14) producen un excedente de energía mecánica neta que se usa para mover el vehículo al que se acopla el motor, o el generador eléctrico o cualquier aplicación que requiera un aporte de energía mecánica a través de un eje. Estos segundos cilindros (14) también funcionan como sistema de arranque del conjunto de turbomáquinas, para poner en marcha el flujo de aire; de O_2 y las turbomáquinas del ciclo. Para ello se mueven,

hasta el arranque del sistema, por un motor de arranque convencional de los usados en los motores alternativos. Así, tanto los primeros cilindros (4) como los segundos cilindros (14) funcionan como sistema de arranque y se mueven, hasta el arranque del sistema, por un motor de arranque convencional.

5 Las cesiones de calor al agua de los enfriadores WCAC primero (3), segundo (9), tercero (11) y cuarto (13) más el calor cedido en las regeneraciones (producidas en los regeneradores primero (23), segundo (5) y en la MIEC catalítica (15)) junto con la descarga a la atmosfera del excedente de gases de escape (es decir, los gases de escape no recirculados), a través de la bifurcación (29) y la segunda válvula antirretorno
 10 (19), suponen la cesión total de calor al foco frío necesaria para que el ciclo termodinámico propuesto cumpla el segundo principio de la termodinámica y sea, por tanto, viable. A su vez las cesiones de calor en los enfriadores WCAC primero (3), segundo (9), tercero (11) y cuarto (13) y en las regeneraciones (producidas en los regeneradores primero (23), segundo (5) y en la MIEC catalítica (15)) contribuyen a
 15 minimizar la destrucción de exergía del ciclo termodinámico debido, por una parte, a hacer el proceso de compresión global del fluido de trabajo más isotérmico y por otra a recuperar la energía de los gases de escape para la separación del aire. El acercamiento a la compresión isoterma y el uso de regeneradores para extraer el calor de los gases del sistema acercan el ciclo del N_2 , separado del aire en la membrana MIEC (6), a un ciclo
 20 con igual rendimiento al de Carnot conocido como ciclo Ericsson. El ciclo de la mezcla de $CO_2+H_2O+O_2$ se puede asimilar a un ciclo de Brayton cerrado con compresiones y expansiones intermedias, pero anidado con un ciclo Otto en los segundos cilindros (14); cosa no descrita hasta ahora en la bibliografía. En esencia el ciclo de Brayton cuasi-cerrado anidado con el ciclo de Otto y binario con el de N_2 (enviando calor al ciclo del N_2
 25 éste cumple los preceptos termodinámicos para aproximarse a un ciclo ideal de eficiencia máxima, como el ciclo Ericsson) es una novedosa realización de ciclo binario, que cumple los preceptos del otro ciclo ideal de eficiencia máxima, el de Carnot.

Finalmente, como resultado de la combustión del hidrocarburo (combustible) con la mezcla comburente (CO_2 , H_2O , O_2) se produce a la salida de los segundos cilindros
 30 (14) una mezcla de CO_2 , H_2O , y, en menor medida, THC sin quemar y CO .

La parte no recirculada de gases de escape se deriva por la bifurcación (29) para descargarse a la entrada de la turbina VGT2 (8). Este excedente supone aproximadamente el 20% de los gases de escape, que son una mezcla de CO_2 , H_2O , CO e hidrocarburos totales (THC) sin quemar. Aguas abajo de la bifurcación (29) y aguas
 35 arriba de la segunda válvula antirretorno (19) se encuentra la membrana MIEC catalítica (15) a la que los gases de escape entran a una temperatura aproximada de 1273 K

(999,85°C) y ceden su calor al 100% del flujo de aire que trasiega el motor, con lo cual su temperatura baja mucho, hasta aproximadamente los 623 K (349,85°C). A la vez, y debido a las reacciones químicas que se producen en la membrana MIEC catalítica (15) se oxidan el CO y los THC con el O₂ sobrante de la combustión hasta conformar vapor de H₂O y CO₂. Nuevamente, debido a que la oxicomustión evita la producción de NO_x en los segundos cilindros (14), la mezcla de H₂O y CO₂ formada en la membrana catalítica (15) se encuentra libre de gases nocivos (sin CO, sin THC y sin NO_x). Por lo tanto, la mezcla se descarga sin ningún gas nocivo para la salud.

Aguas abajo de la membrana MIEC catalítica (15) la mezcla de CO₂ y H₂O se descarga a través de una segunda válvula antirretorno (19) a la entrada de la turbina VGT2 (8). La segunda válvula antirretorno (19) está tarada a una presión aproximada de 0,11 MPa y sirve para evitar que durante los procesos transitorios pueda entrar aire o N₂ a la mezcla de gases comburentes. Aguas arriba de la segunda válvula antirretorno (19) se forma por lo tanto un volumen cerrado y separado de la atmósfera. Este volumen está formado por un circuito de conductos libres de N₂ que actúa como sistema de acumulación de mezcla comburente de CO₂+H₂O+O₂ tras la parada del motor. Esta mezcla acumulada facilita el arranque posterior del motor, pues ya existe un excedente de O₂ producido por la membrana MIEC (6), que puede usarse para arrancar la combustión en los segundos cilindros (14). La mezcla de N₂, CO₂ y H₂O se descarga finalmente a la atmósfera a través del conducto (30) pasando previamente por el primer regenerador (23) para extraer su calor, como ya se ha descrito.

El resto de los gases de escape no excedente (es decir, los gases de escape recirculados) supone aproximadamente el 80% del caudal de los mismos. Esta mezcla no excedente se succiona por el compresor C1 (10), el compresor C3 (12) y los propios segundos cilindros (14) para pasar a través de la membrana MIEC (6). En la membrana MIEC (6) los gases de escape recirculados, por una parte, cumplen la función indirecta de barrer y bajar la presión parcial del O₂ que atraviesa la membrana para mejorar la productividad de la membrana MIEC (6); por otra parte, cumple la función directa de reducir la proporción de O₂ en la mezcla comburente. De este modo se controla la temperatura de los gases de combustión, alrededor de 1273 K (999,85°C), a la salida de los segundos cilindros (14). De esta forma, a la salida de la membrana MIEC (6) se cierra el ciclo y la mezcla vuelve a la entrada del segundo regenerador (5) para transmitir su calor al aire.

En el proceso descrito el motor funciona de manera eficiente tanto por mantener el dosado siempre cercano al estequiométrico como por regular su carga sin estrangular el flujo, sino modulando el aire trasegado por el compresor C2 (2) y la productividad de la

membrana. La productividad de O_2 responde instantáneamente a las aceleraciones del motor pues los primeros cilindros (4) están acoplados mecánicamente en el mismo eje con los segundos cilindros (14). Por tanto, la respuesta dinámica del motor no sufre el retraso de los turbogrupos (“*turbocharger-lag*” en inglés) típico de los motores turbosobrealimentados. Finalmente, el motor sólo emite a la atmósfera una mezcla de: CO_2 y H_2O provenientes de la segunda válvula antirretorno (19); y N_2 , H_2O y CO_2 atmosféricos provenientes de la salida de la turbina VGT2 (8). Es decir no emite ningún gas nocivo para la salud que afecte perjudicialmente al proceso respiratorio de personas y animales.

10 Realización 2: Motor de encendido provocado (SI) de mezcla premezclada sin emisiones de gases contaminantes y con captura de CO_2 producido y retirada de CO_2 atmosférico

La realización 2 está indicada para motores de encendido provocado (SI) de mezcla premezclada (homogénea) con captura de CO_2 atmosférico y producido. Por tanto, se encuentra dentro de la categoría de motores que retiran CO_2 de la atmósfera (tasa de emisiones < 0). La realización 2 se basa en un proceso de combustión por deflagración, con velocidad subsónica y sin auto-encendido de la mezcla, para la producción de potencia mecánica neta.

El grado de carga (porcentaje del par máximo) del motor se controla por la tasa de producción de O_2 en la membrana MIEC (6). Esto reduce las pérdidas de bombeo al eliminar el uso de válvulas de mariposa para estrangular el flujo de aire.

La temperatura de combustión se controla por la dilución de la mezcla de comburente (O_2) y combustible ($H_xC_yO_z$) con CO_2 y H_2O procedente de la propia combustión y pre-enfriado. Esto evita el uso de combustible para esta tarea (práctica estándar en los SI actuales a alto régimen de giro y máxima potencia).

La realización 2 propone capturar el CO_2 emitido por el motor y reducir el contenido en CO_2 atmosférico de la forma más eficiente posible. Además, elimina las emisiones de gases contaminantes (CO, THC, PM y NO_x) en origen (cámara de combustión) o en la membrana MIEC minimizando la necesidad de postratamiento para limpieza de los gases de escape, lo que supone un ahorro considerable del coste de producción del motor. En la actualidad se estima que el postratamiento para la limpieza de gases es del orden del 30% del coste total del grupo moto-propulsor. Además, debido a la oxicomustión se garantiza que tampoco se emiten gases contaminantes durante el proceso de arranque en frío. Esto no sucede en los motores actuales, debido al tiempo necesario para calentar (activar) los sistemas de postratamiento para la limpieza de gases de escape.

La realización 2 se ha representado en las figuras 2a y 2b dependiendo de la

tecnología usada para extraer el CO_2 de la corriente de aire. En la realización 2 el aire atmosférico entra al motor a través de un filtro (1) succionado por un compresor (C2) (2). El compresor C2 (2) forma parte de un turbogrupo y está acoplado mecánicamente a una turbina de geometría variable (VGT2) (8). El compresor C2 (2) trasiega aire usando la energía que recupera la turbina VGT2 (8) del $\text{N}_2+\text{H}_2\text{O}$ rechazados en la membrana MIEC (6) en el caso de la figura 2a, o del $\text{N}_2+\text{H}_2\text{O}$ rechazados en una membrana de CO_2 (28) en el caso de la figura 2b. En condiciones nominales el aire a la salida del compresor C2 (2) tiene una presión y una temperatura de 0,4 MPa y 473 K (199,85°C) aproximadamente. El aire pasa por un primer enfriador de carga del motor con agua (WCAC) (3). A la salida del primer enfriador WCAC (3) la temperatura desciende hasta 323 K (49,85°C) aproximadamente, lo que hace más isoterma la compresión posterior en los primeros cilindros (4) del motor.

En la realización de la figura 2a el aire se limpia de CO_2 en una membrana de CO_2 (28) polimérica con una selectividad global CO_2/N_2 de alrededor de 2000 a la temperatura de trabajo a la salida del primer enfriador WCAC (3). Esto se consigue en la figura 2a gracias a que el CO_2 que atraviesa la membrana se arrastra por el vapor de agua procedente de un separador (17) que baja la presión parcial del CO_2 atmosférico permeado en la membrana de CO_2 (28). En la figura 2a, el CO_2 atmosférico y el agua usada para barrer la membrana de CO_2 (28) se unen a la corriente de O_2 y productos de la combustión en unos medios para llevar a cabo un ciclo de Brayton a vacío (CBV) (21). Concretamente, esto se produce a la salida de un quinto enfriador WCAC (31) como se muestra en la figura 5a, que representa el detalle interno del ciclo CBV y que se explicará más adelante.

En otra realización preferente mostrada en la figura 2b el aire no se encuentra con ninguna membrana de CO_2 a la salida del primer enfriador WCAC (3) y, por lo tanto, el contenido en CO_2 del aire no cambia. Para esta otra versión de la realización 2 este CO_2 se recoge aguas abajo.

Posteriormente se succiona el aire por los primeros cilindros (4) del motor. En la realización 2 se representa un motor de 5 cilindros y 4 tiempos, y son 2 cilindros los que succionan el aire. Los primeros cilindros (4) actúan como bombas comprimiendo el aire hasta aproximadamente 0,9 MPa y 473 K (199,85°C). Los primeros cilindros (4) son preferiblemente idénticos al resto de cilindros del motor compartiendo el cigüeñal (25), el árbol de levas y la distribución, y teniendo como única singularidad que no se les inyecta combustible. Al ser un motor de 4 tiempos el aire permanece 4 carreras en el interior de los primeros cilindros (4) con lo que se comprime y se enfría con el agua de refrigeración del motor (aproximadamente a 363 K (89,85°C)) lo que contribuye a hacer más isoterma

la compresión. Estos primeros cilindros (4) funcionan como sistema de arranque del conjunto de turbomáquinas, para poner en marcha el flujo de aire y las turbinas del ciclo. Para ello se mueven, hasta el arranque del sistema, por un motor de arranque convencional de los usados en los motores alternativos.

5 A la salida de los primeros cilindros (4) el aire se calienta en un primer regenerador (23) que baja su presión hasta 0,87 MPa y eleva su temperatura hasta aproximadamente 573 K (299,85°C), usando para ello la energía térmica de un flujo de CO₂ y de H₂O a la salida de un pistón adicional (22). A la salida del primer regenerador (23) el aire se calienta en un tercer regenerador (24) que baja su presión hasta 0,85 MPa
10 y eleva su temperatura hasta aproximadamente 673 K (399,85°C), usando para ello la energía térmica de un flujo de N₂ a una temperatura aproximada de 800 K (526,85°C) y una presión de 0,1 MPa procedente de la salida de la turbina VGT2 (8).

A la salida del tercer regenerador (24) el aire se calienta de nuevo en una membrana MIEC catalítica (15) que baja su presión hasta 0,8 MPa y eleva su
15 temperatura hasta aproximadamente 723 K (449,85°C) usando para ello la energía térmica de los gases de escape de la combustión de los segundos cilindros (14). En la membrana MIEC catalítica (15) los gases de escape ceden su calor al aire (actúa como regenerador) y tanto CO como HC se oxidan hasta que todo el flujo de gases está compuesto únicamente por CO₂ y H₂O. De este modo se reduce al 20% la necesidad de
20 postratamiento para limpieza de gases de este motor; ya que este flujo de gases de escape supone aproximadamente el 20% del caudal total de gases de escape trasegados por el motor. Tras la membrana MIEC catalítica (15) el aire se calienta de nuevo en un segundo regenerador (5) que baja su presión hasta 0,8 MPa y eleva su temperatura hasta aproximadamente 873 K (599,85°C) usando para ello la energía térmica del O₂
25 obtenido del aire por la membrana MIEC (6) y del CO₂ usado para arrastrar el O₂ que atraviesa la membrana MIEC (6) y bajar la presión parcial del O₂ en la cámara de arrastre.

Tras el segundo regenerador (5), el aire a 0,8 MPa y 873 K (599,85°C) se inyecta en la membrana MIEC (6) de O₂ donde alcanza la temperatura de trabajo de la
30 membrana MIEC (6) (aproximadamente 1173 K (899,85°C)) gracias al intercambio de calor con el CO₂ y el H₂O que proviene del proceso de oxidación y que se usa para barrer el lado del O₂.

En el caso de la realización de la figura 2b, el aire empobrecido en O₂, rechazado en la membrana MIEC (6) de O₂ entra, a aproximadamente 1173 K (899,85°C) y 0,8 MPa,
35 en una membrana de CO₂ (28) (basada en carbonatos fundidos con una selectividad global CO₂/N₂ de alrededor de 2500 a la temperatura de trabajo) donde se separa el CO₂

atmosférico de la corriente de N_2+H_2O . Esto se consigue gracias a que el CO_2 se barre por el vapor de agua procedente del separador (17) que baja la presión parcial del CO_2 atmosférico permeado en la membrana. En la figura 2b, el CO_2 atmosférico permeado se une a la mezcla del O_2 producido por la membrana MIEC (6) y del CO_2 y H_2O procedentes de la combustión de los segundos cilindros (14) y usados para barrer la membrana MIEC (6) y bajar la presión parcial del O_2 .

En la otra versión de la realización preferente mostrada en la figura 2a, el rechazo de la membrana MIEC(6) de O_2 no se encuentra aguas abajo con ninguna membrana de CO_2 , porque el aire ya se ha limpiado previamente de CO_2 en la membrana de CO_2 (28), tal y como se ha explicado previamente.

El rechazo de la membrana MIEC (6) de O_2 , en el caso de la realización de la figura 2a, y el rechazo de la membrana de CO_2 (28), en la realización de la figura 2b, están ambos prácticamente libres de CO_2 atmosférico y son N_2+H_2O atmosféricos a 0,75 MPa y 1173 K (899,85°C). Cada uno de dichos rechazos, supone aproximadamente el 80% de la masa de aire trasegada por el sistema y se hace pasar por la turbina VGT1 (71) y/o por la válvula de control (72).

La turbina VGT1 (71) y la válvula de control (72) forman parte de un turbogrupo junto con el compresor C1 (10), al cual está unida mecánicamente la turbina VGT1 (71). La turbina VGT1 (71) valoriza energéticamente el flujo de N_2 rechazado de la membrana MIEC (6), recuperando su energía para mover el compresor C1 (10). La válvula de control (72) regula el flujo de energía al compresor C1 (10). El compresor C1 (10) trasiega el CO_2 de barrido de la membrana MIEC (6), por lo tanto trasiega una mezcla de CO_2 , H_2O y O_2 . El compresor C1 (10) trasiega aproximadamente el 95% del flujo de gases del motor. Como consecuencia, la válvula de control (72) regula el flujo de CO_2 y H_2O usado para diluir el O_2 y, por ende, la temperatura de combustión y de los gases de escape de la combustión. En conclusión, la temperatura de los gases de escape del motor, a la salida de los segundos cilindros (14), se regula por la válvula de control (72); y lo es a un valor aproximado de 1273 K (999,85°C) en condiciones nominales.

Normalmente, la válvula de control (72) trabaja parcialmente abierta para regular la presión del compresor C1 (10). Una parte del N_2 rechazado en la membrana MIEC (6) circula a través de la turbina VGT1 (71), expandiéndose y enfriándose. La otra parte del N_2 rechazado circula a través de la propia válvula de control (72), sin enfriarse. Esta otra parte del N_2 se mezcla aguas abajo de la turbina VGT1 (71) con el N_2 frío y expandido, recalentándolo, y en consecuencia aumentando su temperatura.

Tras pasar por la válvula de control (72) y/o por la turbina (71) el N_2+H_2O de rechazo de las membranas MIEC (el 80% del flujo de aire) se valoriza en la turbina de

geometría variable VGT2 (8) que se usa para mover el compresor C2 (2). Las condiciones nominales aproximadas de entrada a la turbina VGT2 (8) son 0,3 MPa y 823 K (549,85°C). La geometría variable de la turbina VGT2 (8) se utiliza para regular el grado de carga del motor de combustión. Cuando la turbina VGT2 (8) se cierra aumenta el flujo de aire a través de la membrana MIEC (6) y la presión de trabajo en la membrana MIEC (6). Por lo tanto aumenta la producción horaria de O₂ y la cantidad de combustible que se puede inyectar en condiciones estequiométricas. Sucede a la inversa cuando la turbina VGT2 (8) se abre. El tamaño mínimo (apertura mínima) de la turbina VGT2 (8) se elige en consonancia con la cilindrada del motor alternativo para fijar la potencia máxima del sistema a cada régimen de giro del motor. La apertura máxima de la turbina VGT2 (8) determina la carga mínima (en vacío) del motor alternativo a cada régimen de giro. La turbina VGT2 (8) también puede comprender una válvula de alivio (o WG). Cuando la turbina VGT2 (8) o su válvula de alivio se abren al máximo la energía del compresor C2 (2) se reduce a cero con lo cual se reducen tanto la presión de trabajo de la membrana MIEC como el caudal de aire trasegado considerablemente.

