

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 442 941**

51 Int. Cl.:

F02C 1/04 (2006.01)

F01K 3/12 (2006.01)

F01K 25/00 (2006.01)

F02C 6/14 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.04.2008 E 08805672 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.10.2013 EP 2147193**

54 Título: **Instalación y procedimientos de almacenamiento y restitución de energía eléctrica**

30 Prioridad:

11.05.2007 FR 0755010

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

14.02.2014

73 Titular/es:

**SAIPEM SA (100.0%)
1/7, AVENUE SAN FERNANDO
78180 MONTIGNY-LE-BRETONNEUX, FR**

72 Inventor/es:

RUER, JACQUES

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 442 941 T3

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

DESCRIPCIÓN

Instalación y procedimientos de almacenamiento y restitución de energía eléctrica.

- 5 La presente invención se refiere a una instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica adecuada para almacenar varias decenas, incluso varios miles de MWh, así como a unos procedimientos de almacenamiento de energía eléctrica en forma de energía térmica en los que se utiliza una instalación según la invención y a un procedimiento de restitución de una energía eléctrica a partir de una energía térmica almacenada mediante un procedimiento según la invención.
- 10 La presente invención se refiere al almacenamiento de energía a alta temperatura y más particularmente al almacenamiento de energía eléctrica, para restituirla sobre la red eléctrica durante los picos de consumo.
- 15 La producción de corriente eléctrica se realiza en general por centrales que utilizan diversos carburantes para producir la energía, tal como el gas, el petróleo, el carbono o el lignito. Otro medio consiste en utilizar combustible nuclear para producir calor que será entonces transformado en energía eléctrica en turbinas de vapor a alta presión.
- 20 Se conocen también las energías renovables que participan en una parte muy variable en la producción de electricidad según los países. Se pueden citar entre otros la energía hidráulica de las presas, las eólicas, las energías de corriente marina que extraen su energía de las corrientes marinas, así como diversos dispositivos que recuperan la energía del oleaje marino, o también la energía solar.
- 25 Aunque las instalaciones que producen electricidad a partir de combustibles o a partir de agua retenida en presas pueden funcionar de manera continua a potencia nominal o máxima durante muy largos periodos, las energías renovables están caracterizadas por un funcionamiento intermitente, y su integración en una red permite en general descargar sólo una parte de las centrales convencionales, siendo algunas de ellas entonces puestas a velocidad ralentizada, o bien simplemente paradas, a la espera de una demanda de potencia por parte de la red.
- 30 Se conocen las diversas técnicas que utilizan unas turbinas para producir energía mecánica a partir de carburantes, tal como el gas o el petróleo, que consisten en comprimir un comburente, en general aire, después en mezclarlo con un carburante, y después en quemarlo en una cámara de combustión, y por último en dirigirlo hacia una turbina de expansión para recuperar la energía mecánica producida, estando el compresor y la turbina de expansión montados en línea sobre el mismo árbol mecánico. En este tipo de máquina giratoria, se busca un rendimiento máximo, el cual está en función del nivel de temperatura de entrada de la turbina de expansión. Los límites de temperatura de funcionamiento se deben a la resistencia en temperatura de los álabes de la turbina de expansión, debido al carácter tan agresivo de los gases de combustión a muy alta temperatura, estando estos últimos en general constituidos por CO₂, de NO_x y otros compuestos agresivos frente a aleaciones que constituyen los álabes de la turbina.
- 35 Se conocen también las turbinas de vapor que se utilizan en las centrales nucleares para convertir la energía del agua llevada a temperatura muy elevada en forma de vapor, en energía mecánica, y después en energía eléctrica dentro de generadores acoplados al final del árbol de las turbinas de vapor. Estas turbinas de vapor funcionan en circuito cerrado con, como fluido caloportador, agua en fase vapor aguas arriba de la turbina y agua líquida aguas abajo de dicha turbina.
- 40 Durante mucho tiempo se ha buscado almacenar la energía, con el fin de poder disponer de ella de manera casi instantánea durante los picos de consumo. Se han desarrollado numerosas técnicas y se pueden citar, entre otros, los acumuladores eléctricos, en general acumuladores de plomo, o el bombeo de agua en presas en altitud, para volver a pasar por la turbina durante los picos de demanda de energía.
- 45 El almacenamiento de energía dentro de baterías eléctricas de plomo es válida para las pequeñas o medianas capacidades, pero cuando se necesita almacenar el equivalente de una parte de central nuclear, es decir aproximadamente 1200 MW en periodos de 24 o 36 horas, las instalaciones requeridas se vuelven entonces gigantescas y totalmente irrealistas.
- 50 Aunque las presas constituyen un excelente medio de almacenamiento de la energía, los sitios están desafortunadamente limitados en número y además el almacenamiento de cantidades muy grandes de energía necesita movilizar cantidades enormes de agua que deben entonces ser extraídas sobre las cuotas disponibles, para ser después liberadas en periodos en los que no se necesitan estas cantidades de agua, por ejemplo para la irrigación, siendo entonces el agua más o menos desperdiciada. Sin embargo, varios sitios están constituidos por una reserva alta y por una reserva baja, en general lagos de gran capacidad y, en periodo de almacenamiento, se bombea el contenido del lago inferior hacia el lago superior, para turbinarlo en sentido inverso a partir del momento en el que picos de consumo necesitan potencia de apoyo sobre la red eléctrica.
- 55 Otro medio consiste en almacenar la energía en forma de aire comprimido, para retransformarla después en energía mecánica a través de motores con pistones, con paletas o también de turbinas.
- 60
- 65

Se conoce la patente WO-2005-108758 que describe un modo de almacenamiento de energía en forma de calor en un recinto subterráneo, siendo el calor generado por la compresión de aire inicialmente a presión atmosférica y a temperatura ambiente, siendo la temperatura dentro del almacén enterrado de aproximadamente 700°C. En esta aplicación, el gas, aire, circula en circuito abierto, desde la atmósfera libre hacia la caverna durante la fase de almacenamiento y, desde la caverna hacia la atmósfera libre durante la fase de restitución de la energía.

En otro campo técnico, se conocen los regeneradores empleados habitualmente en las industrias del fuego, es decir en los altos hornos, en la industria de la cerámica y de la terracota, en la industria del vidrio y en las fábricas de cemento, que consiste en enviar los gases quemados calientes a grandes torres para recalentar las masas refractarias que comprenden con el fin de recuperar las calorías de los gases, antes de liberar dichos gases en la atmósfera. Cuando se alcanza la temperatura máxima en los materiales refractarios, se detiene la circulación de gas caliente y se envía a contra corriente aire fresco que se recalienta entonces en contacto con los materiales refractarios para ser por último dirigido hacia la entrada de los hornos, o a nivel de los quemadores. Estas disposiciones permiten reducir radicalmente las pérdidas de calor dentro de procesos industriales de grandes consumidores en energía.

El documento WO 2006/0721185 describe una instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica que comprende unos depósitos de calor constituidos por material sólido atravesados por agua o vapor de agua.

El problema planteado es el de almacenar la energía eléctrica de centrales convencionales, tales como centrales de carbón, de gas, de petróleo, o también de centrales nucleares, para poder restituirla muy rápidamente y en cantidad considerable, en la red eléctrica durante los periodos de picos cuando la demanda en energía supera la capacidad de producción.

Asimismo, en el caso de las energías renovables, tales como las eólicas, las energías de corriente marina, el problema es poder almacenar cantidades de energía considerables en periodo de viento o de corrientes importantes, que corresponde a excedentes de producción, para restituir esta energía en fase de déficit de producción, es decir cuando el viento o las corrientes no permiten mantener el nivel de producción de energía a un límite mínimo.

Para ello, la presente invención consiste esencialmente en almacenar cantidades considerables de energía eléctrica en forma de calor dentro de masas de productos refractarios, permitiendo el fluido la transferencia de energía, que es un gas, preferentemente un gas neutro, tal como argón, y después en restituir esta energía potencial térmica almacenada, en forma de energía eléctrica.

Más precisamente, la presente invención proporciona una instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica, caracterizada porque comprende:

- dos primer y segundo recintos que contienen un gas y unos primer y segundo materiales refractarios porosos aptos para transferir calorías térmicas por contacto entre dichos materiales refractarios porosos y un gas que circula a través de dichos recintos, y
- un circuito cerrado de canalizaciones que permite la circulación de un gas que atraviesa sucesivamente cada uno de los dos recintos de un extremo al otro, y
- unos medios de compresión y unos medios de expansión del gas que circula en dichas canalizaciones entre cada uno de los extremos de un recinto unido a un extremo del otro recinto, y
- preferentemente, unos primeros medios de calentamiento de gas aptos para calentar el gas que circula en dicho segundo recinto, y
- más preferentemente, unos medios de enfriamiento de gas que circula entre uno de los extremos del primer recinto y dichos medios de compresión y unos medios de expansión, aptos para enfriar el gas que sale de dicho primer recinto por este extremo antes de ser expandido en dichos medios de expansión o respectivamente el gas que entra en dicho primer recinto después de haber sido comprimido por dichos medios de compresión.