Si se desea reducir aún más la carga del motor hasta bajarla a cero, entonces se abre la válvula de control (72) evitando la turbina VGT1 (71) con lo que la energía del compresor C1 (10) se reduce a cero. En este caso se detiene el flujo de CO₂ y H₂O hacia la membrana MIEC (6). Esto iguala la presión parcial del O₂ a ambos lados de la membrana MIEC (6) y detiene el flujo de producción de O₂ dejando en vacío la carga del motor de esta realización 2.

A la salida de la turbina VGT2 (8) la mezcla de N₂ y H₂O a presión de 0,1 MPa y temperatura de 800 K (526,85°C), aproximadamente, se hace pasar por el tercer regenerador (24) para ceder su calor al aire antes de descargar esta mezcla de gases (exenta de gases nocivos para la salud) a la atmósfera.

La mezcla del O₂ intercambiado por la membrana MIEC (6) y del CO₂ y H₂O, usados para barrer y bajar la presión parcial del O₂ que atraviesa la membrana, salen por el extremo correspondiente de la membrana MIEC (6), hacia los segundos cilindros (14) de combustión, succionada por el compresor C1 (10). Para la versión de la realización 2 basada en membranas de carbonatos fundidos para recoger el CO₂ atmosférico (figura 2b), es en este punto (a la salida de la membrana MIEC (6)) donde dicha mezcla (mezcla del O₂ intercambiado por la membrana MIEC (6) y del CO₂ y H₂O, usados para barrer y bajar la presión parcial del O₂ que atraviesa la membrana) se mezcla a su vez con el CO₂ atmosférico y el vapor de agua usado para barrerlo. Esta mezcla sale a una presión y temperatura nominales aproximadamente de 0,1 MPa y 1173 K (899,85°C) respectivamente; y supone aproximadamente el 80% del caudal de aire trasegado por el

motor. El calor de la mezcla de CO_2 , H_2O y O_2 se recupera primero en el segundo regenerador (5) para calentar el aire a la salida de la membrana MIEC catalítica (15). A la salida del segundo regenerador (5) tiene unas condiciones nominales de 0,08 MPa y 723 K (449,85°C) aproximadamente.

5 Seguidamente la mezcla fluye a través de unos medios para llevar a cabo un ciclo de Brayton a vacío (CBV) (21). Los medios para llevar a cabo un ciclo de Brayton a vacío (CBV) (21) tienen la función de enfriar la mezcla transformando su temperatura en presión y recuperando la pérdida de presión causada por el segundo regenerador (5). Los medios para llevar a cabo un ciclo de Brayton a vacío (CBV) (21) están compuestos por
 10 una turbina VGT3 (16) acoplada mecánicamente con un compresor C3 (12) con el que forma un turbogruppo. Entre la salida de la turbina VGT3 (16) y la entrada del compresor C3 (12) hay un quinto enfriador WCAC (31). Para la versión de la realización 2 que se basa en membranas poliméricas para recoger el CO_2 atmosférico (figura 2a), es a la salida del quinto enfriador WCAC (31) donde se mezcla el O_2 y CO_2 de la combustión con
 15 el CO_2 atmosférico y el agua usado para barrerlo. En la figura 2b el CO_2 atmosférico ya forma parte de la mezcla comburente en este punto. El detalle interno de los medios para llevar a cabo un ciclo de Brayton a vacío (CBV) (21) puede verse en la figura 5a y su ciclo de funcionamiento en el diagrama T-s de la figura 5b). La mezcla de CO_2 , H_2O y O_2 se expande para valorizarse energéticamente en la turbina VGT3 (16); se enfría en el quinto
 20 enfriador WCAC (31), sufriendo una ligera pérdida de carga, y se comprime en el compresor C3 (12), acoplado mecánicamente con la turbina VGT3 (16). A la salida del compresor C3 (12) la mezcla está más fría y a más presión que a la entrada de la turbina VGT3 (16).

Las condiciones nominales de la mezcla comburente a la salida del compresor C3
 25 (12) son aproximadamente 0,1 MPa y 523 K (249,85°C). La mezcla comburente, que continúa su camino hacia los segundos cilindros (14), se enfría en el segundo enfriador WCAC (9) hasta 323 K (49,85°C). A continuación se comprime en el compresor C1 (10) hasta 0,3 MPa y 473 K (199,85°C) siendo las condiciones del compresor C1 (10) las impuestas por la válvula de control (72) para mantener la temperatura de los gases de
 30 escape alrededor de los 1273 K (999,85°C), como ya se ha descrito. Después del compresor C1 (10) la mezcla de CO_2 , H_2O y O_2 se vuelve a enfriar en el tercer enfriador WCAC (11) hasta 323 K (49,85°C) antes de succionarse por los segundos cilindros (14). Estos cilindros son 2 de los 5 que tiene el motor de cuatro tiempos usado como ejemplo; como se estableció al principio de la descripción de la realización 2.

35 En los segundos cilindros (14) se inyecta un hidrocarburo HxCyOz , con una bomba de combustible (26), a la mezcla comburente de CO_2 , H_2O y O_2 en proporción

estequiométrica con el O_2 . En dichos segundos cilindros (14) se realiza un ciclo de combustión premezclada de encendido provocado y similar al ciclo Otto. Los segundos cilindros (14) producen energía para mover los primeros cilindros (4) que trasiegan el aire para la membrana MIEC (6) y el pistón adicional (22), que comprime para densificar el CO_2 y H_2O residuales, pues están todos acoplados en el mismo cigüeñal (25). Los segundos cilindros (14) producen además un excedente de energía mecánica neta que se usa para mover el vehículo al que se acopla el motor, o el generador eléctrico o cualquier aplicación que requiera un aporte de energía mecánica a través de un eje. Estos segundos cilindros (14) funcionan como sistema de arranque del conjunto de turbomáquinas, para poner en marcha el flujo de aire y las turbinas del ciclo. Para ello se mueven, hasta el arranque del sistema, por un motor de arranque convencional de los usados en los motores alternativos.

Las cesiones de calor al agua de los enfriadores WCAC primero (3), segundo (9), tercero (11), cuarto (13), quinto (31) y sexto (18) más el calor cedido en las regeneraciones (producidas en los regeneradores primero (23), segundo (5), tercero (24) y en la MIEC catalítica (15)) junto con la densificación y captura del excedente de CO_2 y H_2O , suponen la cesión total de calor al foco frío necesaria para que el ciclo termodinámico propuesto cumpla el segundo principio de la termodinámica y sea, por tanto, viable. A su vez las cesiones de calor en los enfriadores WCAC primero (3), segundo (9), tercero (11), cuarto (13), quinto (31) y sexto (18), y en las regeneraciones (producidas en los regeneradores primero (23), segundo (5), tercero (24) y en la MIEC catalítica (15)) contribuyen a minimizar la destrucción de exergía del ciclo termodinámico debido, por una parte, a hacer el proceso de compresión global del fluido de trabajo más isotérmico y por otra a recuperar la energía de los gases de escape para la separación del aire. El acercamiento a la compresión isoterma y el uso de regeneradores para extraer el calor del CO_2+H_2O acercan el ciclo del N_2 en la membrana MIEC (6) a un ciclo con igual rendimiento al de Carnot conocido como ciclo Ericsson. El ciclo de la mezcla de $CO_2+H_2O+O_2$ se puede asimilar a un ciclo de Brayton cerrado con compresiones y expansiones intermedias, pero anidado con un ciclo Otto en los segundos cilindros (14); cosa no descrita hasta ahora en la bibliografía. En esencia el ciclo de Brayton cuasi-cerrado anidado con el ciclo de Otto y binario con el de N_2 (enviando calor al ciclo del N_2 éste cumple los preceptos termodinámicos para aproximarse a un ciclo ideal de eficiencia máxima, como el ciclo Ericsson) es una novedosa realización de ciclo binario; que cumple los preceptos del otro ciclo ideal de eficiencia máxima, el de Carnot.

Como resultado de la combustión del hidrocarburo (combustible) con la mezcla comburente (CO_2 , H_2O , O_2) se produce a la salida de los segundos cilindros (14) una

mezcla de CO₂, H₂O, THC sin quemar y CO. Por un lado, el 80% de estos gases de escape se succiona por el compresor C1 (10) y los propios segundos cilindros (14) para pasar a través de la membrana MIEC (6). En la membrana MIEC (6), por una parte cumple la función de barrer y bajar la presión parcial del O₂ para mejorar el transporte de O₂ de la membrana MIEC (6); por otra parte, la mezcla con CO₂ rebaja la temperatura de la combustión a límites tolerables para los materiales de los motores de combustión interna alternativos (MCIA). De esta forma, a la salida de la membrana MIEC (6) se cierra el ciclo y la mezcla vuelve a la entrada del segundo regenerador (5) para transmitir su calor al aire. En el proceso descrito el motor funciona de manera eficiente tanto por mantener el dosado siempre cercano al estequiométrico como por regular su carga sin estrangular el flujo, sino modulando la producción de O₂ de la membrana. La productividad de la membrana responde instantáneamente a las aceleraciones del motor pues los primeros cilindros (4) están acoplados mecánicamente en el mismo eje con los segundos cilindros (14). Por tanto, la respuesta dinámica del motor no está condicionada por el retraso de los MCIA turbo-sobrealimentados, debido a la inercia mecánica del turbogrupo.

Por otro lado, el 20% restante de los gases de escape, que son una mezcla de: CO₂, H₂O, THC sin quemar y CO, se oxida con el O₂ sobrante de la combustión en la membrana MIEC catalítica (15) a la que entran a una temperatura aproximada de 1273 K (999,85°C) y ceden su calor al 100% del flujo de aire que trasiega el motor, con lo cual su temperatura baja mucho, hasta aproximadamente los 703 K (429,85°C). A la vez, y debido a las reacciones químicas que se producen en la membrana MIEC catalítica (15), se oxidan el CO y los THC con el O₂ sobrante de la combustión hasta vapor de H₂O y CO₂, y, nuevamente, debido a la oxicomustión se evita la producción de NO_x en los segundos cilindros (14). Por lo tanto, la mezcla se descarga sin ningún gas nocivo para la salud (sin CO, sin THC y sin NO_x).

A continuación, se instala una primera válvula antirretorno (33) para evitar la salida de reflujos del pistón adicional (22). El pistón adicional (22) es movido por el cigüeñal (25) y comprime este 20% del caudal (el mencionado 20% restante de los gases de escape) hasta los 7,5 MPa. La presión de 7,5 MPa viene regulada por una segunda válvula antirretorno (19) y su muelle de tarado. La compresión se realiza de forma casi isoterma en las cuatro carreras del pistón adicional (22), desde que abre la válvula de admisión para succionar la mezcla de CO₂ y vapor de H₂O hasta que abre la de escape para descargarla. La mezcla comprimida hasta los 7,5 MPa se descarga a una temperatura de aproximadamente 673 K (399,85°C), debe mantenerse por encima de los 573 K (299,85°C) que es la temperatura de saturación del agua a 7,5 MPa para

garantizar que ésta sigue en estado gas dentro del pistón adicional (22).

La mezcla se enfría primero en el primer regenerador (23) y luego en el cuarto enfriador WCAC (13) hasta los 473 K (199,85°C) con lo que el H₂O pasa a estado líquido. La masa de agua líquida a 7,5 MPa y 473 K (199,85°C) supone aproximadamente el 2% del caudal total de masa trasegada por el motor. A continuación, el agua líquida se separa del CO₂ gas en el separador (17), que puede ser un separador inercial con una válvula de laminación de presión a la salida. También puede usarse como separador (17) una membrana polimérica, si el agua se mantuviese en estado gaseoso. El agua separada a una presión de 0,1 MPa y 473 K (199,85°C) aproximadamente se valoriza energéticamente usándose como fluido tractor en la membrana de CO₂ (28). El vapor de agua barre el lado del CO₂, bajando su presión parcial por dilución. Una tercera válvula antirretorno (32), que conecta el circuito de H₂O procedente de la combustión con la atmósfera, regula la presión del vapor de agua, manteniendo ésta igual a la presión barométrica. Además, permite la purga a la atmósfera del exceso de vapor de agua generado en las sucesivas combustiones del motor.

Tras separarse el H₂O, el exceso de CO₂, ya con alta pureza, se enfría en un sexto enfriador WCAC (18) por debajo de su temperatura crítica, 303 K (29,85°C). El CO₂ líquido pasa a través de la segunda válvula antirretorno (19) y se almacena a 7,5 MPa en un primer depósito (20) con temperatura controlada por debajo de 303 K (29,85°C). Cuando este depósito se llena la autonomía del motor finaliza. El depósito se mantiene a temperaturas subcríticas del CO₂ (< 303 K (29,85°C)) usando si es necesario un circuito frigorífico como el que produce el aire acondicionado del vehículo. El depósito se descarga en la estación de servicio, intercambiándose por un depósito de combustible. El CO₂ líquido puede nuevamente convertirse en un hidrocarburo (como en los combustibles sintéticos llamados e-Diesel, Blue-crude, etc.); suministrarse como producto a la industria química; suministrarse como fluido refrigerante a la industria frigorífica o almacenarse en sumideros controlados. Pero no se emite a la atmósfera. La no emisión del CO₂ a la atmósfera permite determinar que la presente realización 2 es un motor con emisiones netas negativas pues ha retirado CO₂ atmosférico y no ha emitido el que se produce en su proceso de combustión.

Realización 3: Motor de encendido por compresión (CI); de mezcla estratificada y combustión por difusión; con relación de compresión efectiva variable controlada por la tasa de producción de O₂; sin emisiones de gases contaminantes y sin captura de CO₂

La realización 3 está indicada para motores de encendido por compresión (CI) de mezcla estratificada (combustión por difusión) sin emisión de contaminantes y sin captura

de CO₂. Para la producción de potencia mecánica neta, la realización 3 se basa en un proceso de combustión por difusión, con auto-encendido por detonación de la premezcla y velocidad de combustión controlada por la cantidad de movimiento de los chorros de combustible.

5 El grado de sobrealimentación afecta al porcentaje del par máximo a cada régimen a través de la relación de compresión efectiva del ciclo. Esta relación de compresión efectiva es variable y está controlada por la tasa de producción de O₂ en la membrana MIEC. Esto supone un concepto de reducción de tamaño, pudiendo disminuirse la cilindrada del motor y acercar el proceso de compresión efectivo del aire en
10 turbomáquinas y cilindros al proceso isoterma.

La temperatura de combustión se controla por la dilución de la mezcla pre-enfriada de comburente (O₂) y combustible (HxCyOz) con CO₂ y H₂O procedente de la propia combustión. Esta mezcla con altas tasas de gases de escape recirculados (EGR en inglés) también ayuda a aumentar la tasa de producción de O₂ en la membrana MIEC
15 (6) de O₂ por bajar la presión parcial de la misma.

En la realización 3 no se propone capturar el CO₂ emitido por el motor sino eliminar las emisiones de gases contaminantes (CO, THC, PM y NO_x) en origen (cámara de combustión) o en la membrana MIEC, sin necesidad de postratamiento para limpieza de los gases de escape, lo que supone un ahorro considerable del coste de producción
20 del motor. En la actualidad se estima que el postratamiento para la limpieza de gases es del orden del 30% del coste total del grupo moto-propulsor. Además, debido a la oxicomustión se garantiza que tampoco se emiten gases contaminantes durante el proceso de arranque en frío. Esto no sucede en los motores actuales, debido al tiempo necesario para calentar (activar) los sistemas de postratamiento para la limpieza de
25 gases de escape.

La realización 3 se ha representado en la figura 3. En la realización 3 el aire atmosférico entra al motor a través de un filtro (1) succionado por un compresor (C2) (2). El compresor C2 (2) forma parte de un turbogruppo y está acoplado mecánicamente a una turbina de geometría variable (VGT2) (8). El compresor C2 (2) trasiega aire usando la
30 energía que recupera la turbina VGT2 (8) del N₂ rechazado en la membrana MIEC (6). En condiciones nominales, el aire a la salida del compresor C2 (2) tiene una presión y una temperatura de 0,4 MPa y 473 K (199,85°C) aproximadamente. El aire pasa por un primer enfriador de carga del motor con agua (WCAC) (3). A la salida del primer enfriador WCAC (3) la temperatura desciende hasta 323 K (49,85°C) aproximadamente lo que hace más
35 isoterma la compresión posterior en los primeros cilindros (4) del motor.

Posteriormente se succiona el aire por la mitad de los primeros cilindros (4) del

motor. En la realización 3 se representa un motor de 4 cilindros y 4 tiempos, con lo que son 2 cilindros los que succionan el aire. Los primeros cilindros (4) actúan como bombas comprimiendo el aire hasta aproximadamente 0,8 MPa y 473 K (199,85°C). Los primeros cilindros (4) son preferiblemente idénticos al resto de cilindros del motor compartiendo el cigüeñal (25), el árbol de levas y la distribución, y teniendo como única singularidad que no se les inyecta combustible. Al ser un motor de 4 tiempos el aire permanece 4 carreras en el interior de los primeros cilindros (4) con lo que se comprime y se enfría con el agua de refrigeración del motor (aproximadamente a 363 K (89,85°C)) lo que contribuye a hacer más isoterma la compresión. Estos primeros cilindros (4) funcionan como sistema de arranque del conjunto de turbomáquinas, para poner en marcha el flujo de aire y las turbinas del ciclo. Para ello se mueven, hasta el arranque del sistema, por un motor de arranque convencional de los usados en los motores alternativos.

A la salida de los primeros cilindros (4) el aire se calienta en un primer regenerador (23) que baja su presión hasta 0,77 MPa y eleva su temperatura hasta aproximadamente 673 K (399,85°C); usando para ello la energía térmica de un flujo de CO₂, H₂O y N₂. Este flujo de N₂, CO₂ y H₂O sale a la atmósfera por el conducto (30) situado aguas abajo de la turbina VGT2 (8). Este flujo de N₂, CO₂ y H₂O supone aproximadamente el 80% del caudal total de aire trasegado por el motor y se encuentra a una temperatura aproximada de 800 K (526,85°C) y una presión de 0,1 MPa. A la salida del primer regenerador (23) el aire se calienta en un segundo regenerador (5) que eleva su temperatura hasta aproximadamente 973 K (699,85°C) usando para ello la energía térmica del O₂ producido por la membrana MIEC (6) y del CO₂ usado para barrer la membrana MIEC (6) y bajar la presión parcial del O₂. Tras el segundo regenerador (5) el aire a 0,75 MPa de presión entra en la membrana MIEC (6) donde alcanza la temperatura de trabajo de la membrana MIEC (6) (aproximadamente 1223 K (949,85°C)) gracias al intercambio de calor con el CO₂ y el H₂O que proviene del proceso de oxidación y que se usa para barrer el O₂.

El rechazo de la membrana MIEC (6) es fundamentalmente N₂ a 0,7 MPa y 1173 K (899,85°C); supone aproximadamente el 80% de la masa de aire trasegada por el sistema y pasa por la turbina VGT1 (71) y/o por la válvula de control (72). La turbina VGT1 (71) y la válvula de control (72) forman parte de un turbogrupo junto con el compresor C1 (10), al cual está unida mecánicamente la turbina VGT1 (71). La turbina VGT1 (71) valoriza energéticamente el flujo de N₂ rechazado de la membrana MIEC (6), recuperando su energía para mover el compresor C1 (10). La válvula de control (72) regula el flujo de energía al compresor C1 (10). El compresor C1 (10) trasiega el CO₂+H₂O de barrido de la membrana MIEC (6), por lo tanto trasiega una mezcla de CO₂,

H₂O y O₂. El compresor C1 (10) trasiega aproximadamente el 95% del flujo de gases del motor. Como consecuencia, la válvula de control (72) regula el flujo de CO₂ y H₂O usado para diluir el O₂ y por ende la temperatura de combustión y de los gases de escape de la combustión. En conclusión, la temperatura de los gases de escape del motor, a la salida
 5 de los segundos cilindros (14), se regula por la válvula de control (72); y lo es a un valor aproximado de 1223 K (949,85°C) en condiciones nominales.

Normalmente, la válvula de control (72) trabaja parcialmente abierta para regular la presión del compresor C1 (10). Una parte del N₂ rechazado en la membrana MIEC (6) circula a través de la turbina VGT1 (71), expandiéndose y enfriándose. La otra parte del
 10 N₂ rechazado circula a través de la propia válvula de control (72), sin enfriarse. Esta otra parte del N₂ se mezcla aguas abajo de la turbina VGT1 (71) con el N₂ frío y expandido, recalentándolo, y en consecuencia aumentando su temperatura.

Tras pasar por la válvula de control (72) y/o por la turbina (71) el N₂ de rechazo de la membrana MIEC (6) (el 80% del flujo de aire) se valoriza en la turbina de geometría
 15 variable VGT2 (8) que se usa para mover el compresor C2 (2). Las condiciones nominales aproximadas de entrada a la turbina VGT2 (8) son 0,3 MPa y 823 K (549,85°C). La geometría variable de la turbina VGT2 (8) se utiliza para regular el caudal de aire trasegado por la membrana MIEC (6) y por tanto el caudal de O₂ producido. Cuando la turbina VGT2 (8) se cierra aumenta el flujo de aire a través de la membrana
 20 MIEC (6) y la presión de trabajo en la membrana MIEC (6). Por lo tanto aumenta la producción horaria de O₂ (a igualdad de tasa) y la cantidad de combustible que se podría inyectar en condiciones estequiométricas. Sucede a la inversa cuando la turbina VGT2 (8) se abre. El tamaño mínimo (apertura mínima) de la turbina VGT2 (8) se elige en consonancia con la cilindrada del motor alternativo para fijar la potencia máxima del
 25 sistema a cada régimen de giro del motor. La apertura máxima de la turbina VGT2 (8) determina el caudal mínimo de O₂ (en vacío) del motor alternativo a cada régimen de giro. La turbina VGT2 (8) también puede comprender una válvula de alivio (o WG). Cuando la turbina VGT2 (8) o su válvula de alivio se abren al máximo la energía del compresor C2 (2) se reduce a cero con lo cual se reducen tanto la presión de trabajo de la membrana
 30 MIEC como el caudal de aire trasegado considerablemente.

Si se desea reducir aún más el caudal de O₂ del motor hasta bajarlo a cero, entonces se abre la válvula de control (72) evitando la turbina VGT1 (71) con lo que la energía del compresor C1 (10) se reduce a cero. Esto prácticamente iguala la presión parcial del O₂ a ambos lados de la membrana MIEC (6) y minimiza la tasa de producción
 35 de O₂ dejando en vacío la carga del motor de esta realización 3.

Se puede decir que la válvula de control (72) proporciona una regulación

cualitativa del flujo de O_2 actuando sobre la tasa de producción y la turbina VGT2 (8) proporciona una regulación cuantitativa actuando sobre el caudal trasegado de aire. Ambos controles proporcionan una regulación muy amplia y muy fina de la relación de compresión efectiva del cilindro en el punto muerto superior de los segundos cilindros (14) sin que cambie la relación de compresión volumétrica de los mismos. Esto se conoce comúnmente en los motores alternativos como relación de compresión variable.

A la salida de la turbina VGT2 (8) la mezcla de N_2 , CO_2 y H_2O a presión de 0,1 MPa y temperatura de 800 K (526,85°C), aproximadamente, se hace pasar por el primer regenerador (23) para ceder su calor al aire antes de descargar esta mezcla de gases (exenta de gases nocivos para la salud) a la atmósfera.

La mezcla del O_2 producido por la membrana MIEC (6) y del CO_2 y H_2O , usados para barrerla y bajar la presión parcial del O_2 , sale por el extremo correspondiente de la membrana MIEC (6), hacia los segundos cilindros (14) de combustión, succionada por el compresor C1 (10). Esta mezcla sale a una presión y temperatura nominales aproximadamente de 0,35 MPa y 1223 K (949,85°C) respectivamente; y supone aproximadamente el 115% del caudal de aire trasegado por el motor. El calor de la mezcla de CO_2 , H_2O y O_2 se recupera primero en el segundo regenerador (5) para calentar el aire que proviene de la salida del primer regenerador (23). A la salida del segundo regenerador (5) la mezcla comburente tiene unas condiciones nominales de 0,3 MPa y 700 K (426,85°C) aproximadamente. Esta presión y temperatura se valorizan en una turbina de geometría variable (VGT3) (16) que se usa para mover un compresor (C3) (12) con el cual está acoplada mecánicamente en otro turbogruppo. El compresor C3 (12) se usa para sobrealimentar los segundos cilindros (14), como los turbo-sobrealimentadores al uso, usando la energía recuperada por la turbina VGT3 (16). La turbina VGT3 (16) se regula para mantener constante e igual a 0,6 MPa la presión aguas abajo del compresor C3 (12).

Aguas abajo de la turbina VGT3 (16) las condiciones nominales a la salida de la turbina VGT3 (16) son aproximadamente 0,1 MPa y 473 K (199,85°C). A la salida de la turbina VGT3 (16) se encuentra una bifurcación que descarga la mezcla excedente de CO_2 , vapor de H_2O y O_2 a la atmósfera sin ningún gas contaminante (sin CO, sin THC y sin NO_x). Esto se consigue gracias a la catálisis del CO y el THC hasta vapor de H_2O y CO_2 que se produce en la membrana MIEC (6) y a la oxicomustión que evita la producción de NO_x .

La descarga se realiza a través de una segunda válvula antirretorno (19) tarada a una presión de 0,11 MPa para evitar que durante los procesos transitorios pueda entrar aire o N_2 a la mezcla de gases comburentes. Aguas arriba de la segunda válvula

antirretorno (19) se forma por lo tanto un circuito cerrado y separado de la atmósfera. Este volumen está formado por un circuito de conductos libres de N_2 que actúa como sistema de acumulación de mezcla comburente de $CO_2+H_2O+O_2$ tras la parada del motor. Esta mezcla acumulada facilita el arranque posterior del motor, pues ya existe un
5 excedente de O_2 producido por la membrana MIEC (6), que puede usarse para arrancar la combustión en los segundos cilindros (14).

Con la bifurcación (29) y la segunda válvula antirretorno (19), las condiciones nominales de presión a la salida de la turbina VGT3 (16) son de 0,11 MPa y la temperatura es de unos 473 K (199,85°C). La mezcla no excedente que continúa hacia
10 los segundos cilindros (14) se enfría en un segundo enfriador WCAC (9) hasta 323 K (49,85°C). A continuación, se comprime en el compresor C1 (10) hasta 0,3 MPa y 473 K (199,85°C) siendo las condiciones del compresor C1 (10) las impuestas por la válvula de control (72) para mantener la temperatura de los gases de escape alrededor de los 1223 K (949,85°C), como ya se ha descrito. Después del compresor C1 (10) la mezcla de CO_2 ,
15 H_2O y O_2 se enfría de nuevo hasta 323 K (49,85°C) en el tercer enfriador WCAC (11) y se comprime en el compresor C3 (12) hasta 0,6 MPa y 473 K (199,85°C). Para ello se usa la energía de la turbina VGT3 (16) que regula la presión a la salida del compresor C3 (12) igual a 0,6 MPa, como ya se ha descrito. Finalmente, la mezcla se vuelve a enfriar en el cuarto enfriador WCAC (13) hasta 323 K (49,85°C) antes de succionarse por los
20 segundos cilindros (14), que en esta realización son 2 por ser la mitad de los de un motor de 4 cilindros y cuatro tiempos que se ha usado como ejemplo; como se estableció al principio de la descripción de la presente realización 3.

En los segundos cilindros (14) se inyecta un hidrocarburo $HxCyOz$, con una bomba de combustible (26), a la mezcla comburente de CO_2 atmosférico y O_2 . El
25 hidrocarburo se inyecta en el modo y la cantidad deseados para regular la carga del motor de combustión por difusión y en proporción inferior a la estequiométrica con el O_2 . En dichos segundos cilindros (14) se realiza un ciclo de combustión por difusión; de encendido por compresión y similar al ciclo Diésel que fundamentalmente lo realiza el O_2 y los productos de la combustión. Es decir, aproximadamente el 80% de la cantidad de
30 aire que entra al motor.

Los segundos cilindros (14) producen energía para mover los primeros cilindros (4) que trasiegan el aire para la membrana MIEC (6) pues están acoplados en el mismo cigüeñal (25). Los segundos cilindros (14) producen un excedente de energía mecánica neta que se usa para mover el vehículo al que se acopla el motor, o el generador
35 eléctrico o cualquier aplicación que requiera un aporte de energía mecánica a través de un eje. Estos segundos cilindros (14) funcionan como sistema de arranque del conjunto

de turbomáquinas, para poner en marcha el flujo de aire y las turbinas del ciclo. Para ello se mueven, hasta el arranque del sistema, por un motor de arranque convencional de los usados en los motores alternativos.

Las cesiones de calor al agua de los enfriadores WCAC primero (3), segundo (9),
 5 tercero (11) y cuarto (13); junto con la cesión de calor en la membrana MIEC (6); en los regeneradores segundo (5) y primero (23) y finalmente la descarga a la atmosfera del excedente de mezcla comburente, a través de la bifurcación (29), suponen la cesión total de calor al foco frío necesaria para que el ciclo termodinámico cumpla el segundo principio de la termodinámica y sea por tanto viable. A su vez, las cesiones de calor en
 10 los enfriadores WCAC primero (3), segundo (9), tercero (11) y cuarto (13) y en las regeneraciones (producidas en los regeneradores segundo (5) y primero (23)) contribuyen a minimizar la destrucción de exergía del ciclo termodinámico debido, por una parte, a hacer el proceso de compresión global del fluido de trabajo más isotérmico y por otra a recuperar la energía de los gases de escape para la separación del aire. El
 15 acercamiento a la compresión isoterma y el uso de regeneradores para extraer el calor del CO_2 , N_2 y H_2O acercan el ciclo del N_2 en la membrana MIEC (6) a un ciclo con igual rendimiento al de Carnot, conocido como ciclo Ericsson. El ciclo de la mezcla de CO_2 , H_2O y O_2 se puede asimilar a un ciclo de Brayton cerrado con compresiones y expansiones intermedias, pero anidado con un ciclo Diésel en los segundos cilindros (14);
 20 cosa no descrita hasta ahora en la bibliografía. En esencia el ciclo de Brayton cuasi-cerrado anidado con el ciclo Diésel y binario con el de N_2 (enviando calor al ciclo del N_2 , éste cumple los preceptos termodinámicos para aproximarse a un ciclo ideal de eficiencia máxima, como el ciclo Ericsson) es una novedosa realización de ciclo binario; que cumple los preceptos del otro ciclo ideal de eficiencia máxima, el de Carnot.

25 Finalmente, como resultado de la combustión del hidrocarburo (combustible) con la mezcla comburente (CO_2 , H_2O , O_2) se produce a la salida de los segundos cilindros (14) una mezcla de CO_2 , H_2O , THC sin quemar y CO que se denomina gas de escape. A la salida de los segundos cilindros (14) este gas de escape está a una presión y temperatura máximas de 0,6 MPa y 1223 K (949,85°C) respectivamente. La mezcla de
 30 gases de escape se hace pasar a través de la membrana MIEC (6) succionada por el compresor C1 (10), el compresor C3 (12) y en última estancia por los propios segundos cilindros (14). En la membrana MIEC (6), la mezcla de gases de escape por una parte cumple la función de barrerla: bajando la presión parcial del O_2 para mejorar la productividad de la membrana MIEC (6) y diluyendo el O_2 hasta que las temperaturas de
 35 combustión sean compatibles con la tecnología de materiales de los MCIA actuales. Por otra parte, la mezcla de gases de escape se cataliza, reaccionando con el O_2 para

convertir los THC y CO resultantes del proceso de combustión en CO₂ y H₂O. De esta forma, a la salida de la membrana MIEC (6) se cierra el ciclo y la mezcla vuelve a la entrada del segundo regenerador (5) para transmitir su calor al aire.

En el proceso descrito el motor funciona de manera óptima regulando la relación de compresión efectiva del mismo con la turbina VGT2 (8) a la más eficiente según el grado de carga y el régimen de giro del motor. La productividad de la membrana responde instantáneamente a las aceleraciones del motor pues los primeros cilindros (4) están acoplados mecánicamente en el mismo eje con los segundos cilindros (14). Por tanto, la respuesta dinámica del motor no se ve afectada por el retraso en la aceleración del turbogrupo, debido a su inercia mecánica. Finalmente, el motor sólo emite a la atmósfera una mezcla de: CO₂, H₂O y O₂ por el tubo de bifurcación (29), a través de la segunda válvula antirretorno (19); y N₂+CO₂ atmosférico por la salida de la turbina VGT2 (8). Es decir, no emite ningún gas contaminante que afecte perjudicialmente a personas y animales. Ambas emisiones se mezclan en el mismo conducto (30) de escape, que une aguas abajo de la segunda válvula antirretorno (19) y de la turbina VGT2 (8) todas las emisiones del motor en un escape común.

Realización 4: Motor de encendido por compresión (CI); de mezcla estratificada y combustión por difusión; con relación de compresión efectiva variable controlada por la tasa de producción de O₂; sin emisiones de gases contaminantes y con captura de CO₂ producido y retirada de CO₂ atmosférico

La realización 4 está indicada para motores de encendido por compresión (CI) de mezcla estratificada (combustión por difusión) con captura del CO₂ atmosférico y del producido por el propio motor. Por tanto, se encuentra dentro de la categoría de motores que retiran CO₂ de la atmósfera (tasa de emisiones < 0). Para la producción de potencia mecánica neta, la realización 4 se basa en un proceso de combustión por difusión, con auto-encendido por detonación de la premezcla y velocidad de combustión controlada por la cantidad de movimiento de los chorros de combustible (y en este caso del CO₂ líquido) inyectados.

El grado de sobrealimentación afecta al porcentaje del par máximo a cada régimen a través de la relación de compresión efectiva del ciclo. Esta relación de compresión efectiva es variable y está controlada por la tasa de producción de O₂ en la membrana MIEC. Esto supone un concepto de reducción de tamaño, pudiendo disminuirse la cilindrada del motor y acercar el proceso de compresión efectivo del aire en turbomáquinas y cilindros al proceso isoterma.

La temperatura de combustión se controla por la dilución de la mezcla de

comburente (O_2) y combustible ($HxCyOz$) con CO_2 líquido procedente de la propia combustión y densificado hasta condiciones supercríticas. Debido a la gran cantidad de CO_2 necesaria esto supone una innovación adicional, ya que en los cilindros conviven dos ciclos: (i) por un lado, un ciclo termodinámico de CO_2 supercrítico realizado por el CO_2 usado para controlar la temperatura de combustión y, al mismo tiempo, (ii) un ciclo Diésel realizado por el O_2 comburente y sus productos. Esto no se ha descrito hasta ahora en la bibliografía publicada.

La realización 4 propone capturar el CO_2 emitido por el motor y reducir el contenido del CO_2 atmosférico del aire empleado, ambos de la forma más eficiente posible. Además, elimina las emisiones de gases contaminantes (CO, THC, PM y NO_x) en origen (cámara de combustión), minimizando la necesidad de postratamiento para limpieza de los gases de escape, lo que supone un ahorro considerable del coste de producción del motor. En la actualidad se estima que el postratamiento para la limpieza de gases es del orden del 30% del coste total del grupo moto-propulsor. Adicionalmente, debido a la oxicomustión se garantiza que tampoco se emiten gases contaminantes durante el proceso de arranque en frío. Esto no sucede en los motores actuales, debido al tiempo necesario para calentar (activar) los sistemas de postratamiento para la limpieza de gases de escape.

La realización 4 se ha representado en las figuras 4a y 4b. En la realización 4 el aire atmosférico entra al motor a través de un filtro (1) succionado por un compresor (C2) (2). El compresor C2 (2) forma parte de un turbogrupo y está acoplado mecánicamente a una turbina de geometría variable (VGT2) (8). El compresor C2 (2) trasiega aire usando la energía que recupera la turbina VGT2 (8) del N_2+H_2O rechazado en la membrana MIEC (6). En condiciones nominales el aire a la salida del compresor C2 (2) tiene una presión y una temperatura de 0,4 MPa y 473 K (199,85°C) aproximadamente. El aire pasa por un primer enfriador de carga del motor con agua (WCAC) (3). A la salida del primer enfriador WCAC (3) la temperatura desciende hasta 323 K (49,85°C) aproximadamente lo que hace más isoterma la compresión posterior en los primeros cilindros (4) del motor.

En la realización de la figura 4a el contenido en CO_2 del aire se reduce en una membrana de CO_2 (28) polimérica con una selectividad global CO_2/N_2 de alrededor de 2000 a la temperatura de trabajo a la salida del primer enfriador WCAC (3). Esto se consigue en la figura 4a gracias a que el CO_2 se arrastra por el O_2 puro tomado aguas abajo del tercer enfriador WCAC (11) y procedente de la membrana MIEC (6) de separación de O_2 . El O_2 baja la presión parcial del CO_2 atmosférico permeado en las cámaras de arrastre del módulo de membrana. En la figura 4a, el CO_2 atmosférico recogido y el O_2 usados para barrer la membrana se dirigen hacia la primera válvula

antirretorno (33) para succionarse por los segundos cilindros (14).

En una segunda versión de esta realización, mostrada en la figura 4b, el CO₂ del aire atmosférico se separa mediante una membrana de CO₂ (28) basada en carbonatos fundidos, de manera que a la salida del primer enfriador WCAC (3) el aire no se encuentra con ninguna membrana de CO₂.