Se entiende que las dos denominadas enésimas canalizaciones superiores (o inferiores) pueden ser o bien dos canalizaciones paralelas que aseguran la unión entre dichas turbina/compresor y un mismo recinto, o bien una de los dos comprende una canalización en derivación de la otra antes de dichos turbina/compresor.

Más particularmente, según la invención una instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica comprende:

- A) un primer recinto calorifugado llenado con un primer material refractario poroso apto para ser atravesado por un gas que circula a través de dicho primer recinto entre 2 extremos superior e inferior de dicho primer recinto, y

- 5 B) un segundo recinto calorifugado llenado con un segundo material refractario poroso apto para ser atravesado por un gas que circula a través de dicho segundo recinto entre 2 extremos superior e inferior de dicho segundo recinto, y
- 10 C) unas canalizaciones calorifugadas que permiten la circulación de gas en circuito cerrado entre los 2 recintos que comprenden unas primeras y segundas canalizaciones superiores entre los extremos superiores de los dos recintos y unas primeras y segundas canalizaciones inferiores entre los extremos inferiores de los dos recintos, y
- 15 D) preferentemente, unos primeros medios de calentamiento de gas aptos para calentar el gas en el interior de dicho segundo recinto, y
- 20 E) unos primeros medios de compresión de gas que comprenden un primer motor eléctrico apto para ser alimentado por una energía eléctrica a almacenar para accionar un primer compresor apto para comprimir un gas que procede de dicho extremo superior del segundo recinto por una denominada segunda canalización superior para enviarlo a dicho extremo superior del primer recinto mediante una primera canalización superior, y
- 25 G) unos segundos medios de compresión de gas aptos para comprimir el gas que procede de dicho extremo inferior del segundo recinto por otra segunda canalización inferior para enviarlo a dicho extremo inferior del primer recinto por otra primera canalización inferior, y
- 30 H) unos segundos medios de expansión de gas que comprenden una segunda turbina apta para expandir el gas que procede de dicho extremo superior del primer recinto por otra primera canalización superior para enviarlo a dicho extremo superior del segundo recinto por otra segunda canalización superior, siendo dichos segundos medios de expansión aptos para accionar un generador eléctrico apto para restituir energía eléctrica, y
- 35 I) unos medios de enfriamiento de gas, preferentemente un intercambiador térmico aptos para enfriar un gas que circula en dichas primeras canalizaciones inferiores entre, por un lado, el extremo inferior del primer recinto y, por otro lado, la salida y la entrada de dichos segundo compresor y respectivamente primera turbina.

40 Preferentemente, la instalación de almacenamiento y restitución de la energía eléctrica según la invención comprende unos segundos medios de calentamiento de gas aptos para calentar el gas que circula en dicha segunda canalización superior entre el extremo superior de dicho segundo recinto y dicho primer compresor.

Según otras características ventajosas de la instalación según la invención:

- 45 - dicha primera turbina es apta para ser accionada por dicho primer compresor al que está acoplada mecánicamente,
- dicha segunda turbina está acoplada a un motor eléctrico auxiliar apto para accionarlo,
- 50 - dicho segundo compresor está accionado por dicha segunda turbina a la que está acoplado mecánicamente.

En un modo preferido de realización, la instalación según la invención está llena de un gas neutro, preferentemente argón.

55 Como se explicará más adelante, este gas argón es ventajoso ya que se trata de un gas permanente y neutro, por lo tanto no corrosivo para las canalizaciones, gas mono-atómico que presenta la ventaja de calentarse fácilmente, por lo tanto con una tasa de compresión limitada, y un coste reducido debido a su abundancia.

En unos modos de realización particulares, la instalación presenta las características según las cuales:

- 60 - dichos primer recinto y primer material refractario poroso son capaces de resistir a una temperatura T1 de por lo menos 750°C, preferentemente de por lo menos 750 a 2000°C, preferentemente también de 1000 a 1500°C, y
- 65 - dicha segunda turbina está dimensionada para expandir un gas a dicha temperatura T1, mientras que dicha primera turbina, de menor capacidad que la segunda turbina, está dimensionada para expandir un gas de la temperatura ambiente T0 a una temperatura T3 de -80 a -20°C, y

- 5
- dichos segundo recinto y segundo material refractario porosos son capaces de resistir a una temperatura T₂ de por lo menos 400°C, preferentemente de por lo menos 400°C a 1000°C, más preferentemente de 500 a 700°C, y
 - dicho primer compresor está dimensionado para comprimir un gas a dicha temperatura T₂, mientras que dicho segundo compresor, de menor capacidad que el primer compresor, está dimensionado para comprimir un gas de la temperatura T₃ de -80 a -20°C a la temperatura ambiente.
- 10 Más particularmente aún, dicho primer compresor es apto para liberar un caudal volúmico más importante que dicha primera turbina, y dicha segunda turbina es apta para liberar un caudal volúmico más importante que dicho segundo compresor y dichos primer compresor y segunda turbina están realizados en carbono.
- 15 Preferentemente, dichos materiales refractarios presentan una capacidad calorífica volúmica intrínseca de por lo menos 2000 kJ x m⁻³ x K⁻¹, preferentemente aún por lo menos 2800 kJ x m⁻³ x K⁻¹.
- Ventajosamente, dicho primer y segundo materiales refractarios porosos presentan una porosidad del 20 al 60%.
- 20 Más particularmente, dicho primer y segundo materiales refractarios porosos están constituidos por ladrillos porosos ensamblados unos contra otros, preferentemente atravesados por perforaciones cilíndricas dispuestas paralelamente en una misma dirección longitudinal que dicho recinto en el que están ensamblados, siendo dichas perforaciones más preferentemente de 5 a 20 mm de diámetro.
- 25 En unos modos de realización particulares, dicho primer y segundo materiales refractarios porosos están constituidos por arcilla cocida, o por productos cerámicos con contenidos elevados en compuestos seleccionados de entre los óxidos, magnesita, alúmina y cal.
- Se pueden citar como materiales refractarios las chamotas, magnesita, dolomita, mulita, e incluso el carbono.
- 30 Más particularmente, dicho primer material refractario poroso está constituido por arcilla de segunda cocción o chamota, y dicho segundo material refractario poroso está constituido por arcilla de primera cocción.
- 35 En un modo de realización particular, dicho primer y segundo recintos tienen un volumen cada uno de por lo menos 5000 m³, preferentemente de 10000 a 45000 m³.
- La presente invención proporciona también un procedimiento de almacenamiento de energía eléctrica en forma de energía térmica en el que se utiliza una instalación según la invención, caracterizado porque, después de una etapa inicial de precalentamiento del gas de dicho segundo recinto, que se calienta a una temperatura T₂, estando dicha instalación llenada con un gas permanente, inicialmente a temperatura ambiente T₀, se realizan las etapas sucesivas en las que:
- 40
- 1) el gas que sale del extremo superior del segundo recinto a una temperatura T₂ se calienta a una temperatura T₁ superior a una temperatura T₂ por compresión en dicho primer compresor antes de ser enviado al extremo superior de dicho primer recinto, en el que se establece una presión P₁ superior a la presión P₂ del segundo recinto, siendo dicho primer compresor arrastrado por un primer motor eléctrico alimentado por la energía eléctrica a almacenar, y
 - 45
 - 2) el gas atraviesa de un lado a otro dicho primer recinto entre dicho extremo superior y su dicho extremo inferior y vuelve a salir de dicho extremo inferior del primer recinto a una temperatura ambiente T₀ o una temperatura T'₁ superior a T₀ pero inferior a T₂, y
 - 50
 - 3) el gas se enfría después, llegado el caso, a una temperatura ambiente T₀ gracias a dichos medios de enfriamiento de gas preferentemente del tipo intercambiador de calor, aguas abajo de la salida del extremo inferior del primer recinto, y
 - 55
 - 4) el gas se expande después a través de dicha primera turbina, preferentemente arrastrada por dicho primer compresor, a dicha presión P₂ del segundo recinto inferior a la presión P₁, el gas se encuentra así enfriado a una temperatura T₃ inferior a T₀ antes de entrar en dicho segundo recinto por su extremo inferior, y
 - 60
 - 5) se hace circular el gas a través de dicho segundo recinto entre dichos extremos inferior y superior del segundo recinto, lo cual tiene por efecto aumentar el volumen de material refractario de la parte inferior de dicho segundo recinto enfriada a la temperatura T₃, y disminuir éste en su parte superior a la temperatura T₂ o T'₂ inferior a T₂, pero superior a T₀ y T'₁, y si es necesario, llegado el caso, se calienta a la temperatura T₂ el gas que sale del segundo recinto a la temperatura T'₂, con la ayuda de unos segundos medios de calentamiento del gas, y
 - 65

6) se repiten las etapas 1) a 5) anteriores hasta que la parte superior del primer recinto recalentado a la temperatura T1 ocupe por lo menos el 80% del volumen de dicho primer recinto, y que la parte inferior del segundo recinto enfriada a la temperatura T3 ocupe por lo menos el 80% del volumen del segundo recinto.