Posteriormente se succiona el aire por la mitad de los primeros cilindros (4) del motor. En la realización 4 se representa un motor de 4 cilindros y 4 tiempos, y son 2 cilindros los que succionan el aire. Los primeros cilindros (4) actúan como bombas comprimiendo el aire hasta aproximadamente 1,5 MPa y 473 K (199,85°C). Los primeros cilindros (4) son preferiblemente idénticos al resto de cilindros del motor compartiendo el cigüeñal (25), el árbol de levas y la distribución, y teniendo como única singularidad que no se les inyecta combustible. Al ser un motor de 4 tiempos el aire permanece 4 carreras en el interior de los primeros cilindros (4) con lo que se comprime y se enfría con el agua de refrigeración del motor (aproximadamente a 363 K (89,85°C)) lo que contribuye a hacer más isoterma la compresión. Estos primeros cilindros (4) funcionan como sistema de arranque del conjunto de turbomáquinas, para poner en marcha el flujo de aire y las turbinas del ciclo. Para ello se mueven, hasta el arranque del sistema, por un motor de arranque convencional de los usados en los motores alternativos.

A la salida de los primeros cilindros (4) el aire se calienta en un primer regenerador (23) que baja su presión hasta 1,47 MPa y eleva su temperatura hasta aproximadamente 673 K (399,85°C); usando para ello la energía térmica de un flujo de H₂O y N₂. Este flujo de N₂ y H₂O proviene de la turbina VGT2 (8). Este flujo de N₂ y H₂O supone aproximadamente el 90% del caudal total de gases trasegados por el motor y se encuentra a una temperatura aproximada de 800 K (526,85°C) y una presión de 0,1 MPa. A la salida del primer regenerador (23) el aire se calienta en un segundo regenerador (5) que baja su presión hasta 1,45 MPa y eleva su temperatura hasta aproximadamente 723 K (449,85°C) usando para ello la energía térmica del O₂ producido por la membrana MIEC (6) en la figura 4a. En la figura 4b se usa para ello la energía térmica del O₂ producido por la membrana MIEC (6) y el CO₂ producido en la membrana de CO₂ (28). No sube mucho la temperatura pues el O₂ supone el 20% del caudal del aire aproximadamente.

A la salida del segundo regenerador (5) el aire se calienta en una membrana MIEC catalítica (15) que baja su presión hasta 1,4 MPa y eleva su temperatura hasta aproximadamente 1123 K (849,85°C); usando para ello la energía térmica de los gases de escape de la combustión de los segundos cilindros (14). En la membrana MIEC catalítica (15) los gases de escape ceden su calor al aire (actúa como regenerador) y

tanto CO como HC (CO y HC suponen menos del 1% de la composición de los gases de escape y por tanto no se han reflejado explícitamente en las figuras 4a y 4b) se oxidan hasta que todo el flujo de gases está compuesto únicamente por CO₂ y H₂O. Este flujo de CO₂ y H₂O supone aproximadamente el 100% del caudal total de gases de escape 5 trasegados por el motor a presiones muy elevadas (7,5 MPa) con lo que se aumenta mucho su densidad y se reduce el tamaño de la membrana MIEC catalítica (15) necesaria para la oxidación de los gases de este motor.

Tras la membrana MIEC catalítica (15), el aire a 1,4 MPa y 1123 K (849,85°C) se inyecta en la membrana MIEC (6) de O₂ donde se separa el O₂.

10 En el caso de la realización basada en la separación del CO₂ atmosférico del aire mediante membranas basadas en carbonatos fundidos mostrada en la figura 4b, el N₂, H₂O y CO₂ atmosférico, que supone el rechazo en la membrana MIEC (6) de O₂ entra a aproximadamente 1123 K (849,85°C) y 1,35 MPa en la membrana de CO₂ (28), en este caso una membrana de carbonatos fundidos con una selectividad global CO₂/N₂ de 15 alrededor de 2500 a la temperatura de trabajo, donde se separa el CO₂ atmosférico de la corriente de N₂+H₂O. Para ello se utiliza como corriente de arrastre el O₂ puro producido por la membrana MIEC (6). Cuando este O₂ sale de la membrana MIEC (6) hacia los segundos cilindros (14) de combustión, succionado por el vacío de 0,05 MPa que genera el compresor C1 (10), se hace pasar antes por el lado del CO₂ atmosférico de la 20 membrana de CO₂ (28). De esta forma el O₂ se utiliza para barrer el CO₂ de la membrana de CO₂ (28) y bajar la presión parcial del CO₂.

En la primera versión de esta realización, donde se emplean membranas poliméricas para la separación del CO₂ atmosférico del aire (mostrada en la figura 4a) el rechazo de la membrana MIEC (6) de O₂ no se encuentra aguas abajo con ninguna 25 membrana de CO₂; ya que el aire ya se ha tratado previamente para reducir el contenido en CO₂ en la membrana de CO₂ (28) polimérica de la figura 4a. El rechazo de la membrana MIEC (6) de O₂, en el caso de la realización de la figura 4a, o el rechazo de la membrana de CO₂ (28), en la realización de la figura 4b, están ambos prácticamente libres de CO₂ atmosférico y, se componen mayoritariamente de N₂+H₂O a 1,35 MPa y 30 1123 K (849,85°C). Estos procedimientos de separación del CO₂ atmosférico del aire tratado hacen que el motor descrito retire CO₂ de la atmósfera y se puede considerar de tasa de emisión de CO₂ negativa. Efectivamente, el contenido en CO₂ de la corriente el N₂+H₂O que se emiten a la salida de la turbina VGT2 (8) es mínima (<1-5% del contenido de entrada en el aire) y el CO₂ producido en la combustión se licua y se captura en el 35 sistema, como se explica más adelante.

Cada uno de los rechazos de las membranas, supone aproximadamente el 80%

de la masa de aire trasegada por el sistema y se hace pasar por la turbina VGT1 (71) y/o por la válvula de control (72). La turbina VGT1 (71) y la válvula de control (72) forman parte de un turbogrupo junto con el compresor C1 (10), al cual está unida mecánicamente la turbina VGT1 (71). La turbina VGT1 (71) valoriza energéticamente el flujo de N₂ rechazado de la membrana MIEC (6), recuperando su energía para mover el compresor C1 (10). La válvula de control (72) regula el flujo de energía al compresor C1 (10). El compresor C1 (10) trasiega el O₂ puro producido en la membrana MIEC (6) en el caso de la figura 4a. En el caso de la figura 4b, el compresor C1 (10) trasiega O₂ puro producido en la membrana MIEC (6) + CO₂. Por lo tanto, trasiega aproximadamente el 20% del flujo de aire y controla el vacío a generar en el lado del O₂ de la membrana MIEC (6) para bajar la presión de O₂ y aumentar la productividad de la membrana. Como consecuencia, la válvula de control (72) regula la tasa de producción de O₂ y por ende la masa de O₂ atrapada en el ciclo y la presión máxima del ciclo en los segundos cilindros (14).

Normalmente, la válvula de control (72) trabaja parcialmente abierta para regular la presión del compresor C1 (10). Una parte del N₂ rechazado en la membrana MIEC (6) circula a través de la turbina VGT1 (71), expandiéndose y enfriándose. La otra parte del N₂ rechazado circula a través de la propia válvula de control (72), sin enfriarse. Esta otra parte del N₂ se mezcla aguas abajo de la turbina VGT1 (71) con el N₂ frío y expandido, recalentándolo, y en consecuencia aumentando su temperatura.

Tras pasar por la válvula de control (72) y/o por la turbina (71) el N₂+H₂O de rechazo de la membrana MIEC (6) (el 80% del flujo de aire) se valoriza en la turbina de geometría variable VGT2 (8) que se usa para mover el compresor C2 (2). Las condiciones nominales aproximadas de entrada a la turbina VGT2 (8) son 0,35 MPa y 823 K (549,85°C). La geometría variable de la turbina VGT2 (8) se utiliza para regular el caudal de aire trasegado por la membrana MIEC (6) y, por tanto, el caudal de O₂ producido. Cuando la turbina VGT2 (8) se cierra aumenta el flujo de aire a través de la membrana MIEC (6) y la presión de trabajo en la membrana MIEC (6). Por lo tanto, aumenta la producción horaria de O₂ (a igualdad de tasas) y la cantidad de combustible que se podría inyectar en condiciones estequiométricas. Sucede a la inversa cuando la turbina VGT2 (8) se abre. El tamaño mínimo (apertura mínima) de la turbina VGT2 (8) se elige en consonancia con la cilindrada del motor alternativo para fijar la potencia máxima del sistema a cada régimen de giro del motor. La apertura máxima de la turbina VGT2 (8) determina el caudal mínimo de O₂ (en vacío) del motor alternativo a cada régimen de giro. La turbina VGT2 (8) también puede comprender una válvula de alivio (o WG). Cuando la turbina VGT2 (8) o su válvula de alivio se abren al máximo, la energía del compresor C2 (2) se reduce a cero, con lo cual se reducen tanto la presión de trabajo de la membrana

MIEC como el caudal de aire trasegado considerablemente.

Si se desea reducir aún más el caudal del motor hasta bajarlo a cero, entonces se abre la válvula de control (72) evitando la turbina VGT1 (71) con lo que la energía del compresor C1 (10) se reduce a cero. Esto iguala la presión parcial del O₂ a ambos lados de la membrana MIEC (6) y anula la tasa de producción de O₂ dejando en vacío la carga del motor de esta realización 4.

De esta manera, la válvula de control (72) proporciona una regulación cualitativa del flujo de O₂ actuando sobre la tasa de producción y la turbina VGT2 (8) proporciona una regulación cuantitativa actuando sobre el caudal trasegado de aire. Ambos controles proporcionan una regulación muy amplia y muy fina de la relación de compresión efectiva del cilindro en el punto muerto superior de los segundos cilindros (14) sin que cambie la relación de compresión volumétrica de los mismos. Esto se conoce comúnmente en los motores alternativos como relación de compresión variable.

A la salida de la turbina VGT2 (8) la mezcla de N₂ y H₂O a presión de 0,1 MPa y temperatura de 800 K (526,85°C), aproximadamente, se hace pasar por el primer regenerador (23) para ceder su calor al aire antes de descargar esta mezcla de gases (ya exenta de gases nocivos para la salud) a la atmósfera.

El O₂ puro en el caso de la figura 4a o el O₂ diluido con CO₂ atmosférico en el caso de la figura 4b, salen de la membrana MIEC (6) y de la membrana de CO₂ (28) respectivamente, a una presión y temperatura nominales aproximadamente de 0,05 MPa y 1123 K (849,85°C) respectivamente. Este es el flujo comburente, que supone aproximadamente el 20% del caudal de aire trasegado por el motor.

El calor de este flujo comburente se recupera primero en el segundo regenerador (5) para calentar el aire que proviene de la salida del primer regenerador (23). A la salida del segundo regenerador (5) el O₂ tiene unas condiciones nominales de 0,048 MPa y 700 K (426,85°C) aproximadamente.

Seguidamente la mezcla fluye a través de unos medios para llevar a cabo un ciclo de Brayton a vacío (CBV) (21). Los medios para llevar a cabo un ciclo de Brayton a vacío (CBV) (21) tienen la función de enfriar la mezcla transformando su temperatura en presión y recuperando la pérdida de presión causada por el segundo regenerador (5). Los medios para llevar a cabo un ciclo de Brayton a vacío (CBV) (21) están compuestos por una turbina VGT3 (16) acoplada mecánicamente con un compresor C3 (12) con el que forma un turbogrupo. Entre la salida de la turbina VGT3 (16) y la entrada del compresor C3 (12) hay un quinto enfriador WCAC (31). El detalle interno de los medios para llevar a cabo un ciclo de Brayton a vacío (CBV) (21) puede verse en la figura 5a) y su ciclo de funcionamiento en el diagrama T-s de la figura 5b). La mezcla de CO₂, H₂O y O₂ se

expande para valorizarse energéticamente en la turbina VGT3 (16); se enfría a presión constante en el quinto enfriador WCAC (31) y se comprime en el compresor C3 (12), acoplado mecánicamente con la turbina VGT3 (16). A la salida del compresor C3 (12) la mezcla está más fría y a más presión que a la entrada de la turbina VGT3 (16).

5 Las condiciones nominales de la mezcla comburente a la salida del compresor C3 (12) son aproximadamente 0,08 MPa y 473 K (199,85°C). La mezcla comburente, que continúa su camino hacia los segundos cilindros (14), se enfría en el segundo enfriador WCAC (9) hasta 323 K (49,85°C). A continuación se comprime en el compresor C1 (10) hasta 0,25 MPa y 473 K (199,85°C) siendo las condiciones del compresor C1 (10) las
10 impuestas por la válvula de control (72) para mantener la tasa de productividad de la membrana MIEC (6), como ya se ha descrito. Después del compresor C1 (10), el fluido comburente se vuelve a enfriar en el tercer enfriador WCAC (11) hasta 323 K (49,85°C).

En la realización de la figura 4a el fluido comburente es O₂ puro y se usa para arrastrar el CO₂ en la membrana de CO₂ (28) polimérica con una selectividad CO₂/N₂ de
15 alrededor de 2000 para bajar la presión parcial del CO₂ en este lado y maximizar la eficacia de la membrana para retirar el CO₂ de la corriente de aire. En la realización de la figura 4b el fluido comburente es ya el O₂ diluido con CO₂ atmosférico a la salida del tercer enfriador WCAC (11).

A continuación, el fluido comburente pasa a través una primera válvula
20 antirretorno (33) para evitar la salida de reflujos de los segundos cilindros (14). Tras la primera válvula antirretorno (33) la mezcla se succiona por los segundos cilindros (14), que son 2 de los 4 que tiene el motor de cuatro tiempos usado como ejemplo, como se estableció al principio de la descripción de la presente realización 4.

En los segundos cilindros (14) se inyecta un hidrocarburo HxCyOz, con una
25 bomba de combustible (26), a la mezcla comburente O₂ (junto con el CO₂ del aire). La bomba de combustible (26) succiona el combustible de un segundo depósito (27) que está separado con una membrana flexible del primer depósito (20) donde se acumula CO₂ líquido, como se explicará más adelante. Conforme se va consumiendo el hidrocarburo acumulado en el segundo depósito (27) la membrana reduce el volumen en
30 el lado del hidrocarburo y aumenta el volumen en el lado del CO₂ para permitir la acumulación de este último en su lado del primer depósito (20). El hidrocarburo succionado por la bomba de combustible (26) se inyecta en los segundos cilindros (14) en el modo y la cantidad deseados para regular la carga del motor de combustión por difusión y en proporción inferior a la estequiométrica con el O₂. En dichos segundos
35 cilindros (14) se realiza un ciclo de combustión por difusión; de encendido por compresión y similar al ciclo Diésel que fundamentalmente lo realiza el O₂ y sus productos de la

combustión. Es decir, el 20% de la masa que circula por el motor.

Para regular la temperatura de combustión a límites compatibles con las tecnologías de materiales y de refrigeración de los motores alternativos es necesario inyectar grandes cantidades de CO₂ líquido en los segundos cilindros (14).
 5 Aproximadamente, esta cantidad es del 80% de la masa trasegada por los segundos cilindros (14) y se inyecta por la bomba de CO₂ (35) líquido a temperatura inferior a la crítica (< 303 K (29,85°C)) y alta presión (aproximadamente 80 MPa) dentro de los cilindros. El CO₂ se mantiene a temperaturas subcríticas (< 303 K (29,85°C)) en la bomba usando si es necesario un circuito frigorífico como el que produce el aire acondicionado
 10 del vehículo. El CO₂ inyectado se ha capturado y licuado previamente en los procesos de combustión anteriores. El CO₂ se evapora dentro de los segundos cilindros y se expande realizando un ciclo termodinámico supercrítico distinto al del O₂ y sus productos, que se describirá más adelante.

Los segundos cilindros (14) producen energía para mover los primeros cilindros
 15 (4) que trasiegan el aire para la membrana MIEC (6) y para comprimir el CO₂ durante la descarga hasta la presión supercrítica; pues están todos acoplados en el mismo cigüeñal (25). La productividad de la membrana responde instantáneamente a las aceleraciones del motor pues los primeros cilindros (4) están acoplados mecánicamente en el mismo eje con los segundos cilindros (14). Por tanto, la respuesta dinámica del motor no se ve
 20 afectada por el retraso del turbogrupo (debido a la inercia mecánica del mismo) como ocurre en los motores turbo-sobrealimentados convencionales. Los segundos cilindros (14) producen además un excedente de energía mecánica neta que se usa para mover el vehículo al que se acopla el motor, o el generador eléctrico o cualquier aplicación que requiera un aporte de energía mecánica a través de un eje. Estos segundos cilindros (14)
 25 funcionan como sistema de arranque del conjunto de turbomáquinas, para poner en marcha el flujo de aire y las turbinas del ciclo. Para ello se mueven, hasta el arranque del sistema, por un motor de arranque convencional de los usados en los motores alternativos.

Las cesiones de calor al agua de los enfriadores WCAC primero (3), segundo (9),
 30 tercero (11), cuarto (13), quinto (31) y sexto (18); junto con la cesión de calor en la membrana MIEC (6) y en la membrana MIEC catalítica (15); en los regeneradores segundo (5) y primero (23) y finalmente el resto de la densificación y captura del excedente de CO₂ y H₂O, suponen la cesión total de calor al foco frío necesaria para que el ciclo termodinámico cumpla el segundo principio de la termodinámica y sea por tanto
 35 viable. A su vez las cesiones de calor en los enfriadores WCAC primero (3), segundo (9), tercero (11), cuarto (13), quinto (31) y sexto (18) y en las regeneraciones (producidas en

los regeneradores segundo (5) y primero (23)) contribuyen a minimizar la destrucción de exergía del ciclo termodinámico debido, por una parte, a hacer el proceso de compresión global del fluido de trabajo más isotérmico y por otra a recuperar la energía de los gases de escape para la separación del aire. El acercamiento a la compresión isoterma y el uso
 5 de regeneradores segundo (5) y primero (23) para extraer el calor del O_2 y del CO_2+H_2O acercan el ciclo del aire y el N_2 en la membrana MIEC (6) a un ciclo con igual rendimiento al de Carnot conocido como ciclo Ericsson. El ciclo de la mezcla de O_2 se puede asimilar a un ciclo de CO_2 supercrítico con compresiones y expansiones intermedias, pero anidado con un ciclo Diésel en los segundos cilindros (14); cosa no descrita hasta ahora
 10 en la bibliografía. En esencia el ciclo de CO_2 supercrítico anidado con el ciclo Diésel y binario con el de N_2 (enviando calor al ciclo del N_2 éste cumple los preceptos termodinámicos para aproximarse a un ciclo ideal de eficiencia máxima, como el ciclo Ericsson) es una novedosa realización de un ciclo binario; que cumple los preceptos del otro ciclo ideal de eficiencia máxima, el de Carnot.