5 Se entiende que en cada etapa 2), cuando el gas llega a la temperatura T1 en el extremo superior del primer recinto, el cual se encuentra inicialmente totalmente a la temperatura T0, y cuando el gas desciende desde el extremo superior hacia el extremo inferior del primer recinto, el paso del gas en dicho primer material refractario poroso tiene por efecto que el gas ceda sus calorías a dicho primer material refractario en la parte superior del primer recinto, el cual se encuentra entonces recalentado a la temperatura T1, mientras que su parte inferior no recalentada o menos
10 recalentada está a una temperatura T'1 entre T0 y T1, en la práctica entre T0 y T2. A medida que tienen lugar los pasos sucesivos del gas que circula en bucle cerrado, la parte frontal o más bien la capa de transición térmica entre la parte superior caliente y la parte inferior fría del primer recinto progresa hacia abajo y la parte superior a la temperatura T1 ocupa un volumen cada vez más importante. Paralelamente, en la etapa 5), el gas llega a una temperatura fría T3 debajo del segundo recinto, lo cual tiene por efecto ceder frigorías a dicho segundo material refractario poroso y por lo tanto enfriar la parte inferior del segundo recinto, el cual pasa de la temperatura T2 a la temperatura T3. Y, como en los diferentes pasos, la parte frontal o más bien la capa de transición térmica entre la parte superior caliente y la parte inferior fría del segundo recinto progresa hacia arriba y la parte inferior a la temperatura T3 ocupa un volumen cada vez más importante.

20 La energía eléctrica E1 utilizada para alimentar con energía el primer compresor está por lo tanto almacenada en forma de energía térmica en calorías en el primer recinto y frigorías en el segundo recinto, esta energía depende del gradiente T1-T3.

25 Preferentemente, se interrumpe el almacenamiento de manera que la parte inferior del primer recinto a dicha temperatura T'1 represente por lo menos el 10% del volumen del primer recinto, preferentemente del 10 al 20% de volumen del primer recinto, y/o la parte superior del segundo recinto a la temperatura T2 represente menos del 20%, preferentemente del 10 al 20% del volumen de dicho segundo recinto.

30 Según otras características particulares ventajosas de la presente invención, se utilizan unos materiales refractarios cuyas propiedades y masas son tales que:

- dichas temperaturas T1 y T2 son tales que $T1/T2=1,5$ a 3 y $T1/T0$ es superior a 2, preferentemente superior a 3 y más preferentemente inferior a 6 y $P1/P2$ es de 2 a 4, y
- 35 - T1 es de 750°C a 2000°C, preferentemente de 1000 a 1500°C, y T2 es de 400 a 1000°C, preferentemente de 500 a 700°C, y
- la presión P1 es de 2 a 4 bar absolutos ($2 \cdot 10^5$ a $4 \cdot 10^5$ Pa) y P2 es de 0,5 a 1,5 bar absolutos ($0,5 \cdot 10^5$ a $1,5 \cdot 10^5$ Pa), y
- 40 - T0 es de 10° a 50°C y T3 es de -80°C a -20°C, siendo T'1, llegado el caso, de 20°C a 150°C.

Ventajosamente, se almacena una cantidad de energía eléctrica de 20 MWh a 10.000 MWh.

45 La presente invención proporciona también un procedimiento de restitución de una energía eléctrica a partir de una energía térmica almacenada mediante un procedimiento según la invención tal como se ha definido anteriormente, caracterizado porque, después de una fase inicial de puesta en marcha, en la que se acciona dicho segundo compresor y dicha segunda turbina con dicho motor eléctrico auxiliar, estableciéndose durante dicha fase inicial un gradiente de presión entre la presión P'1 del primer recinto y una presión P'2 inferior a P'1 del segundo recinto, tal
50 que P'1 es superior a P'2, siendo P'1 preferentemente superior a P1 y siendo P'2 inferior a P2, se realizan las etapas sucesivas en las que:

- 1) el gas que sale por el extremo superior de primer recinto a dicha temperatura T1 está expandido y enfriado a la temperatura T2 a través de la segunda turbina, y dicha segunda turbina acciona dicho generador de electricidad que permite liberar una energía eléctrica restituida, y
- 55 2) el gas atraviesa dicho segundo recinto y después su extremo superior hasta su extremo inferior, siendo una parte superior del segundo recinto recalentado a dicha temperatura T2, permaneciendo una parte inferior del segundo recinto a dicha temperatura T3, y
- 60 3) el gas que sale del extremo inferior de dicho segundo recinto con su extremo inferior a la temperatura T3 es después comprimido pasando por dicho segundo compresor, preferentemente accionado por la energía liberada por la segunda turbina, con el fin de recalentarlo a una temperatura T4 superior a una temperatura ambiente T0 y, llegado el caso, superior a T'1, pero inferior a T2 en la salida de dicho segundo compresor, y
- 65 4) preferentemente, el gas se enfría después a la temperatura ambiente T0 o T'1 gracias a dichos medios de

enfriamiento antes de ser introducido en dicho primer recinto por su extremo inferior (1₂) para incorporarse a la parte inferior de dicho primer recinto que se encuentra a dicha temperatura T'1, y

5 5) se hace circular el gas a través de dicho primer recinto, lo cual tiene por efecto aumentar el volumen del material refractario de la parte inferior a dicha temperatura T'1 y disminuir el volumen de material refractario de la parte superior (1a) a dicha temperatura caliente T1, y

10 6) se reiteran las etapas 1) y 5) anteriores, hasta que la parte inferior del primer recinto a dicha temperatura T1 representa por lo menos el 80% del volumen del primer recinto y la parte superior de dicho segundo recinto a dicha temperatura T2 representa por lo menos el 80% en volumen de dicho segundo recinto.

15 Se entiende que, para mantener en los recintos las mismas temperaturas T1 y T2 que en el procedimiento de almacenamiento de energía según la invención, se debe establecer en la etapa inicial un gradiente de presión entre los dos recintos, superior con respecto al gradiente de presión entre los recintos durante el procedimiento de almacenamiento según la invención.

20 Se entiende que en la etapa 2) cuando el gas llega a la temperatura T2 en el extremo superior del segundo recinto, la cual se encuentra inicialmente a no más del 20% a la temperatura T2, incluso T'2 inferior a T2, y el gas desciende desde el extremo superior hacia el extremo inferior del segundo recinto, el paso del gas en dicho segundo material refractario poroso tiene por efecto que el gas ceda sus calorías a dicho segundo material refractario en la parte superior del segundo recinto, el cual se encuentra entonces recalentado a la temperatura T2 mientras que su parte inferior no recalentada permanece a la temperatura T3. A medida que tienen lugar los diferentes pasos del gas, la parte frontal o más bien la capa de transición térmica entre la parte superior caliente y la parte inferior fría del segundo recinto progresa hacia abajo y la parte inferior a la temperatura T3 ocupa un volumen cada vez menos importante. Paralelamente, en la etapa 5), el gas llega a una temperatura ambiente T0 o T'1 debajo del primer recinto, lo que tiene por efecto ceder unas frigorías a dicho primer material refractario poroso y por lo tanto enfriar la parte inferior del primer recinto, el cual pasa de la temperatura T1 a la temperatura T'1. Y, como en los diferentes pasos del gas, la parte frontal o más bien la capa de transición térmica entre la parte superior caliente y la parte inferior fría del primer recinto progresa hacia arriba y la parte superior a la temperatura T1 ocupa un volumen cada vez menos importante.

35 La energía eléctrica E₁ almacenada en forma de energía térmica en calorías en el primer recinto y frigorías en el segundo recinto se convierte así en energía eléctrica E_R a partir de la energía mecánica liberada por dicha segunda turbina utilizada durante la expansión y el enfriamiento del gas del primer recinto.