15 Como resultado de la combustión del hidrocarburo (combustible) con la mezcla comburente (CO_2 atmosférico + O_2) se produce a la salida de los segundos cilindros (14) una mezcla de CO_2 , H_2O , THC sin quemar, O_2 y CO . Esta mezcla se oxida con el O_2 sobrante de la combustión en la membrana MIEC catalítica (15) a la que entra a una temperatura aproximada de 1273 K (999,85°C) y una presión de 7,5 MPa. Los gases
 20 ceden su calor al 100% del flujo de aire que trasiega el motor, con lo cual su temperatura baja mucho, hasta aproximadamente los 753 K (479,85°C). A la vez, y debido a las reacciones químicas que se producen en la membrana MIEC catalítica (15) se oxidan el CO y los THC con el O_2 sobrante de la combustión hasta vapor de H_2O y CO_2 , y, nuevamente, debido a la oxicomustión se evita la producción de NO_x en los segundos
 25 cilindros (14). Como la relación entre el O_2 admitido y el combustible en los segundos cilindros (14) no es estequiométrica, sino superior como una opción para regular la carga, puede quedar O_2 sobrante aún después de oxidar el CO y los THC.

La presión de 7,5 MPa viene regulada por la segunda válvula antirretorno (19) y su muelle de tarado. La compresión se realiza de forma instantánea al abrir la válvula de
 30 escape de los segundos cilindros (14) y descargar la mezcla de gases de escape. Los gases comprimidos hasta los 7,5 MPa se deben mantener por encima de los 573 K (299,85°C) que es la temperatura de saturación del agua a 7,5 MPa para garantizar que sigue en estado gas dentro de los segundos cilindros (14).

La mezcla se enfría en el cuarto enfriador WCAC (13) hasta los 523 K (249,85°C)
 35 para que el H_2O pase a estado líquido. A continuación, el agua líquida se separa del CO_2 gas en un separador (17), que puede ser un separador inercial con una válvula de

laminación de presión a la salida. También puede usarse como separador (17) una membrana polimérica, si el agua se mantuviese en estado gaseoso. La masa de agua a 7,5 MPa y 473 K (199,85°C) supone aproximadamente el 10% del caudal total de masa trasegada por el motor. El agua separada se mezcla con el N_2+H_2O a la entrada de la 5 turbina VGT2 (8). De esta forma la presión aguas abajo del separador (17) viene marcada por la expansión en la turbina VGT2 (8). Esto permite valorizar energéticamente la temperatura y la masa del agua extraída recuperando parte de su energía en la turbina VGT2 (8).

Finalmente, el CO_2 + restos de O_2 se enfría en el sexto enfriador WCAC (18) por 10 debajo de los 303 K (29,85°C) que es su temperatura crítica. El CO_2 líquido pasa a través de la segunda válvula antirretorno (19) y se almacena a 7,5 MPa en un primer depósito (20) con temperatura controlada por debajo de 303 K (29,85°C). El depósito se mantiene a temperaturas subcríticas del CO_2 (< 303 K (29,85°C)) usando, si es necesario, un circuito frigorífico como el que produce el aire acondicionado del vehículo. El O_2 gas que 15 se pueda haber acumulado en el depósito se purga a la atmósfera a través de una cuarta válvula antirretorno (34) cuando la presión en el depósito supere los 7,5 MPa. Cuando el combustible del segundo depósito (27) se vacía o el primer depósito (20) se llena, lo que primero suceda, la autonomía del motor finaliza. Ambos depósitos están separados por una membrana flexible. El primer depósito (20) se descarga de CO_2 en la estación de 20 servicio, intercambiándose por combustible que rellena el segundo depósito (27). El CO_2 líquido puede nuevamente convertirse en un hidrocarburo o almacenarse en sumideros controlados, pero no se emite a la atmósfera. La reducción del contenido en CO_2 del aire de admisión junto con la captura del CO_2 generado en los procesos de oxidación del combustible permite determinar que la presente realización 4 es un motor con emisiones 25 netas negativas pues ha retirado CO_2 atmosférico y no ha emitido el que se produce en su proceso de combustión.

Como el CO_2 líquido se inyecta nuevamente en los segundos cilindros (14), con la bomba de CO_2 (35) y para mantener controladas las temperaturas de combustión, éste realiza un ciclo termodinámico novedoso y no descrito hasta ahora que se ha 30 representado en la figura 6 en los diagramas p-h; T-s y p-v respectivamente. Este ciclo es energéticamente relevante por el CO_2 , el cual supone aproximadamente el 80% de la masa contenida en los cilindros. La descripción del ciclo del CO_2 es la siguiente:

- (1).- Estación correspondiente a la entrada de la bomba. A la entrada de la bomba de CO_2 (35) éste se encuentra en unas condiciones termodinámicas de aproximadamente 35 7,5 MPa y 298 K (24,85°C).
- (2).- Estación correspondiente a la salida de la bomba. A la salida de la bomba de

- CO₂ (35) éste se encuentra en unas condiciones termodinámicas de aproximadamente 80 MPa y 303 K (29,85°C). El proceso entre las estaciones (1) y (2) se realiza en la bomba de CO₂ y durante el mismo el CO₂ se mantiene en estado líquido, comprimiéndose en la bomba de manera prácticamente isoterma. El CO₂ se mantiene a temperaturas subcríticas (< 303 K (29,85°C)) durante la compresión usando si es necesario un circuito frigorífico como el que produce el aire acondicionado del vehículo. La estación (2') de la figura 6 corresponde al momento en que el CO₂ líquido sale de la tobera de los inyectores y se expande hasta la presión que encuentra en los segundos cilindros (14) de aproximadamente 20 MPa.
- 10 (3).- Estación correspondiente al final del proceso de combustión del hidrocarburo. En la estación (3) se alcanza la temperatura máxima y la presión máxima del ciclo. Las condiciones son aproximadamente 1800 K (1526,85°C) y 20 MPa. El proceso se realiza en los segundos cilindros (14). El CO₂ se inyecta junto con el hidrocarburo al final de la carrera de compresión. El CO₂ se expande en cuanto se inyecta, desde los 80 MPa
- 15 aguas arriba de la tobera de inyección, hasta los 20 MPa de presión máxima en los segundos cilindros (14). La presión en los segundos cilindros (14) se mantiene prácticamente constante a 20 MPa durante el proceso entre las estaciones (2') y (3) gracias a la continuación en la inyección de CO₂ y pese a la carrera de expansión. La temperatura aumenta hasta los 1800 K (1526,85°C) gracias a la combustión del
- 20 hidrocarburo.
- (4).- Estación correspondiente al final del proceso de inyección del CO₂. El proceso entre (3) y (4) supone una reducción de temperatura a presión ligeramente decreciente. Las condiciones en (4) son de unos 1173 K (899,85°C) y unos 18 MPa. La temperatura ha bajado por la dilución de los productos de la combustión con el CO₂ inyectado. La
- 25 presión ha bajado por la ausencia de combustión y el aumento del volumen en el cilindro durante el proceso entre (3) y (4).
- (5).- Estación correspondiente al punto muerto inferior de los cilindros. El proceso entre (4) y (5) supone una continuación del aumento de volumen en los cilindros sin combustión y sin inyección de CO₂. Esto supone un enfriamiento y una bajada de presión.
- 30 Las condiciones en (5) son aproximadamente 873 K (599,85°C) y 0,3 MPa. El proceso entre (4) y (5) sigue sucediendo en los cilindros con válvulas cerradas con lo que es un sistema aislado del exterior. En (5) termina la expansión volumétrica en los cilindros, se abre la válvula de escape y comienza el proceso de escape o descarga de los gases de escape.
- 35 (6).- Estación correspondiente al final del proceso de escape. Al abrirse la válvula de escape se produce una re-compresión instantánea del gas en los cilindros debido a que

la zona de descarga se encuentra presurizada a 7,5 MPa por la segunda válvula antirretorno (19). El proceso entre (5) y (6) supone un aumento instantáneo de presión y temperatura hasta aproximadamente 7,5 MPa y 1273 K (999,85°C).

El ciclo se cierra en un proceso de enfriamiento a la presión constante de 7,5 MPa en el que el CO₂ pasa de estado gas a estado líquido siguiendo la línea de presión supercrítica. En este cierre del ciclo vuelve nuevamente a la estación (1) en las condiciones iniciales de 298 K (24,85°C) y 7,5 MPa. Este proceso de enfriamiento tiene lugar en parte en los cilindros durante el proceso de descarga de los gases de escape, en condiciones constantes de presión, durante todo el tiempo que sigue abierta la válvula de escape. El resto del enfriamiento se produce en la membrana MIEC catalítica (15) y en los enfriadores WCAC cuarto (13) y sexto (18). Parte de la masa de CO₂ licuada se reinyecta en los cilindros para volver a realizar el ciclo descrito y el sobrante de CO₂ se acumula en el primer depósito (20) hasta su entrega en las estaciones de recogida y tratamiento apropiadas.

El estado termodinámico donde se cruzan la línea del proceso entre los estados termodinámicos (4) y (5) con la línea del proceso entre los estados termodinámicos (6) y (1) es el punto (7), como aparece reflejado en la figura 6. El estado termodinámico del punto (7) depende de las condiciones particulares del ciclo y marca el vértice de separación entre la parte del ciclo que produce trabajo mecánico neto positivo (1,2,3,4,7,1) y la parte del ciclo que produce trabajo mecánico neto negativo (7,5,6,7); es decir que consume trabajo.

Si bien el CO₂ supone aproximadamente el 80% de la masa que evoluciona por los cilindros, existe otro 20% de masa aproximadamente que es el O₂ que reacciona con el combustible. El ciclo realizado por el O₂ y sus productos de combustión está anidado con el ciclo de CO₂ en el interior de los segundos cilindros (14). Por ser un ciclo no propuesto hasta ahora en la bibliografía también se describe con detalle en la figura 7. Las etapas de este ciclo son las siguientes:

(a).- Estación correspondiente a las condiciones termodinámicas en la admisión de los segundos cilindros (14). Estas condiciones están localizadas aguas abajo de la primera válvula antirretorno (33). Las condiciones termodinámicas son de 0,3 MPa y 323 K (49,85°C) aproximadamente. En este instante los pistones de los segundos cilindros (14) se encuentran en el punto muerto inferior. Se cierra la válvula de admisión de los segundos cilindros (14) y comienza el proceso de compresión del O₂.

(b).- Estación correspondiente a las condiciones termodinámicas al final del proceso de compresión de los segundos cilindros (14). Estas condiciones suceden en el punto muerto superior del pistón de los segundos cilindros (14). Las condiciones

termodinámicas son de 11 MPa y 573 K (299,85°C) aproximadamente. En el proceso entre los estados (a) y (b) se produce una compresión politrópica, con transmisión de calor a las paredes de los cilindros, del O₂ atrapado en los mismos (aproximadamente el 20% de la masa del ciclo). En las condiciones (b) se comienza a inyectar el hidrocarburo combustible y el CO₂ en estado líquido.

(c).- Estación correspondiente a las condiciones termodinámicas al final del proceso de combustión del hidrocarburo combustible. Estas condiciones suceden pasado el punto muerto superior del pistón de los segundos cilindros (14). Las condiciones termodinámicas son de 200 MPa y 1800 K (1526,85°C) aproximadamente. El proceso entre (b) y (c) conlleva la inyección del combustible, su auto-encendido por compresión y su combustión por difusión, controlándose la velocidad de combustión gracias a la cantidad de movimiento de los chorros inyectados. El proceso entre (b) y (c) conlleva también el inicio de la inyección del CO₂ líquido que va a controlar la temperatura del proceso de combustión y ayuda a mantener la presión constante e igual a los 200 MPa establecidos aproximadamente. Estas condiciones coinciden con las del estado termodinámico (3) del ciclo de CO₂ de la figura 6. En estas condiciones ambos ciclos (O₂ y CO₂) suceden al unísono.

(d).- Estación correspondiente a las condiciones termodinámicas al final del proceso de inyección del CO₂. Estas condiciones suceden durante la carrera de expansión del pistón de los segundos cilindros (14). Las condiciones termodinámicas son de unos 1173 K (899,85°C) y unos 18 MPa aproximadamente. Estas condiciones coinciden con las del estado termodinámico (4) del ciclo de CO₂ de la figura 6. En estas condiciones ambos ciclos (O₂ y CO₂) suceden al unísono. El proceso entre los estados (c) y (d) de la figura 7 es idéntico al descrito en la figura 6 entre los estados (3) y (4). El proceso se alarga más o menos en función de la cantidad de CO₂ inyectado que a su vez depende de la temperatura final deseada en los productos de la combustión y de la estabilidad de la combustión. Un caso ideal, representado en la figura 7 por el punto (d'), sería alargar este proceso hasta el punto muerto inferior de la carrera de expansión. Este caso es ideal pues supondría la máxima producción de trabajo en el ciclo de O₂ y en el de CO₂.

(e).- Estación correspondiente a las condiciones termodinámicas en el punto muerto inferior de la carrera del pistón de los segundos cilindros (14). Estas condiciones suceden al final del proceso de expansión en los segundos cilindros (14). Las condiciones termodinámicas son aproximadamente 873 K (599,85°C) y 0,3 MPa. Estas condiciones coinciden con las del estado termodinámico (5) del ciclo de CO₂ de la figura 6. En estas condiciones ambos ciclos (O₂ y CO₂) suceden al unísono. El proceso entre los estados (d) y (e) de la figura 7 es idéntico al descrito en la figura 6 entre los estados (4) y (5).

(f).- Estación correspondiente a las condiciones termodinámicas al abrirse la válvula de escape en el punto muerto inferior de la carrera del pistón de los segundos cilindros (14). Al abrirse la válvula de escape se produce una re-compresión instantánea del gas en los cilindros debido a que la zona de descarga se encuentra presurizada a 7,5 MPa por la segunda válvula antirretorno (19). Estas condiciones coinciden con las del estado termodinámico (6) del ciclo de CO₂ de la figura 6. En estas condiciones ambos ciclos (O₂ y CO₂) suceden al unísono. El proceso entre los estados (e) y (f) de la figura 7 es idéntico al descrito en la figura 6 entre los estados (5) y (6). El proceso entre (e) y (f) supone un aumento instantáneo de presión y temperatura hasta aproximadamente 7,5 MPa y 1273 K (999,85°C).

(g).- Estación correspondiente a las condiciones termodinámicas al completarse la descarga de gases de combustión, en el punto muerto superior de la carrera de escape del pistón de los segundos cilindros (14). En el proceso entre la estación (f) y (g) se realiza también la descarga de gases de los cilindros, en condiciones constantes de presión, durante todo el tiempo que sigue abierta la válvula de escape hasta su cierre. Las condiciones termodinámicas son aproximadamente 7,5 MPa y 1173 K (899,85°C). En estas condiciones ambos ciclos (O₂ y CO₂) suceden al unísono. El proceso entre los estados (f) y (g) de la figura 7 coincide durante un cierto tramo a presión constante con el descrito en la figura 6 entre los estados (6) y (1). En esta estación vuelven a separarse los ciclos de O₂ y de CO₂.

(h).- Estación correspondiente al final del proceso de caída de presión en los segundos cilindros (14), hasta la presión de admisión, aguas abajo de la primera válvula antirretorno (33). Esta estación sucede en algún punto de la carrera de admisión de los segundos cilindros (14). En el proceso entre (g) y (h) el CO₂ atrapado en el volumen muerto de la cámara de combustión se ha expandido hasta las condiciones en que se abre la primera válvula antirretorno (33). Este proceso sucede con la primera válvula antirretorno (33) cerrada. Este proceso se realiza sólo por el CO₂ proveniente de la combustión del O₂ y exclusivo del ciclo de la figura 7 y es independiente del ciclo de CO₂ descrito en la figura 6. Las condiciones termodinámicas son aproximadamente 0,3 MPa y 773 K (499,85°C).

El ciclo se cierra de nuevo en las condiciones termodinámicas (a) de la figura 7. El proceso entre (h) y (a) sucede con la primera válvula antirretorno (33) abierta a presión y temperatura esencialmente constantes y aproximadamente de 0,3 MPa y 323 K (49,85°C). El proceso entre (h) y (a) consiste en la admisión de O₂ procedente de la admisión de los cilindros y supone la entrada de aproximadamente el 20% de la masa de aire del sistema.

El estado termodinámico donde se cruzan la línea del proceso entre los estados termodinámicos (d) y (e) con la línea del proceso entre los estados termodinámicos (f) y (g) es el punto (i), como aparece reflejado en la figura 7. El punto (i) es coincidente con el estado termodinámico (7) en la figura 6. El estado termodinámico del punto (i) depende de las condiciones particulares del ciclo de la figura 7 y marca el vértice de separación entre la parte del ciclo que produce trabajo mecánico neto positivo (i,j,b,c,d,i) y una parte del ciclo que produce trabajo mecánico neto negativo (i,e,f,i); es decir que consume trabajo, como ya se describió en la figura 6. Como ya se describió anteriormente, el punto (d') de la figura 7 supone una situación ideal del ciclo descrito en que los puntos (f) e (i') son coincidentes. En este caso el área (i',f,e,i') es cero y por lo tanto se maximiza el trabajo neto producido, entendiéndose como la diferencia absoluta entre el trabajo positivo y el trabajo negativo.

En el ciclo de O₂ de la figura 7 existe otra zona que consume trabajo cuyo vértice es el punto (j). Como aparece reflejado en la figura 7, el punto (j) es el estado termodinámico donde se cruzan la línea del proceso entre los estados termodinámicos (a) y (b) con la línea del proceso entre los estados termodinámicos (f) y (g). El estado termodinámico del punto (j) depende de las condiciones particulares del ciclo de la figura 7 y marca el vértice de separación entre la parte del ciclo que produce trabajo mecánico neto positivo (i,j,b,c,d,i) y la otra parte del ciclo que produce trabajo mecánico neto negativo (j,g,h,a,j); es decir que consume trabajo.

Se realizó un modelado teórico de prediseño y se realizaron diversos cálculos en base al mismo, cuyos resultados se muestran en las gráficas de las figuras 8 a 13 adjuntas. Para el modelo se supusieron conexiones ideales entre elementos y una eficiencia de la turbomaquinaria y de los intercambiadores de calor constante en todo punto de funcionamiento.

También se supuso una masa de aire atrapada constante y tasa de inyección variable de combustible gaseoso en los cilindros del motor y en el compresor, así como un dosado estequiométrico. El combustible considerado fue C₈H₁₈ (PCI ~42 MG/kg).

Se impuso una relación de compresión máxima de los turbocompresores fijada a 4:1, una temperatura máxima del refrigerante de 90 °C y una temperatura máxima de gases de escape de 1055 °C.

Tal como puede observarse a partir de las gráficas de las figuras 8 a 13, y a partir de la descripción anterior, con la presente invención se evitan las emisiones de NO_x y se abre la posibilidad de secuestrar el CO₂ en lugar de emitirlo a la atmósfera. Además, se regula la carga sin necesidad de una válvula de mariposa en la línea de admisión y se obtiene una alta eficiencia y potencia específica por unidad de cilindrada.