40 Preferentemente, en la etapa 6), se interrumpe el procedimiento de restitución de energía de manera que se mantiene una parte superior del primer recinto a dicha temperatura T1, representando dicha parte superior menos del 20%, preferentemente del 10 al 20%, en volumen de dicho primer recinto, y/o una parte inferior del segundo recinto a dicha temperatura fría T3 representa menos del 20%, preferentemente del 10 al 20%, de volumen del segundo recinto.

Ventajosamente, el rendimiento de restitución de energía eléctrica por dicho generador de electricidad E_R/E₁ es superior al 60%, preferentemente del 75 al 85%.

45 Según otras características ventajosas del procedimiento de restitución de energía eléctrica según la invención:

- P'1/P'2 es de 3 a 5, y
- T4 es de 150 a 400°C, y
- la presión P'1 es de 3 a 5 bar absolutos (3·10⁵ a 5·10⁵ Pa) y P'2 es de 1 a 1,5 bar absolutos (1·10⁵ a 1,5·10⁵ Pa).

55 Otras ventajas y características de la presente invención aparecerán a la luz de la descripción detallada siguiente, haciendo referencia a las figuras siguientes, en las que:

la figura 1 representa el diagrama funcional de una instalación según la invención en un procedimiento de almacenamiento de energía según la invención, es decir en fase de recarga del primer recinto o fuente caliente,

60 la figura 2 representa el diagrama funcional de la instalación según la invención, en una restitución en forma de energía eléctrica de la energía térmica almacenada dentro del primer recinto o fuente caliente,

la figura 3 representa en sección y en vista lateral un recinto de una instalación según la invención con un arrancado que muestra unas perforaciones cilíndricas,

65 las figuras 3A y 3B representan en sección según un plano horizontal, dos variantes de disposición de los

elementos de materiales refractarios respectivamente de forma cuadrada y hexagonal,

la figura 4 representa un ciclo termodinámico de tipo gas perfecto, así como una compresión y una expansión de un gas real,

5 la figura 5 representa el ciclo termodinámico de recarga del primer recinto a partir de una energía eléctrica que procede de la red,

10 la figura 6 representa el ciclo termodinámico de restitución de la energía que procede del primer recinto para su reinyección en la red,

las figuras 7, 7A y 7B representan la progresión de una capa de transición térmica de altura h dentro de un primer recinto (figura 7) entre los extremos superior (figura 7A) e inferior (figura 7B).

15 El dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica y restitución de energía eléctrica según la invención comprende:

- un primer recinto calorifugado 1, que comprende una pared de acero de 10 a 100 mm de grosor y llenado con un primer material refractario poroso capaz de resistir unas temperaturas y presiones elevadas de un gas neutro que contiene, T1 de 1000 a 1600°C, más particularmente 1300°C y P1 de 2 a 5 bar (bar absolutos o $2 \cdot 10^5$ a $5 \cdot 10^5$ Pa).
- un segundo recinto calorifugado 2, del mismo volumen de 10000 a 15000 m³ por ejemplo, que comprende una pared de acero de 10 a 100 mm y llenado con un segundo material refractario poroso capaz de resistir la temperatura T2 y presión P2 del gas inerte que contiene, a saber T2 de 500 a 700°C, más particularmente aproximadamente 600°C.

30 Dicho primer recinto 1 y segundo recinto 2 están sustancialmente llenados completamente con un material refractario poroso 11 de fuerte volumen calorífico, que se describirá más adelante.

El dispositivo comprende unos conductos de circulación en circuito cerrado entre dicho primer recinto 1 y segundo recinto 2 que permiten que el gas contenido en la instalación atraviese cada recinto entre dos extremos opuestos 1₁-1₂ y 2₁-2₂, situados preferentemente, respectivamente, a nivel de los extremos alto y bajo de dichos recintos.

35 Los conductos de circulación entre dicho primer y dicho segundo recintos comprenden además unos medios de compresión/expansión del gas entre los dos recintos, explicados a continuación.

Más particularmente, dicho primer y segundo recintos están dispuestos verticalmente.

40 En las figuras 1 y 2, el primer recinto 1 comprende en su extremo superior 1₁ un conducto superior 1d, que desemboca en la parte superior 1a del primer recinto, y en su extremo inferior 1₂ un primer conducto inferior 1c que desemboca en la parte inferior 1b del primer recinto 1.

45 Asimismo, el segundo recinto 2 comprende en su extremo superior 2₁ un segundo conducto superior 2d, que desemboca en la parte superior 2a del segundo recinto 2, y en su extremo inferior 2₂ un segundo conducto inferior 2c que desemboca en la parte inferior 2b del segundo recinto 2.

Dicho primer y segundo conductos inferiores 1c, 2c, y superiores 1d, 2d, están asimismo calorifugados.

50 Dicho segundo recinto 2 está acoplado con un primer calentador 5a, preferentemente un calentador que comprende una resistencia eléctrica 5a₁ y un circuito cerrado de canalización de recalentamiento 5a₃ entre dos extremos del segundo recinto, siendo el gas que circula en la canalización de recalentamiento 5a₃ recalentado por dicho primer calentador 5a.

55 Un primer grupo de compresión/expansión 3 está intercalado entre dicho primer recinto 1 y dicho segundo recinto 2. Este primer grupo de compresión/expansión 3 comprende un motor eléctrico 3a alimentado por una energía eléctrica E₁, que permite accionar un primer compresor dinámico 3b de tipo axial o centrífugo, y una primera turbina de gas 3c, acoplada a dicho compresor 3b, estando sus árboles respectivos unidos el uno al otro, como se explicará a continuación.

60 Dicho primer compresor 3b está unido en la salida al extremo superior 1₁ de dicho primer recinto 1 por dicha primera canalización superior 1d, y dicho primer compresor 3b está unido en su entrada al extremo superior 2₁ de dicho segundo recinto 2 por dicha segunda canalización superior 2d. Dicha segunda canalización superior 2d constituye la canalización de alimentación del primer compresor 3b y dicha primera canalización superior 1d que constituye la canalización de evacuación del gas del primer compresor 3b después de la compresión en ciclo de almacenamiento, tal como se explicará a continuación.

65

Un segundo calentador 5b, que comprende preferentemente una segunda resistencia 5a₂, coopera con dicha segunda canalización superior 2d, estando dicho segundo calentador 5b intercalado entre el extremo superior 2₁ del segundo recinto 2 y la entrada del primer compresor 3b.

5 Dicha primera turbina 3c está unida al extremo inferior 1₂ de dicho primer recinto 1 por dicha primera canalización inferior 1c, y dicha primera turbina 3c está unida al extremo inferior 2₂ de dicho segundo recinto 2 por dicha segunda canalización inferior 2c. Dicha primera canalización inferior 1c sirve para la alimentación de dicha primera turbina 3c con gas evacuado desde la parte baja 1b del primer recinto 1, y el gas que se evacua de dicha primera turbina 3c
10 llega a la parte baja 2b de dicho segundo recinto 2 por medio de dicha segunda canalización inferior 2c, cuando el dispositivo funciona en ciclo de almacenamiento, tal como se explicará a continuación.

Un intercambiador de calor 6 coopera con dicha primera canalización inferior 1c, entre el extremo inferior 1₂ de dicho primer recinto 1 y dicha primera turbina 3c.

15 Como se expone en la figura 2, un segundo grupo 4, denominado grupo generador de electricidad, está intercalado entre dicho primer recinto 1 y dicho segundo recinto 2 de la manera siguiente. Dicho segundo grupo generador de electricidad 4 comprende un segundo motor eléctrico 4d, acoplado a una segunda turbina de gas 4c y a un segundo compresor 4b. Este segundo motor eléctrico 4d es un pequeño motor que sirve esencialmente para lanzar la
20 segunda turbina 4c durante la puesta en marcha del ciclo de restitución/liberación de la energía, como se detallará a continuación.

El segundo grupo generador de electricidad 4 comprende un alternador eléctrico 4a, unido al árbol de salida de dicha segunda turbina de gas 4c y dicho segundo compresor 4b, con el fin de restituir una energía eléctrica E_R
25 cuando dichas segunda turbina 4c y segundo compresor 4b son activados, como se detallará a continuación, en un ciclo de liberación de energía.

Dicha segunda turbina 4c está alimentada con gas por un conducto 1d' derivado de dicho primer conducto superior 1d (también denominado primer conducto de derivación superior 1d'), o un conducto paralelo a dicho primer
30 conducto superior, que asegura la unión entre el extremo superior 1₁ del primer recinto 1 y la segunda turbina 4c. Y, el gas expandido que sale de dicha segunda turbina 4c, cuando el dispositivo funciona en ciclo de liberación, es evacuado hacia el extremo superior 2₁ del segundo recinto 2 por medio de un conducto 2d' derivado del segundo conducto superior 2d (también denominado conducto de derivación superior 2d'), o por un conducto paralelo a dicho
35 segundo conducto superior, asegurando así la unión entre el extremo superior 2₁ del segundo recinto y la segunda turbina 4c.

Dicho segundo compresor 4b está alimentado con gas por un conducto derivado 2c' de dicho segundo conducto inferior 2c (también denominado segundo conducto inferior de derivación 2c') o un conducto paralelo a éste que
40 asegura así la unión entre el extremo inferior 2₂ del segundo recinto y el segundo compresor 4b. Y el gas es evacuado de dicho segundo compresor 4b en dirección del extremo inferior 1₂ de dicho primer recinto 1, por medio de un conducto 1c' derivado de dicho primer conducto inferior 1c (también denominado primer conducto inferior de derivación 1c'), o un conducto paralelo a dicho primer conducto inferior 1c, que asegura la unión entre el extremo inferior 1₂ y dicho segundo compresor 4b.

45 El segundo conducto inferior de derivación 2c' asegura la unión entre el segundo compresor 4b y la segunda canalización inferior 2c antes de que este último llegue a dicha primera turbina 3c. El primer conducto superior de derivación 1d' asegura la unión entre la segunda turbina 4c y el primer conducto superior 1d antes de que este último llegue a dicho primer compresor 3b. El segundo conducto superior de derivación 2d' asegura la unión entre la
50 segunda turbina 4c y el segundo conducto superior 2d entre dicho segundo calentador 5b y dicho primer compresor 3b. El primer conducto inferior de derivación 1c' asegura la unión entre el segundo compresor 4b y el primer conducto inferior 1c entre dicho intercambiador de calor 6 y dicha primera turbina 3c.

Los recintos 1 y 2 están llenados con un material refractario poroso 11, que permite que el gas circule a través de dichos recintos de un lado a otro entre sus extremos superior 1₁-2₁ e inferior 1₂-2₂. Los materiales refractarios
55 porosos utilizados en el primer y segundo recintos presentan una porosidad (porcentaje de vacío) del 20 al 60%, lo cual constituye un buen compromiso entre un intercambio térmico suficiente entre el gas y los materiales refractarios por un lado y, por otro lado, una pérdida de carga suficientemente baja, conservando al mismo tiempo una velocidad de circulación suficientemente elevada a través de dicho material poroso. En efecto, en funcionamiento, el dispositivo según la invención está totalmente llenado con gas neutro, preferentemente argón, a saber los circuitos
60 de canalización mencionados anteriormente, las turbinas y compresores, los calentadores, así como dicho primer y segundo recintos.

En la figura 3, se ha representado en sección y en vista lateral un recinto que comprende una envolvente externa metálica estanca 13, un sistema de aislamiento interno 12 dispuesto contra la pared de la envolvente externa metálica 13 y un apilamiento de bloques o ladrillos de materiales refractarios 11 que presentan unos canales
65 verticales 11₁ en forma de perforaciones, preferentemente de sección circular de diámetro de 5 a 20 mm, que los

atraviesan íntegramente y dispuestos de manera sustancialmente uniforme, plano por plano, sobre toda la sección horizontal de dicho primer recinto, como se detalla en las figuras 3A y 3B.

5 Los canales 11₁ de diferentes bloques 11 superpuestos están alineados unos con respecto a los otros con el fin de permitir la circulación del gas en la dirección longitudinal ZZ del recinto 1, 2 entre los dos extremos opuestos del recinto sin obstáculo entre los canales de diferentes bloques dispuestos de manera superpuesta en la misma dirección longitudinal ZZ. Una estructura de soporte ampliamente calada 14, situada en la parte baja de dicho recinto, permite repartir los gases que entran o que salen por los conductos inferiores calorifugados contiguos 1c, 2c, de manera sustancialmente uniforme sobre toda la sección de dicho recinto y dirigirlos así de manera óptima, por lo tanto con un mínimo de pérdidas de cargas, hacia los canales 11₁ que atraviesan verticalmente dichos bloques de materiales refractarios 11 en caso de alimentación por la parte baja. Asimismo, están previstos unos espacios vacíos 15 en la parte alta de los recintos, con el fin de permitir una buena distribución del gas cuando los recintos están alimentados con gas por la parte alta. En la figura 3, los gases llegan por la parte baja y salen por la parte alta de dicho recinto, lo cual corresponde a la fase de almacenamiento para el segundo recinto y a la fase de restitución para el primer recinto, como se detalla a continuación.

La figura 3A es una sección horizontal parcial en vista por debajo según el plano AA de la figura 3. Los bloques de materiales refractarios 11 son cuadrados y están perforados con múltiples orificios cilíndricos circulares paralelos según la dirección vertical ZZ perpendicular al plano de la figura. Los bloques están ventajosamente espaciados los unos de los otros, por ejemplo en $e=5$ mm, de manera que la dilatación de dichos bloques, durante los cambios de temperatura, se pueda realizar sin daños, en el grosor de dicho espacio intersticial, y que este último pueda también servir, llegado el caso, de canal vertical de paso del gas desde la parte baja del recinto hacia la parte alta de dicho recinto. Los bloques de materiales refractarios 11 están ventajosamente en contacto directo con la pared del recinto, a nivel del aislamiento 12 de dicho recinto, con el fin de limitar los pasos directos e incontrolados de los gases calientes o fríos en esta zona. En una primera versión de la invención, los bloques en los planos sucesivos de bloques de materiales refractarios están ventajosamente desplazados los unos de los otros en un semi-módulo o semi-bloque de forma escalonada, con el fin de asegurar una estabilidad de conjunto dentro de dicho recinto, como se representa en la figura 3. En una versión preferida de la invención, los bloques están apilados verticalmente los unos sobre los otros sobre toda la altura del recinto, para constituir unos puntales independientes unos de los otros y distantes 5 a 10 mm en cualquier dirección, lo cual permite las dilataciones durante ciclos de almacenamiento-restitución, evitando al mismo tiempo los riesgos de desgaste a nivel de los planos horizontales AA durante dichos ciclos de almacenamiento-restitución, cuando están montados de forma escalonada, como se detalla en la figura 3.

En la figura 3B se han representado unos bloques refractarios 11a de sección hexagonal, cerca de la pared aislante de un recinto de forma cilíndrica. La conexión con la pared aislante se realiza o bien por contacto directo de la arista de un bloque, o bien por una forma de bloque aislante 12a adaptado a la curvatura, o también por relleno con un material aislante 12a, por ejemplo del mismo tipo que el aislante 12 de dicho recinto, o también por una forma de bloque refractario 12b adaptado a la curvatura.

40 Están previstas unas válvulas de derivación V_1 a V_4 en las uniones entre:

- el primer conducto superior 1d y el primer conducto superior de derivación 1d': V_1 ,
- el segundo conducto superior 2d y el segundo conducto superior de derivación 2d': V_2 ,
- el primer conducto inferior 1c y el primer conducto inferior de derivación 1c': V_3 ,
- 45 - el segundo conducto inferior 2c y el segundo conducto inferior de derivación 2c': V_4 .

Como se detalla a continuación en relación con las figuras 1 y 2, se puede hacer funcionar únicamente dicho primer grupo compresor 3 (primer compresor 3b y primera turbina 3c) desconectando dicho segundo grupo generador de electricidad 4 durante un ciclo de almacenamiento de energía o, a la inversa, se puede desconectar dicho primer compresor 3 y abrir dichos conductos de derivación para hacer funcionar dicho segundo compresor 4 durante un ciclo de liberación de energía.

En efecto, el dispositivo según la invención puede funcionar según dos modos diferentes, a saber:

- 55 - un primer modo, con unos ciclos de almacenamiento o carga, y
- un segundo modo, con ciclos de restitución de energía o ciclos de liberación de energía.

El modo de carga o almacenamiento de energía funciona de la manera siguiente. Inicialmente, se carga el gas inerte, tal como el argón, en el dispositivo, es decir en los dos recintos, las turbinas y compresores, y las canalizaciones; está a temperatura ambiente, por ejemplo $T=20^\circ\text{C}$.

En la figura 1, se ha representado el dispositivo en fase de almacenamiento de energía o recarga de energía en el primer recinto 1.

65 Inicialmente, la instalación completa está a la temperatura ambiente T_0 de 10 a 20°C , estando el gas contenido en los recintos y canalizaciones por lo tanto a esta dicha temperatura ambiente T_0 y los dos recintos están a una misma

presión inicial unida a la presión de carga, por ejemplo de 1 a 1,2 bar (bar absolutos).