Aunque se ha proporcionado una descripción detallada de realizaciones preferidas de la presente invención, el experto en la técnica entenderá que pueden aplicarse modificaciones y variaciones a las mismas sin por ello apartarse del alcance de protección definido exclusivamente por las reivindicaciones adjuntas.

5

REIVINDICACIONES

1. Motor de combustión interna, del tipo que succiona aire atmosférico como comburente y usa hidrocarburos como combustible, comprendiendo el motor:
 - un primer ciclo de Brayton regenerativo de compresiones de aire con enfriamiento intermedio y expansiones de nitrógeno con recalentamiento, por mezcla de una parte del nitrógeno, que comprende una membrana MIEC (6) que separa el O_2 del aire comprimido, de manera que la corriente de aire succionado está libre de N_2 , y un aire empobrecido procedente del rechazo de la membrana MIEC (6) se envía directamente a una corriente de gases de escape evitando su participación en una combustión posterior, en el que parte de las compresiones de aire se realizan en al menos un primer cilindro (4) del motor;
 - un segundo ciclo de Brayton con compresión con enfriamiento intermedio, combinado de forma binaria con el primer ciclo de Brayton y anidado con un ciclo seleccionado de un ciclo de Otto y un ciclo Diésel realizado mediante oxicomustión en al menos un segundo cilindro (14) del motor, en el que el segundo ciclo de Brayton transmite al primer ciclo de Brayton energía mecánica mediante el acoplamiento del al menos un primer cilindro (4) con el al menos un segundo cilindro (14) a través de un cigüeñal (25), así como energía térmica procedente de gases de escape; en el que el primer ciclo de Brayton proporciona al segundo ciclo de Brayton O_2 comprimido procedente de la membrana MIEC (6); mediante lo cual se evita la emisión de NO_x a la atmósfera por la separación de N_2 en la membrana MIEC (6).
2. Motor según la reivindicación 1, caracterizado por que comprende dos primeros cilindros (4).
3. Motor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que comprende dos segundos cilindros (14).
4. Motor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la energía mecánica neta producida por el primer ciclo de Brayton se usa para sobrealimentar el segundo ciclo de Brayton a través de un compresor C1 (10).
5. Motor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la membrana MIEC (6) produce O_2 puro separado del aire atmosférico.
6. Motor según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado por que la membrana MIEC (6) produce O_2 diluido con CO_2 .
7. Motor según la reivindicación 6, caracterizado por que el CO_2 con el que se diluye

- el O₂ se obtiene del aire atmosférico.
8. Motor según la reivindicación 6, caracterizado por que el CO₂ con el que se diluye el O₂ se produce por la combustión con hidrocarburo en el segundo ciclo de Brayton.
 - 5 9. Motor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que siempre hay una etapa de enfriamiento después de cada etapa de compresión.
 10. Motor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que se recupera calor de todas las fuentes residuales mediante combinación de los ciclos de Brayton primero y segundo realizando regeneraciones antes de cada enfriamiento.
 - 10 11. Motor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la energía mecánica producida por el segundo ciclo de Brayton se usa además para comprimir CO₂ producido hasta licuarlo.
 12. Motor según la reivindicación 11, caracterizado por que se comprime el CO₂ hasta
15 al menos 7,5 MPa.
 13. Motor según cualquiera de las reivindicaciones 11 y 12, en el que el segundo ciclo de Brayton está anidado con un ciclo de Otto, caracterizado por que el motor comprende al menos un pistón adicional (22) así como válvulas antirretorno primera y segunda (33, 19) a la entrada y aguas abajo del mismo para succionar y
20 comprimir CO₂ sobrante acumulado en conductos del motor.
 14. Motor según cualquiera de las reivindicaciones 11 y 12, en el que el segundo ciclo de Brayton está anidado con un ciclo Diésel, caracterizado por que se usa la carrera de escape de los segundos cilindros (14) para comprimir el CO₂, mediante el uso de válvulas antirretorno primera y segunda (33, 19) que permiten la
25 descarga de CO₂ y la admisión de O₂ sustancialmente puro, empleándose este último como gas de arrastre en membranas de separación selectivas de CO₂.
 15. Motor según cualquiera de las reivindicaciones 5 ó 6, caracterizado por que comprende además un ciclo de Brayton a vacío (CBV) para enfriar más intensamente el O₂ sustancialmente puro, o el O₂ diluido con CO₂, antes de una
30 compresión posterior.
 16. Motor según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 15, caracterizado por que comprende un primer depósito (20) de almacenamiento de CO₂ licuado producido.
 17. Motor según la reivindicación 16, caracterizado por que el CO₂ almacenado en el primer depósito (20) se usa para bombear combustible desde un segundo
35 depósito (27) hacia los segundos cilindros (14) del motor y ambos depósitos primero y segundo (20, 27) están en un mismo tanque separados por una

membrana flexible.

18. Motor según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 17, caracterizado por que el CO₂ licuado producido se transfiere a un surtidor de una red logística de CO₂ externa.
- 5 19. Motor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la membrana MIEC (6) se basa en materiales cerámicos cristalinos que presentan conducción mixta de portadores electrónicos e iones oxígeno.
20. Motor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, siendo el motor de tipo de encendido provocado (SI), caracterizado por que se emplean turbogrupos para sobrealimentar los primeros cilindros (4) y se emplea la regulación de la
10 producción de O₂ de la membrana MIEC (6) para regular la carga del motor.
21. Motor según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 19, siendo el motor de tipo de encendido por compresión (CI), caracterizado por que se emplean turbogrupos para sobrealimentar los primeros cilindros (4) y se emplea la regulación de la
15 producción de O₂ de la membrana MIEC (6) para regular la relación de compresión efectiva del fluido de trabajo en el ciclo del motor.
22. Método de funcionamiento de motor de combustión interna, del tipo que succiona aire atmosférico como comburente y usa hidrocarburos como combustible, comprendiendo el método:
- 20 – un primer ciclo de Brayton regenerativo de compresiones de aire con enfriamiento intermedio y expansiones de nitrógeno con recalentamiento, por mezcla de una parte del nitrógeno, que comprende separar el O₂ del aire comprimido, de manera que la corriente de aire succionado está libre de N₂, y un aire empobrecido procedente del rechazo de la separación se envía
25 directamente a una corriente de gases de escape evitando su participación en una combustión posterior;
- un segundo ciclo de Brayton con compresión con enfriamiento intermedio, combinado de forma binaria con el primer ciclo de Brayton y anidado con un ciclo seleccionado de un ciclo de Otto y un ciclo Diésel realizado mediante
30 oxicomustión,
- en el que el segundo ciclo de Brayton transmite al primer ciclo de Brayton energía mecánica así como energía térmica procedente de gases de escape;
- en el que el primer ciclo de Brayton proporciona al segundo ciclo de Brayton O₂ comprimido procedente de la separación;
- 35 mediante lo cual se evita la emisión de NO_x a la atmósfera por la separación de N₂.

23. Método según la reivindicación 22, caracterizado por que la energía mecánica neta producida por el primer ciclo de Brayton se usa para sobrealimentar el segundo ciclo de Brayton.
24. Método según cualquiera de las reivindicaciones 22 y 23, caracterizado por que el primer ciclo de Brayton produce O₂ puro separado del aire atmosférico.
25. Método según cualquiera de las reivindicaciones 22 a 23, caracterizado por que el primer ciclo de Brayton produce O₂ diluido con CO₂.
26. Método según la reivindicación 25, caracterizado por que el CO₂ con el que se diluye el O₂ se obtiene del aire atmosférico.
27. Método según la reivindicación 25, caracterizado por que el CO₂ con el que se diluye el O₂ se produce por la combustión con hidrocarburo en el segundo ciclo de Brayton.
28. Método según cualquiera de las reivindicaciones 22 a 27, caracterizado por que siempre hay una etapa de enfriamiento después de cada etapa de compresión.
29. Método según cualquiera de las reivindicaciones 22 a 28, caracterizado por que se recupera calor de todas las fuentes residuales mediante combinación de los ciclos de Brayton primero y segundo realizando regeneraciones antes de cada enfriamiento.
30. Método según cualquiera de las reivindicaciones 22 a 29, caracterizado por que la energía mecánica producida por el segundo ciclo de Brayton se usa además para comprimir CO₂ producido hasta licuarlo.
31. Método según la reivindicación 30, caracterizado por que se comprime el CO₂ hasta al menos 7,5 MPa.
32. Método según cualquiera de las reivindicaciones 30 y 31, en el que el segundo ciclo de Brayton está anidado con un ciclo de Otto, caracterizado por que comprende succionar y comprimir CO₂ sobrante acumulado en conductos del motor.
33. Método según cualquiera de las reivindicaciones 30 y 31, en el que el segundo ciclo de Brayton está anidado con un ciclo Diésel, caracterizado por que comprende comprimir el CO₂, permitiendo la descarga de CO₂ y la admisión de O₂ sustancialmente puro, empleándose este último como gas de arrastre en membranas de separación selectivas de CO₂.
34. Método según cualquiera de las reivindicaciones 24 ó 25, caracterizado por que comprende además un ciclo de Brayton a vacío (CBV) para enfriar más intensamente el O₂ sustancialmente puro, o el O₂ diluido con CO₂, antes de una compresión posterior.

35. Método según cualquiera de las reivindicaciones 30 a 34, caracterizado por que comprende almacenar CO₂ licuado producido.
36. Método según la reivindicación 35, caracterizado por que comprende usar el CO₂ almacenado para bombear combustible hacia los cilindros del motor.
- 5 37. Método según cualquiera de las reivindicaciones 30 a 36, caracterizado por que comprende transferir el CO₂ licuado producido a un surtidor de una red logística de CO₂ externa.