Se recalienta entonces la masa de materiales refractarios en el interior del segundo recinto 2 hasta una temperatura T2 de 600°C. Para ello, se hace circular en bucle cerrado el gas del segundo recinto entre sus extremos superior 2₁ e inferior 2₂ que se recalienta en el exterior del recinto con la ayuda del primer calentador 5a, que calienta el gas en el interior de la canalización de recalentamiento 5a₃ que asegura el bucle entre los extremos inferior 2₂ y superior 2₁ del segundo recinto en el exterior de éste. Se hace circular el gas en la canalización de calentamiento 5a₃ gracias a un ventilador 5a₅ y el primer calentador 5a comprende una primera resistencia 5a₁. Una válvula 5a₄ permite aislar el primer calentador 5a cuando está fuera de servicio al final del precalentamiento inicial, evitando así las transferencias y recirculación indeseables de gas en el ciclo normal.

Cuando toda la masa de materiales refractarios en el segundo recinto 2 se lleva a la temperatura T2 de 600°C, se cierra la válvula 5a₄ y se envía el gas por medio del segundo conducto superior 2d al primer compresor 3b, con el fin de recalentarlo a la temperatura T1 de 1200 a 1400°C, por ejemplo de 1300°C, a la salida de dicho primer compresor. Un gradiente de presión se establece entre los dos recintos, siendo el primer recinto llevado a la presión P1 de 2 a 4 bar (bar absolutos, 2·10⁵ a 4·10⁵ Pa) y la presión P2 en el segundo recinto siendo reducido a aproximadamente 1 bar (1·10⁵ Pa).

En el primer recinto, la parte superior 1a de material refractario tiende por lo tanto hacia la temperatura T1 de 1300°C mientras que la parte inferior 1b se establece a una temperatura T'1 de 20 a 100°C.

A la salida en el extremo inferior 1₂ del primer recinto, el gas debe ser expandido por la primera turbina 3c para ser restablecido a la presión P2 del segundo recinto antes de ser reintroducido en el segundo recinto, expandido y enfriado a una temperatura T3 en la parte baja del segundo recinto. En la medida en la que la energía almacenada por el sistema está relacionada con el gradiente de temperatura T1-T3, es interesante establecer una temperatura T3 lo más baja posible. Para ello, es interesante introducir y hacer volver a entrar en la primera turbina 3b un gas a una temperatura lo más baja posible. Es por eso que en la salida en el extremo inferior 1₂ del primer recinto, se enfría el gas de la temperatura T'1 a la temperatura T0 de 10 a 20°C con la ayuda de un intercambiador 6 antes de introducirlo en la primera turbina 3c.

A medida que tienen lugar los diferentes ciclos de circulación del gas durante el funcionamiento en modo de almacenamiento, la parte superior 1a de materiales refractarios del primer recinto caliente a la temperatura T1 de 1300°C ocupa un volumen cada vez más importante del recinto, es decir que el gas caliente introducido en el extremo superior 1₁ del primer recinto 1 cede sus calorías a dichos materiales refractarios y recaliente un volumen cada vez mayor de material refractario del primer recinto. Una parte frontal 1e que corresponde en realidad a una zona de transición de temperatura está esquematizada por una línea en las figuras 1 y 2. La parte superior 1a caliente a la temperatura T1 e inferior 1b fría a la temperatura T'1 de 20 a 100°C, se desplazan progresivamente hacia abajo como en los ciclos de circulación del gas durante su almacenamiento. A la inversa, la parte inferior 2b del segundo recinto a la temperatura T3 de por lo menos -80 a -20°C ocupa un volumen cada vez más importante del recinto 2. La parte frontal 2e que esquematiza una línea de separación que es en realidad una zona de transición entre la parte inferior 2b a la temperatura T3 y una parte superior 2a a la temperatura T2, se desplaza progresivamente hacia arriba como en los diferentes ciclos de circulación del gas.

El primer compresor 3b está accionado por un motor eléctrico 3a que consume una energía eléctrica E₁. La primera turbina 3c está acoplada al primer compresor 3b, a cuyo árbol está unida, de manera que la primera turbina 3c proporciona energía al primer compresor 3b como complemento a la energía proporcionada por el primer motor 3a.

Durante los ciclos sucesivos de circulación del gas en modo de almacenamiento de energía, la temperatura de la parte superior 2a del segundo recinto tiene tendencia a disminuir a una temperatura T'2 inferior a T2, es decir por debajo de 600°C, por ejemplo de 300 a 450°C.

Para paliar esta bajada de temperatura de la parte superior 2a del segundo recinto, se recalienta ventajosamente el gas que sale en el extremo superior 2₁ del segundo recinto con la ayuda de un segundo calentador 5b que comprende una segunda resistencia 5a₂ que permite calentar el gas que circula en el conducto superior 2d para mantenerlo a una temperatura T2 de 600°C antes de que llegue al primer compresor 3b. Asimismo, se ajusta el motor 3a con el fin de mantener la temperatura de salida del primer compresor 3b a la temperatura T1 constante del orden de 1300°C.

Durante toda la duración de los diferentes ciclos de almacenamiento de energía, se mide la temperatura del gas a la entrada del segundo calentador 5b y se ajusta en tiempo real la cantidad de energía eléctrica E₂ inyectada por segundo en el segundo calentador 5b para llevar el gas a la temperatura sustancialmente constante T2. La potencia inyectada en la instalación durante estos ciclos de almacenamiento corresponderá por lo tanto a la energía eléctrica E₁ que alimenta el primer motor eléctrico 3a, sumada a la energía eléctrica E₂ que alimenta el segundo calentador 5b.

Como se ha mencionado anteriormente, durante los ciclos de almacenamiento de energía, es necesario enfriar el

gas que sale en el extremo inferior 1₂ del primer recinto para disminuir su temperatura hasta la temperatura T₀ antes de descomprimirlo en la primera turbina 3c. Esto se realiza con la ayuda del intercambiador 6. El intercambiador de calor 6 está alimentado por un fluido de enfriamiento tal como agua o aire frío a 10-20°C para enfriar el gas que sale del primer recinto a la temperatura T₁ de 20 a 100°C y llevarlo a la temperatura T₀ de 10 a 20°C. El fluido de enfriamiento del intercambiador 6 sale del intercambiador 6 en 6d a una temperatura de 50 a 100°C según el caudal de aire o de agua de enfriamiento. El intercambiador térmico 6 libera por lo tanto una energía térmica E₃ en forma de agua calentada a 50-100°C. Esta energía térmica E₃ es una energía que no se puede almacenar en el sistema, pero que se puede recuperar bien dentro de una bomba de calor o también servir en procesos industriales, o también para el recalentamiento urbano. E₃ constituye por lo tanto, durante un ciclo completo de almacenamiento, una pérdida que afecta el rendimiento global del dispositivo.

Para estabilizar el sistema y optimizar su funcionamiento durante la sucesión de los diferentes pasos del funcionamiento en modo de almacenamiento al funcionamiento en modo de restitución de energía, es preferible interrumpir el almacenamiento antes de que el primer recinto sea totalmente llevado a la temperatura T₁, o que el segundo recinto sea totalmente llevado a la temperatura T₃.

En la práctica, se mantiene en el primer recinto una parte inferior 1b que representa del 10 al 20% del volumen total del recinto que permanece a la temperatura T₁ de 20 a 100°C. Paralelamente, se mantiene una parte superior 2a del segundo recinto a la temperatura T₂ o próxima de la temperatura T₂, es decir que se interrumpe el almacenamiento cuando la parte inferior 2b del segundo recinto a la temperatura de -80 a -20°C representa del 80 al 90% del volumen del segundo recinto.

Este volumen del 10 al 20% corresponde de hecho al volumen de la capa de transición térmica de altura como el descrito más adelante en referencia a las figuras 7.

En la figura 2, se ha representado el ciclo de restitución de energía almacenada dentro del primer recinto 1, en forma de energía eléctrica E_R.

Cuando la carga del primer recinto 1 ha terminado, se detiene el primer motor 3a, se accionan las diferentes válvulas V₁ a V₄, para alimentar el segundo grupo 4 con dicho primer conducto y segundo conducto superiores de derivación 1d', 2d', y el primer conducto y segundo conducto inferiores de derivación 1c', 2c', no siendo alimentados más con gas el primer compresor 3b y la primera turbina 3c.

Inicialmente, al final de la fase de carga, cuando el primer motor 3a está interrumpido, el gas está inmóvil y la presión se equilibra en los dos recintos 1 y 2, en un valor intermedio de 1,5 a 2,5 bar (1,5·10⁵ a 2,5·10⁵ Pa).

Durante una fase de puesta en marcha del modo de funcionamiento en el ciclo de restitución o de liberación de energía, se acciona un pequeño motor eléctrico 4d que acciona la segunda turbina 4c así como el segundo compresor 4b que está acoplado a ella, de manera que se establezca un gradiente de presión entre los dos recintos 1 y 2 respectivamente con una presión P'₁ superior a P₁ en el primer recinto 1 y una temperatura P'₂ inferior a P₂ en el segundo recinto 2.

En efecto, durante la puesta en marcha, el segundo compresor aspira el gas que procede del segundo recinto y lo envía al primer recinto, lo cual aumenta la presión en dicho primer recinto, alimentando así con gas la segunda turbina, para volver por último al segundo recinto y continuar su ciclo de circulación. En cuanto la turbina alcanza su velocidad apropiada, se deja de alimentar el pequeño motor eléctrico 4d.

Con el funcionamiento establecido, la segunda turbina 4c aspira el gas de la parte superior del primer recinto hacia el segundo recinto realizando un enfriamiento y una expansión del gas. Para optimizar el funcionamiento de la instalación, es deseable que el gas de salida de la segunda turbina 4d llegue sustancialmente a la misma temperatura T₂ que la temperatura del gas en parte superior del recinto 2 al final de ciclo de almacenamiento. Para ello, las pérdidas a nivel de la turbina y del compresor son tales que P'₁/P'₂ > P₁/P₂. En la práctica, P'₁ es de 3 a 5 bar y P'₂ de 1 a 1,5 bar.

Cuando el gradiente de presión P'₁/P'₂ está establecido, se apaga el motor 4d. El gas en la parte inferior 2b del segundo recinto está a la temperatura T₃ de -80 a -20°C que era su temperatura al final del ciclo de almacenamiento. Y el gas se transporta en dirección del segundo compresor 4b con el fin de ser re-comprimido a la presión P'₁. Está concomitantemente recalentado a la temperatura T₄, temperatura T₄ que, debido a las pérdidas del segundo compresor, es superior a la temperatura T₀. Típicamente T₄ es del orden de 100-150°C.

El gas a la temperatura T₄ superior a T₀ a la salida del segundo compresor 4b debe por lo tanto ser enfriado a la temperatura T'₁ con la ayuda del intercambiador térmico 6 antes de ser enviado al extremo inferior 1₂ del primer recinto 1, cuya parte inferior 1b se encuentra a la temperatura T'₁ de 20 a 120°C.

El enfriamiento del gas a la salida del segundo compresor 4b durante el ciclo de liberación tiene por efecto que una energía térmica E₄ se pierda por calentamiento del líquido de enfriamiento. Pero este enfriamiento del gas de la

temperatura T4 a T1 permite facilitar, durante los ciclos de almacenamiento de energía, el enfriamiento del gas a la salida del extremo inferior 1₁ del primer recinto de la temperatura T1 hasta la temperatura T0 aguas abajo del intercambiador térmico, con el fin de que el gas llegue a temperatura ambiente T0, entrando en la primera turbina 3c durante los ciclos de almacenamiento de energía. Globalmente, la pérdida de la energía térmica E4 durante los ciclos de liberación está compensada por una pérdida de energía térmica E3 a nivel del intercambiador 6 menos importante durante los ciclos de almacenamiento. Las energías térmicas E3 + E4 corresponden globalmente a las pérdidas de la instalación relacionadas con el gradiente T4-T0 y que se deben a las pérdidas a nivel de los compresores y turbinas.

La energía restituida por el sistema E_R corresponde a la energía liberada por la segunda turbina 4c que acciona un generador-alternador eléctrico 4a que permite restituir energía en forma de electricidad. Globalmente, E_R corresponde más precisamente a la energía liberada por la segunda turbina 4c menos la energía consumida por el segundo compresor 4b que está acoplado a ella. Por otra parte, el rendimiento global de la instalación entre los ciclos de almacenamiento y de liberación se escribe de la manera siguiente: $E_R = E_1 + E_2 - (E_3 + E_4) - E_5$. Representando E₅ las pérdidas a través del aislamiento de los recintos, de los conductos, de las turbinas y compresores y de diversos accesorios.

Las pérdidas E3+E4+E5 representan del 15 al 25% con respecto a las energías E₁+E₂ proporcionadas, siendo por lo tanto el rendimiento global de la instalación y del procedimiento de restitución de energía del 75 al 85%.

Para optimizar el rendimiento energético de la instalación, es ventajoso no calentar completamente el primer recinto a la temperatura T1 al final del ciclo de almacenaje, con el fin de conservar una capa de transición térmica en la parte inferior 1b a temperatura T0 o T1, y conservar una capa de transición térmica en la parte superior 2b del segundo recinto a la temperatura T2. Asimismo, durante ciclos de restitución de energía al final del ciclo, se detiene la liberación antes de que el primer recinto esté completamente enfriado y el segundo recinto esté completamente calentado, con el fin de conservar una capa de transición térmica en la parte superior 1a que corresponde a del 10 al 20% del volumen del recinto que permanece a la temperatura T1, y concomitantemente, una capa de transición térmica en la parte inferior 2b del segundo recinto que permanece a la temperatura T3, representando esta capa también del 10 al 20% del volumen del segundo recinto.

Esta capa de transición térmica en la parte superior 2b del segundo recinto a temperatura T2 facilita el restablecimiento del gradiente de presión entre los dos recintos P'1/P'2 al principio de ciclo de restitución de energía que corresponde a las mismas temperaturas T1/T2 respectivamente en el primer y en el segundo recinto.

El mantenimiento de una capa de transición térmica en un extremo del primer y del segundo recinto al final del ciclo de almacenaje y al final del ciclo de restitución es asimismo ventajoso en términos de rendimiento energético global de la instalación. En efecto, si se desea recalentar totalmente el primer recinto al final del ciclo de almacenaje, el gas que sale en el extremo inferior 1₁ del primer recinto durante el calentamiento del volumen que corresponde a la capa de transición térmica en el extremo inferior del primer recinto, saldría a una temperatura superior a la temperatura T1, lo cual implicaría una energía de enfriamiento E3 superior y por lo tanto unas pérdidas energéticas superiores.

Paralelamente, si al final del ciclo de restitución, se desea recalentar totalmente el extremo inferior 2₂ del segundo recinto, el gas que sale en el extremo inferior 2₂ del segundo recinto saldría a una temperatura superior a T3 y llegaría aguas abajo del intercambiador térmico 6 a una temperatura T4 aumentada, lo cual implicaría una energía térmica de enfriamiento E4 superior y por lo tanto unas pérdidas energéticas también superiores.

Además, el mantenimiento de una parte inferior 1b a la temperatura T1 al final del almacenaje y una parte superior 2a a la temperatura T2 en el segundo recinto al final del almacenaje facilita el inicio del ciclo de restitución, el cual necesita una utilización del motor 4d durante un tiempo más reducido para establecer un funcionamiento estable con los gradientes de temperatura T1 y T2 en el primer y segundo recintos, respectivamente, a las presiones P'1 y P'2 durante la restitución. Asimismo, el mantenimiento de una capa superior 1a caliente a la temperatura T1 en el primer recinto al final de la restitución y el mantenimiento de una capa inferior fría 2b a la temperatura T3 al final del ciclo de restitución facilita el inicio del ciclo de almacenaje ulterior, disminuyendo la energía eléctrica E2 necesaria para mantener el gas que entra en el primer compresor 3b a la temperatura T2.

Los dimensionamientos del primer compresor 3b/primer turbina 3c utilizados durante los ciclos de almacenaje, y del segundo compresor 4b/segunda turbina 4c durante los ciclos de liberación, son radicalmente diferentes, debido a las temperaturas diferentes a las que están sometidos. En efecto, el volumen de un gas que aumenta con su temperatura, el compresor y la turbina que funcionan con unos gases entrantes a temperatura elevada deberá ser de tamaño más importante. Por ello, durante la fase de almacenaje, el primer compresor 3b es un gran compresor, ya que funciona a temperatura T1 de 1300°C, mientras que la primera turbina 3c, que funciona a temperatura T3 de aproximadamente -50°C será una turbina pequeña. A la inversa, durante los ciclos de liberación, el segundo compresor 4c que funciona a temperatura T3 de -50°C será un compresor pequeño, mientras que la segunda turbina 4c que funciona a temperatura T1 de aproximadamente 1300°C será una turbina grande. Por lo tanto, se debe señalar que la utilización de una primera pequeña turbina 3c durante la fase de almacenaje facilita su arrastre por el primer gran compresor 3b. Asimismo, la utilización de un compresor 4b pequeño reduce las pérdidas energéticas y

la energía E_R corresponde a la energía liberada por la segunda turbina 4c menos la energía consumida por el segundo compresor 4b. Por lo tanto, existe un interés suplementario por poner una temperatura T3 lo más baja posible en la entrada del segundo compresor 4b para disminuir también el consumo de energía que afecta al rendimiento global energético del sistema.