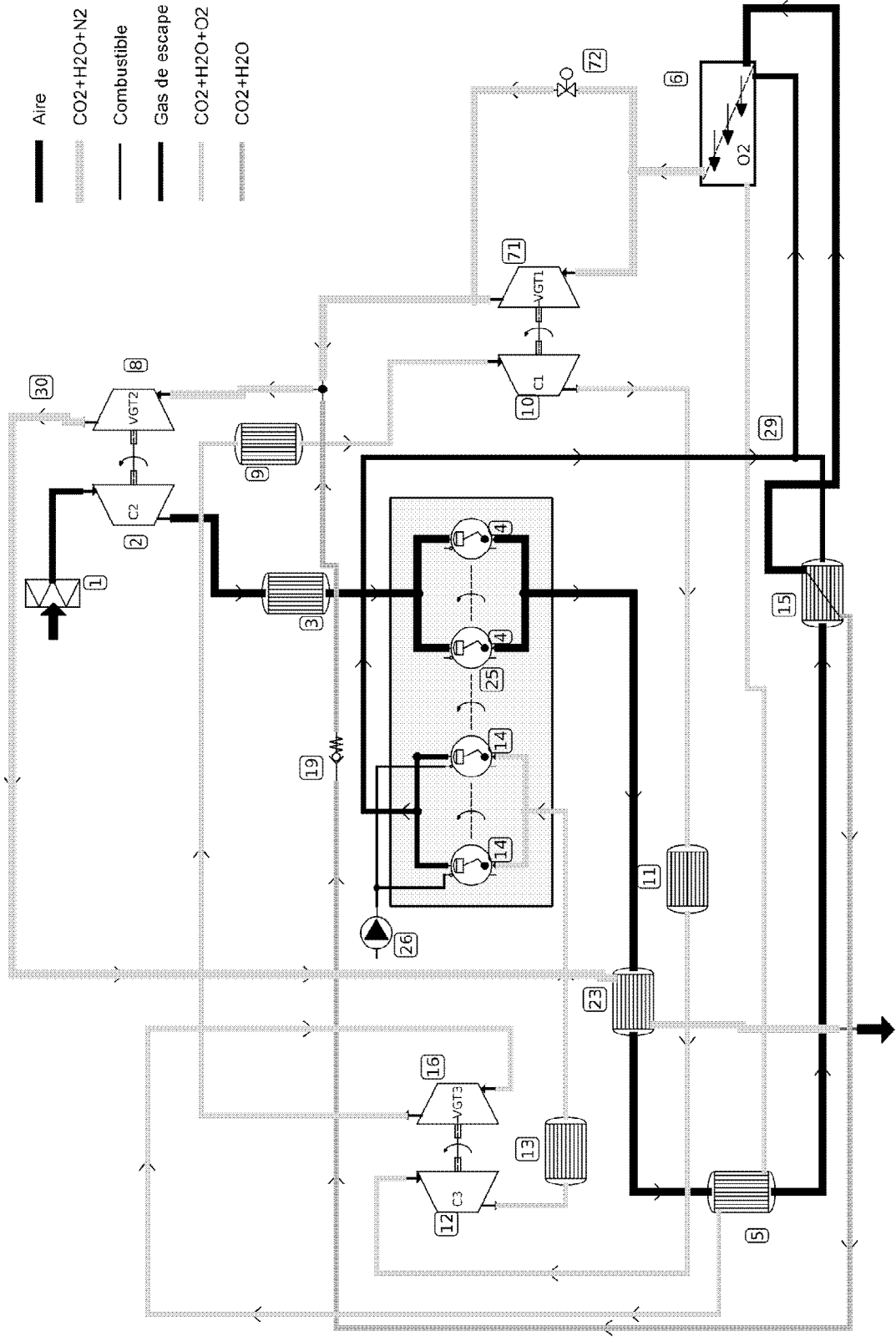


FIG. 1

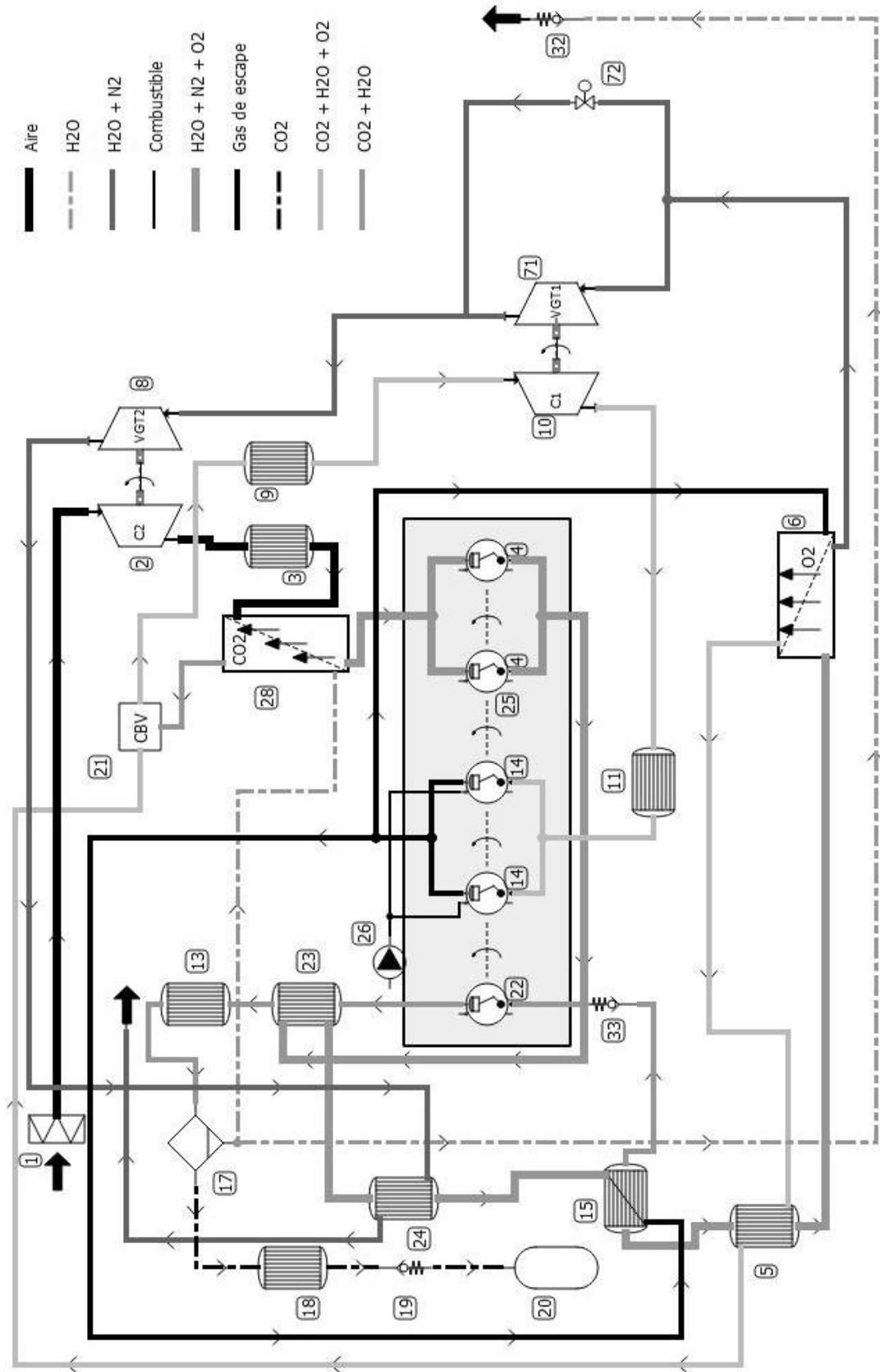


FIG. 2a

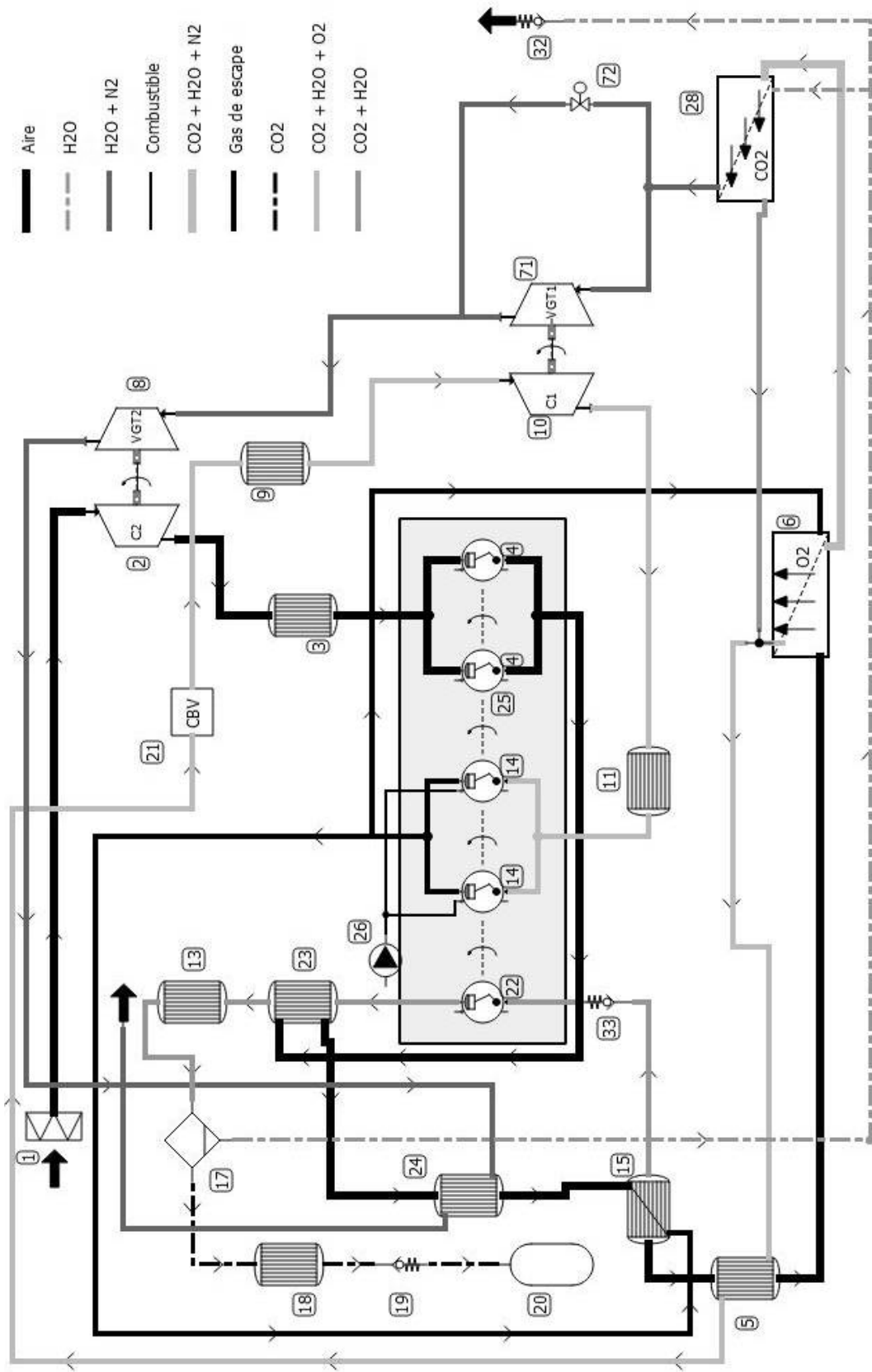


FIG. 2b

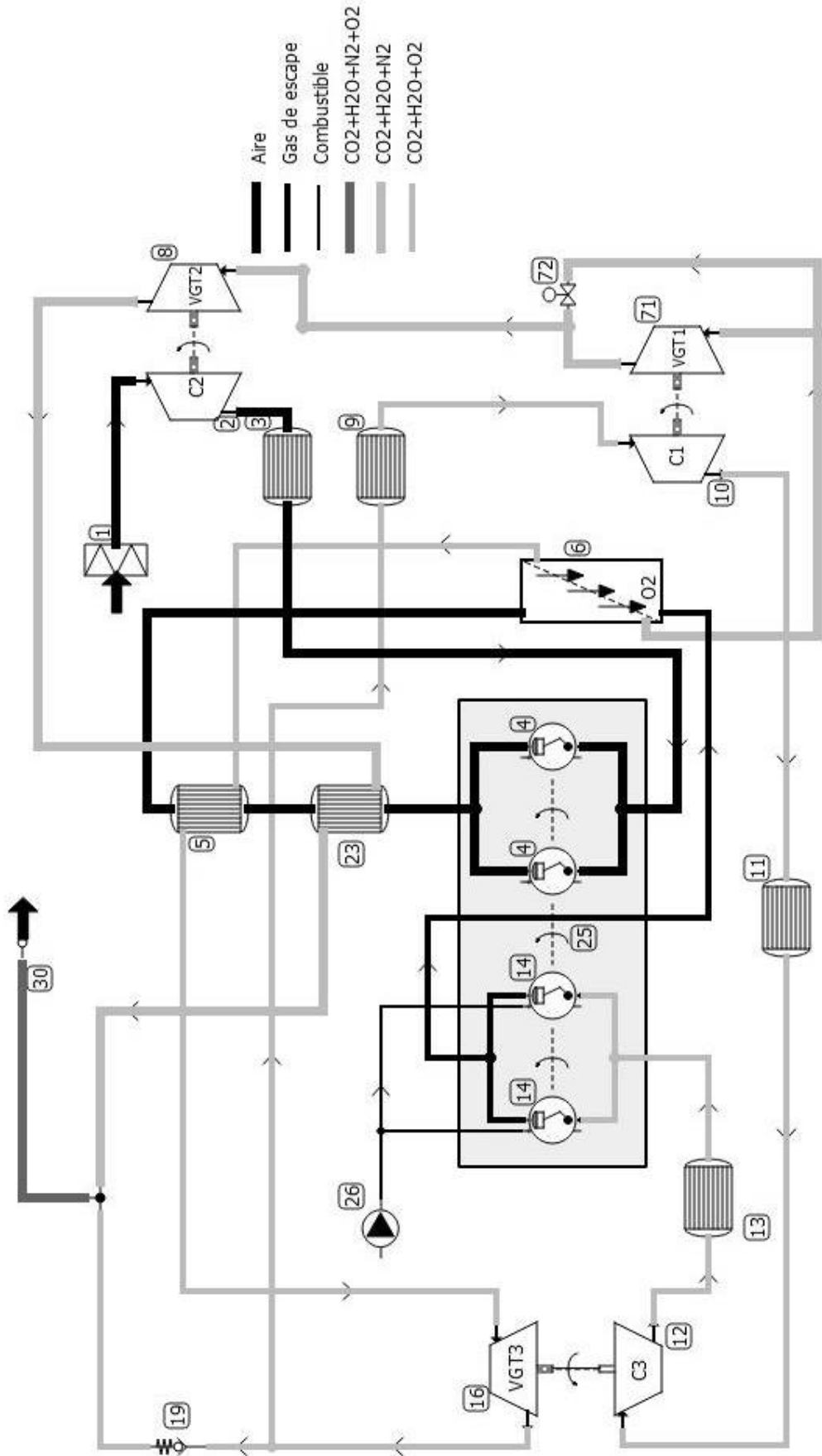


FIG. 3

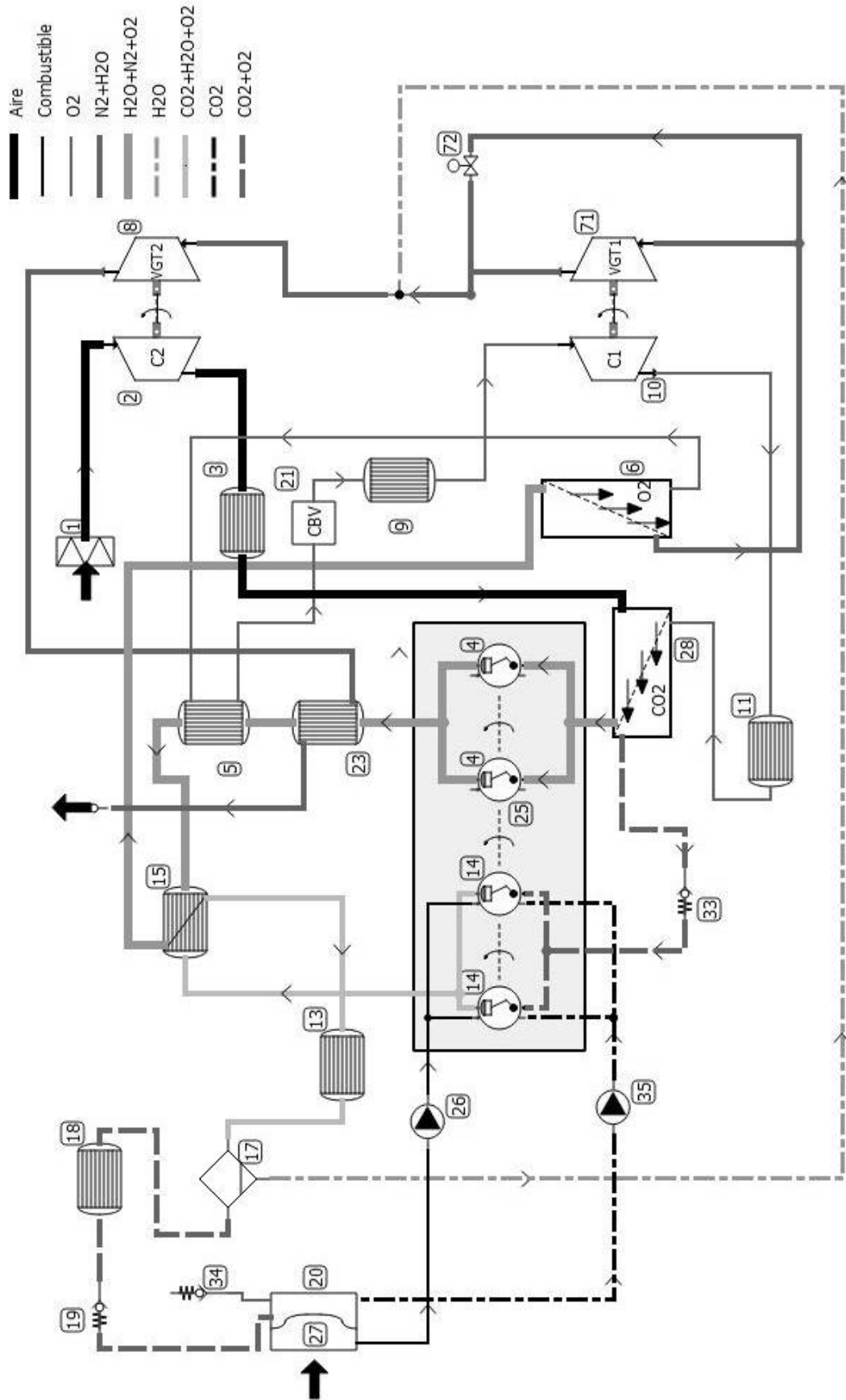


FIG. 4a

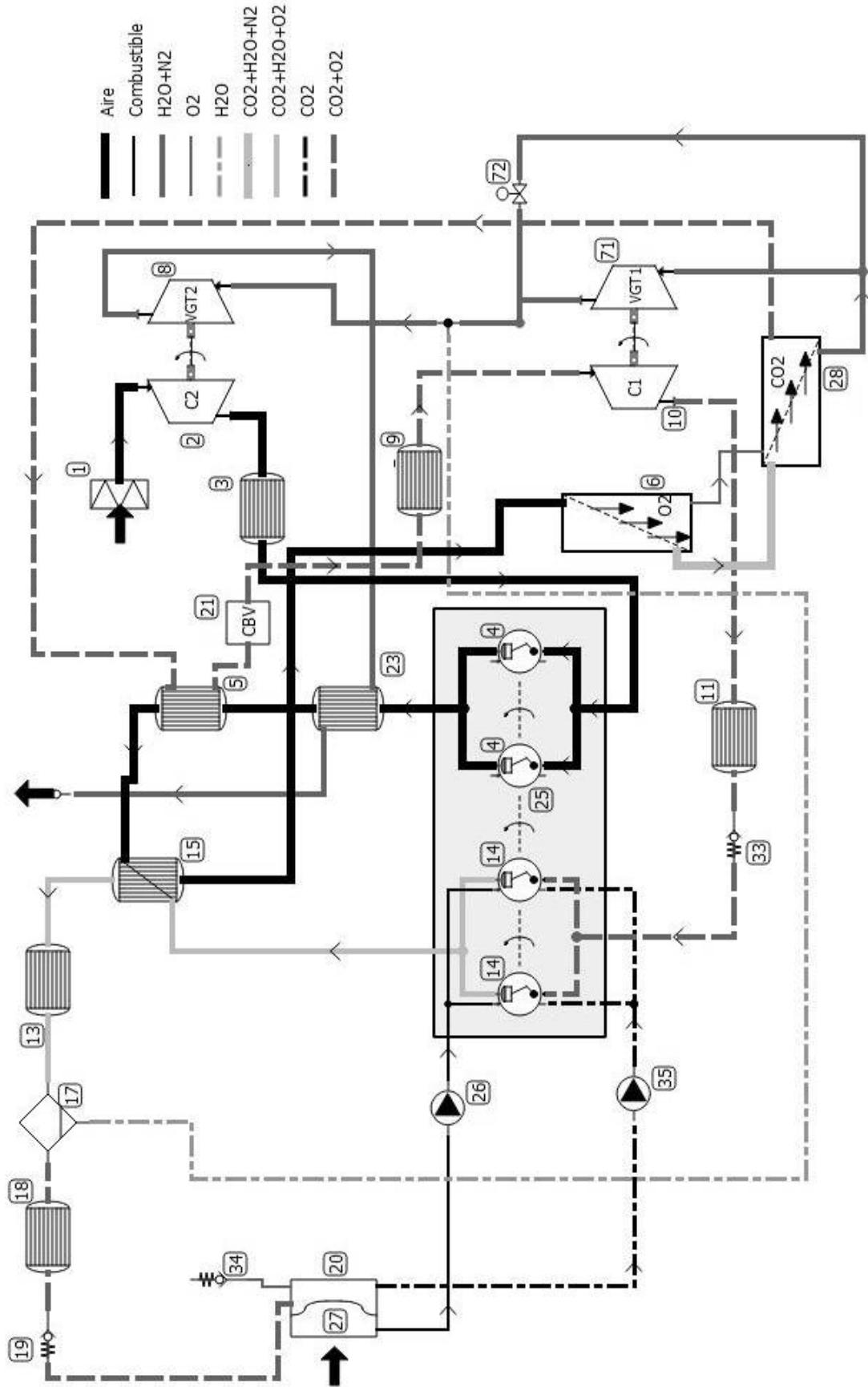


FIG. 4b

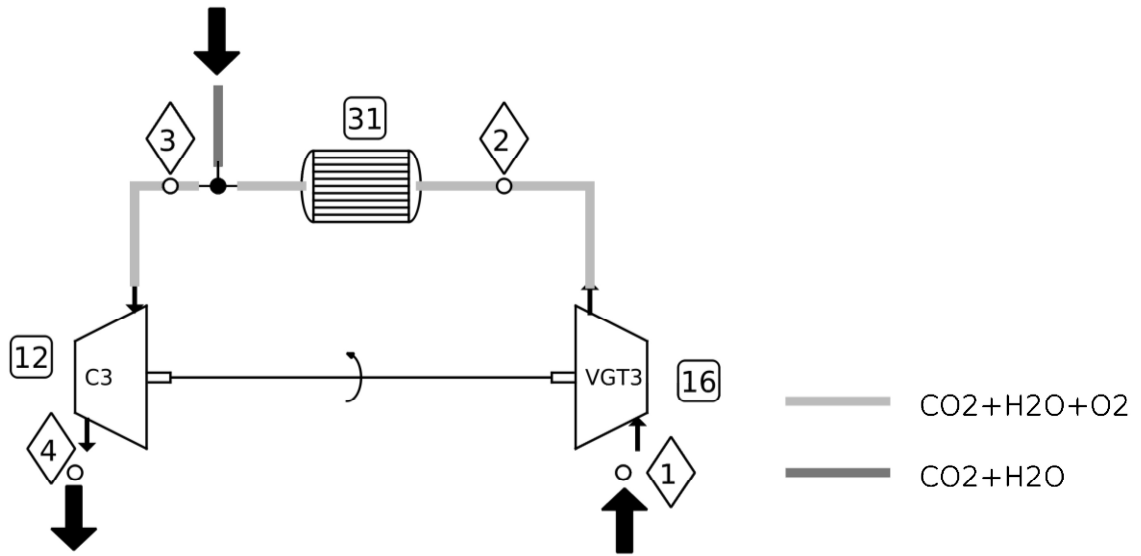


FIG. 5a

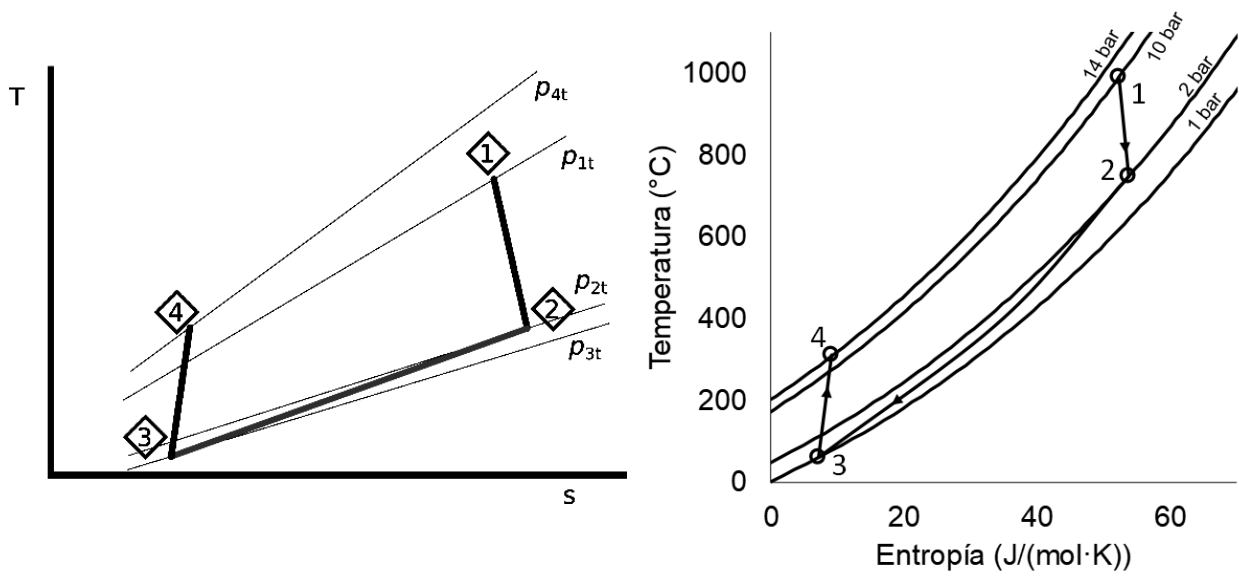


FIG. 5b

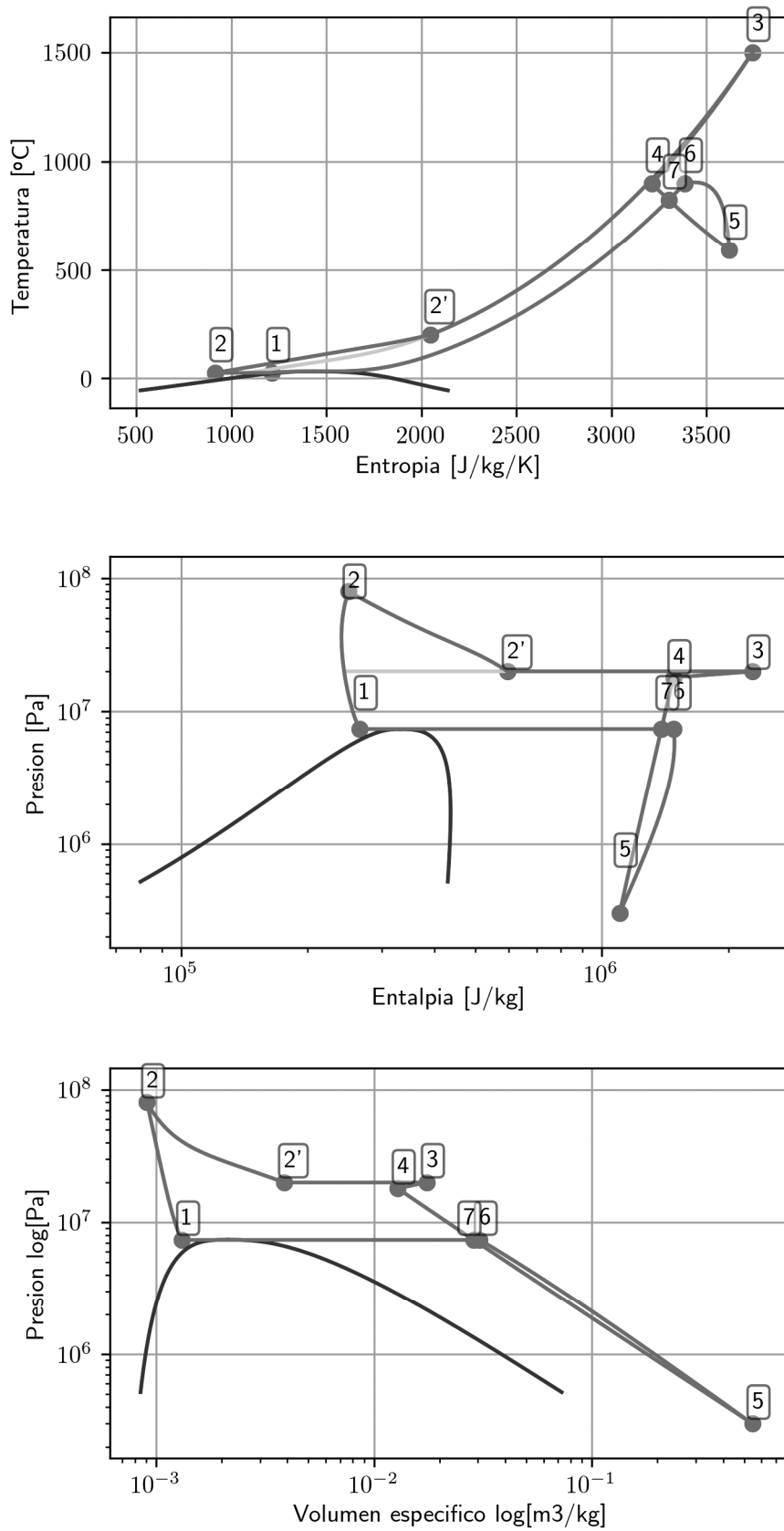


FIG. 6

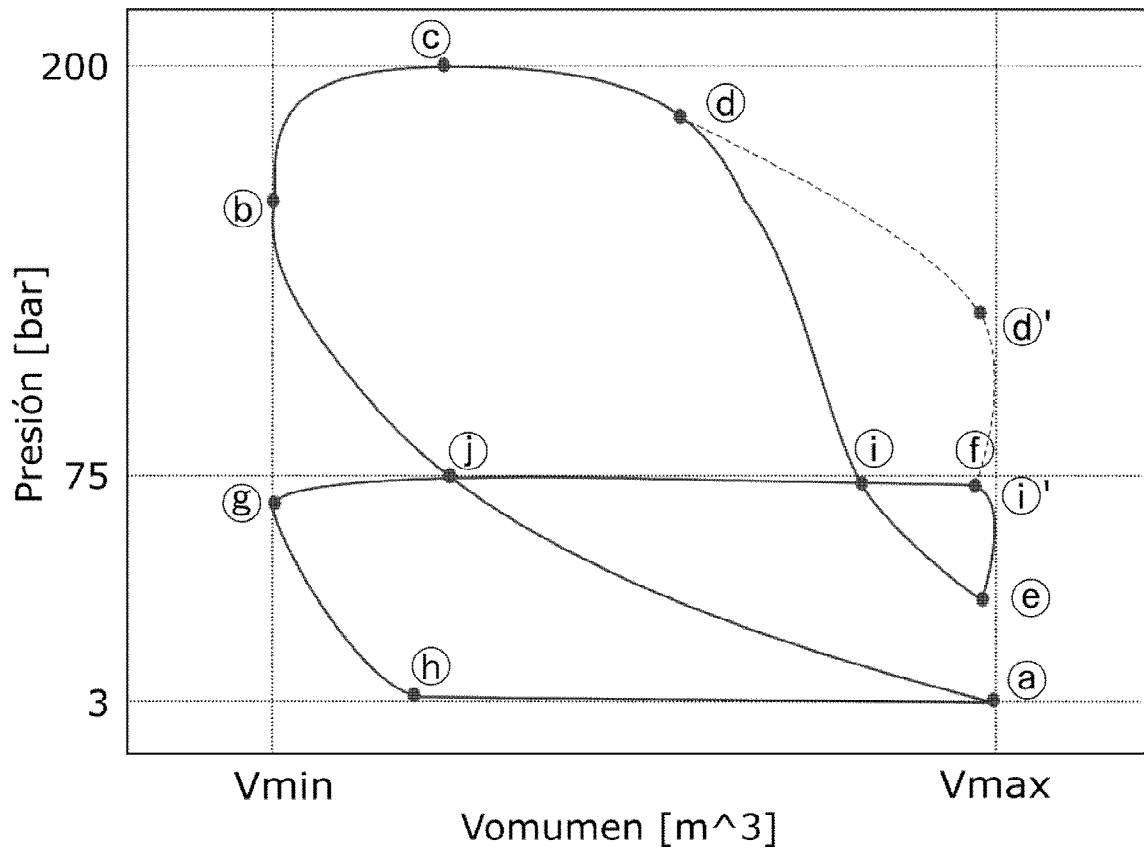


FIG. 7

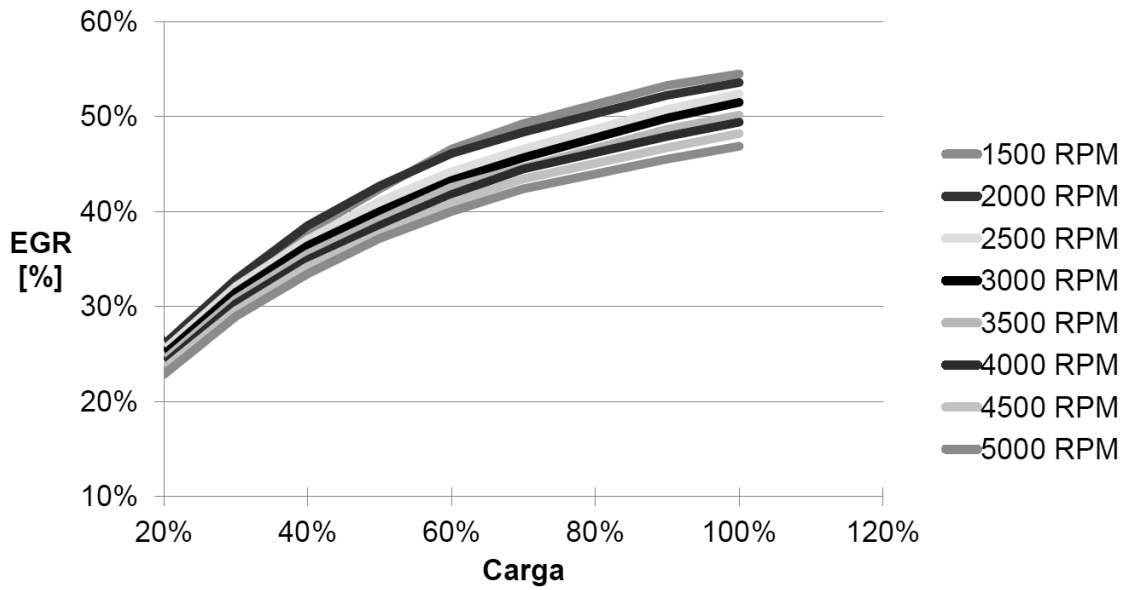


FIG. 8

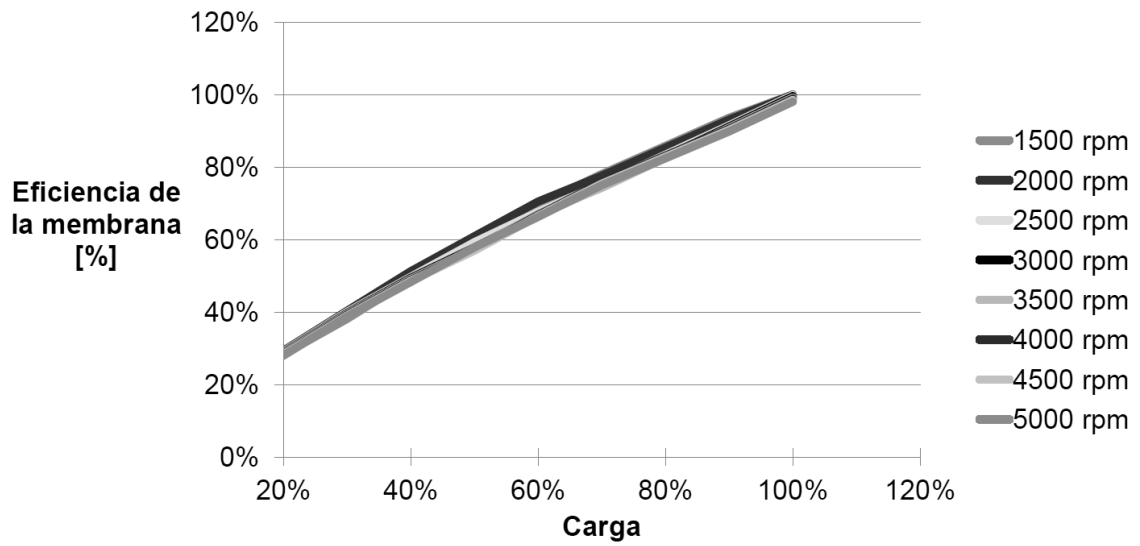


FIG. 9

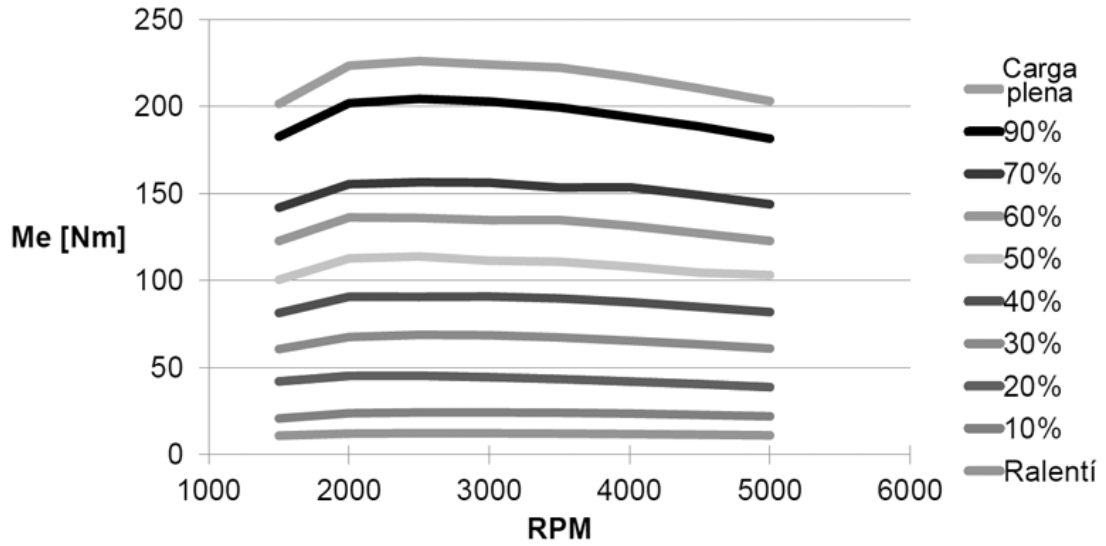


FIG. 10

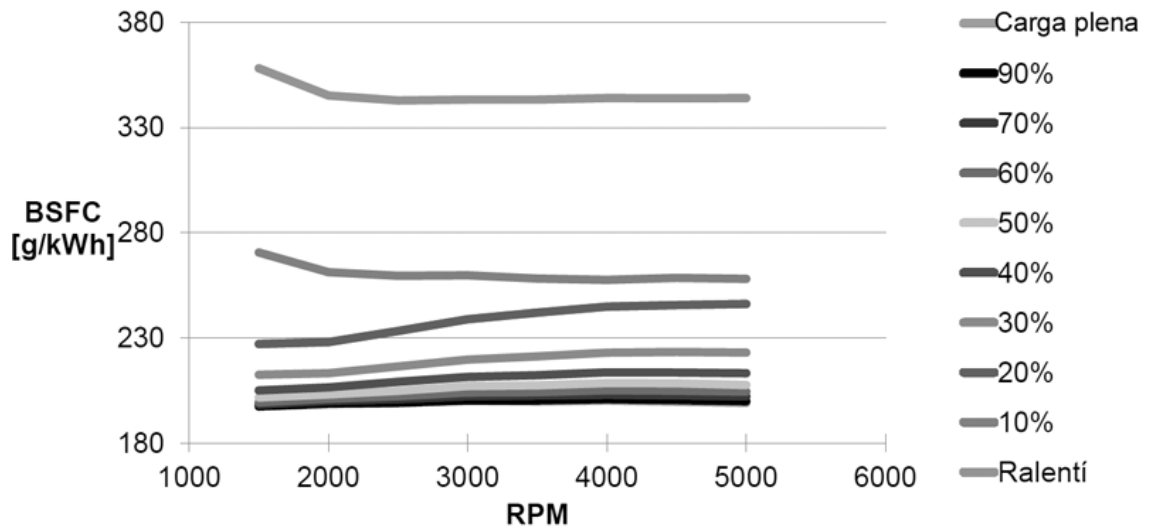


FIG. 11

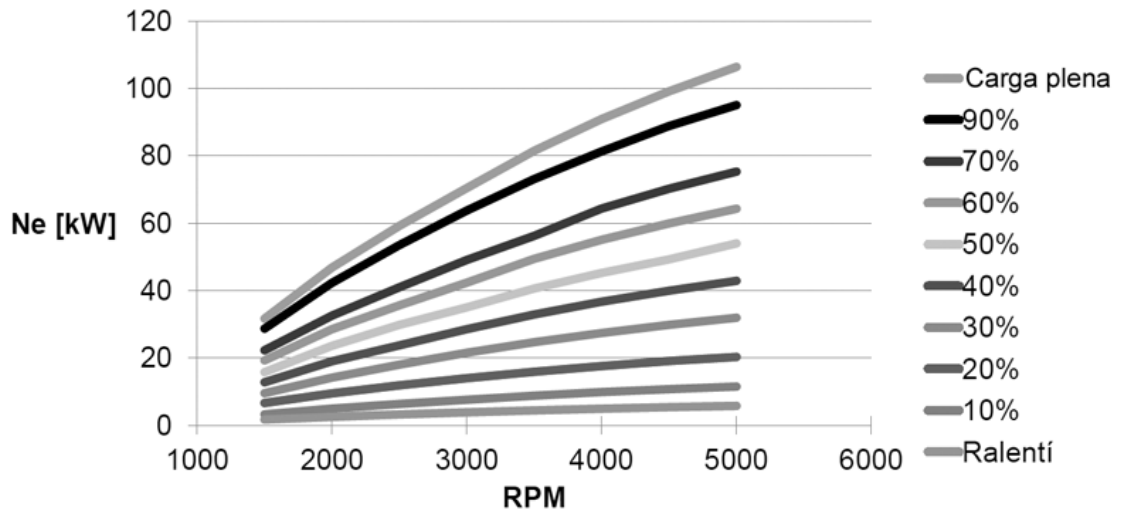


FIG. 12

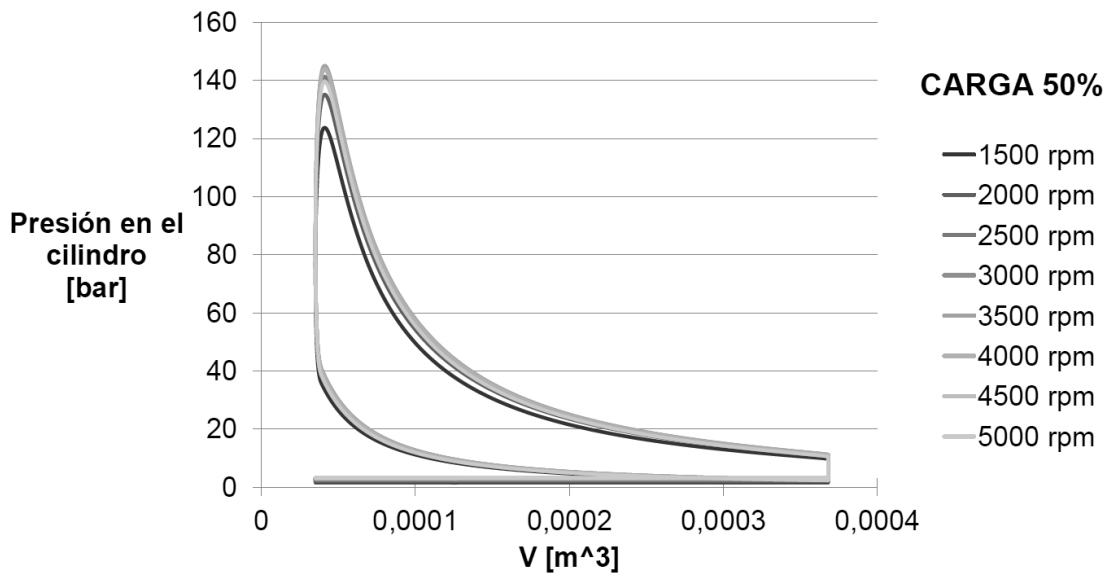


FIG. 13



OFICINA ESPAÑOLA
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

②① N.º solicitud: 201930285

②② Fecha de presentación de la solicitud: 28.03.2019

③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤① Int. Cl.: Ver Hoja Adicional

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	US 2013247886 A1 (HAMAD ESAM ZAKI et al.) 26/09/2013, Todo el documento.	1, 8, 11, 16, 18, 19, 20-22, 27, 30, 35, 37
A	DE 19710839 A1 (BOSCH GMBH ROBERT) 17/09/1998, Todo el documento.	1
A	ES 2688588 A1 (VALLS GUIRADO JUAN FRANCISCO et al.) 05/11/2018, Todo el documento.	1
A	CN 108331625 A (UNIV HUAZHONG SCIENCE TECH) 27/07/2018, Todo el documento.	1
A	WO 2018203024 A1 (CEOX LTD) 08/11/2018, todo el documento.	1

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe
04.02.2020

Examinador
G. Barrera Bravo

Página
1/2

CLASIFICACIÓN OBJETO DE LA SOLICITUD

F02M25/12 (2006.01)

F02M35/10 (2006.01)

B01D53/22 (2006.01)

C01B13/02 (2006.01)

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

F02B, B01D, C01B, F02M

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, WPI