5 La utilización de un enfriamiento al mismo tiempo durante los ciclos de almacenaje de energía y de liberación de energía aguas abajo del extremo inferior del primer recinto durante el almacenaje de energía y aguas arriba del extremo inferior del primer recinto durante la restitución de energía, con la ayuda de un mismo intercambiador térmico, permite disminuir el tamaño del intercambiador térmico en comparación con un modo de realización en el que no se enfriaría, por ejemplo durante los ciclos de restitución de energía, el gas en un intercambiador térmico
10 aguas abajo del extremo inferior del primer recinto.

15 A medida que tiene lugar el desarrollo sucesivo de los ciclos de circulación del gas durante la fase de restitución de energía, la parte frontal 1e que se separa de la parte inferior 1b fría a T1 y la parte superior 1a caliente a T1 del primer recinto se desplaza progresivamente hacia arriba, mientras que la parte frontal 2e que separa la parte superior caliente 2a a temperatura T2 de la parte inferior 2b fría a temperatura T3 del segundo recinto se desplaza progresivamente hacia abajo.

20 Se señalará que la puesta en marcha del intercambiador 6 sobre el circuito de retorno del gas entre el segundo compresor 4b y la parte inferior del primer recinto 1, por un lado y, por otro lado el funcionamiento de la segunda turbina 4c están ajustados para mantener dichas temperaturas T1 y T2 a unos valores constantes respectivamente, por ejemplo de 1300°C y 500°C, durante todo el ciclo de restitución de energía.

25 Se observa asimismo que, según una característica original esencial de la presente invención, las temperaturas T1 y T2 son constantes e idénticas en los ciclos de carga/almacenaje y descarga/restitución de energía.

30 En la figura 4, se ha representado un gráfico que corresponde a un ciclo termodinámico en el que las abscisas representan los volúmenes y las ordenadas representan las presiones absolutas (bar). Se han representado cuatro isoterms que corresponden respectivamente a:

- T0 (temperatura ambiente de 20°C),
- T1 (temperatura del primer recinto: 1300°C),
- T2 (temperatura caliente del segundo recinto: 600°C),
- T3 (temperatura fría del segundo recinto: -80°C/-20°C).

35 Entre los puntos A y B, se ha representado un ciclo de compresión-expansión adiabático de un gas perfecto según la ley: $PV^\gamma = \text{constante}$, entre las temperaturas T1 y T2. Para una máquina real, el comportamiento es diferente y, en el caso de una composición adiabática entre T2 y T1, la curva seguida es AB1, que muestra que la temperatura T1 se alcanzará para una presión Pb1 inferior a Pb y un volumen Vb1 superior a Vb. Asimismo, en una expansión adiabática, se alcanza la temperatura T2 para una presión Pa1 inferior a Pa y un volumen Va1 superior a Va.
40

45 Conviene señalar que para una gestión eficaz del calor en los 2 recintos, es importante que, a nivel de la parte alta de cada uno de estos recintos, el gas esté a unas temperaturas sustancialmente idénticas durante la fase de almacenaje y durante la fase de restitución. Para explicar este punto, se considera por ejemplo la parte alta del primer recinto. Durante la fase de almacenaje, el gas caliente penetra desde la parte alta en las existencias de refractarios. La temperatura de los sólidos no puede superar la del gas sino sólo acercarse lo mejor posible. Durante la fase de restitución, la temperatura del gas que sale de la parte alta del almacenaje de materiales refractarios del primer recinto puede como mucho ser igual a la de dichos materiales refractarios. Se pueden hacer indicaciones idénticas para el segundo recinto. Ahora bien, con el objetivo de obtener el mejor rendimiento posible, es importante
50 que a nivel del primer recinto, todo el calor del gas inyectado durante la fase de almacenaje sea explotado lo mejor posible durante la fase de restitución, y a nivel del segundo recinto, que todo el calor recuperado del gas durante la fase de almacenaje sea reutilizado lo mejor posible durante la fase de restitución. Dicho de otra manera, es interesante buscar unas temperaturas T1 y T2 que estén tan próximas como sea posible (idealmente idénticas) durante las fases de almacenaje y de restitución.

55 Se acaba de ver en la figura 4 que si se prevén las mismas temperaturas T1 y T2 durante la expansión o compresión con máquinas reales, las relaciones de las presiones son diferentes. Esto significa que las relaciones de las presiones de los conjuntos turbina-compresor utilizadas durante las fases de almacenaje y de restitución deben ser diferentes. Por ejemplo, en la figura 4, durante el almacenamiento, la presión alta es P_{b1} y la presión baja P_a ,
60 mientras que durante la fase de restitución la presión alta es P_b y la presión baja P_{a1} .

65 En las figuras 5 y 6, se han representado los ciclos termodinámicos que corresponden respectivamente a los ciclos de almacenaje y de restitución de la energía cuyas instalaciones y procedimientos se describen en relación con las figuras 1 y 2. Estos ciclos termodinámicos corresponden a un volumen unitario de gas, por ejemplo 1 m^3 , que efectúa un ciclo completo durante el cual adquiere energía en un recinto o un compresor, y después la restituye en una turbina, o en el otro recinto. Dicho volumen unitario efectúa este ciclo termodinámico en un tiempo muy corto

con respecto a la duración completa de un ciclo de almacenaje o de restitución, y efectúa así centenares o miles, incluso decenas de miles de ciclos termodinámicos, es decir vuelve a pasar tantas veces por el compresor, la turbina, los conductos y cada uno de los recintos.

5 La figura 5 ilustra la fase de almacenaje descrita en la figura 1. El gas procede de la parte alta del segundo recinto entre el primer compresor 3b a la temperatura T2 en el punto A. Está comprimido y vuelve a salir a la temperatura T1 en el punto B. Penetra en la masa de refractario 11 del primer recinto 1, atraviesa la masa de refractario cediendo sus calorías, lo cual genera una disminución progresiva de la parte frontal de temperatura hacia abajo. El gas vuelve a salir en la parte baja de dicho primer recinto en 6a a una temperatura del orden de $20/100^{\circ}\text{C}$, después pasa dentro del intercambiador 6 en el que cede al exterior la energía E3 para volver a salir de dicho intercambiador a una temperatura sustancialmente constante T0 que corresponde a la temperatura ambiente de 20°C , que corresponde al punto C del diagrama. Después, pasa a través de la turbina 3c y cede su energía al compresor 3b, y vuelve a salir de la turbina en la canalización 2c a la temperatura T3 (-50°C), que corresponde al punto D del diagrama. Por último, entra en la parte baja del segundo recinto, en el que recupera calorías dentro de la masa de refractarios que recorre desde abajo hacia arriba, lo cual genera una subida progresiva del frente de temperatura 2e hacia arriba. El gas sale por último del segundo recinto en la parte alta y está dirigido hacia el compresor 3b, en el que entra a la temperatura T2 con, llegado el caso, un paso por el calentador 5b, en el que recibe, llegado el caso, una cuota de energía E2 que prevé reajustar dicha temperatura del gas para alcanzar el valor T2. El gas ha vuelto entonces al punto A del diagrama y efectúa entonces un nuevo ciclo.

20 El ciclo termodinámico de restitución de la energía detallado en la figura 6 se desarrolla de la siguiente manera. El gas a alta temperatura T1 deja el primer recinto 1 por la parte de arriba, lo cual corresponde al punto B del diagrama. Después, el gas pasa por la turbina 4c, en la que restituye la energía al generador eléctrico (ER) y vuelve a encontrarse en el punto A del diagrama a la temperatura T2. Después, entra por la parte de arriba del segundo recinto y cede sus calorías a la masa de refractarios 11, lo cual genera una disminución progresiva del frente de temperatura 2e hacia abajo, y vuelve a salir por la parte de abajo de dicho recinto a una temperatura T3 que corresponde al punto D del diagrama. El gas pasa después por el segundo compresor 4b y vuelve a salir a una temperatura T4 superior a la temperatura T0 deseada: pasa entonces por el intercambiador de temperatura 6 en el que restituye en el exterior la cuota de energía E4, para encontrarse a la temperatura T0, por lo tanto en el punto C de dicho diagrama. Por último, penetra por la parte de abajo del primer recinto en el que recupera la energía y se calienta para alcanzar el punto B de dicho diagrama, lo cual genera una subida progresiva del frente de temperatura 1e hacia arriba, y por lo tanto un enfriamiento global de dicho primer recinto.

35 En la figura 7 se ha representado, a la izquierda en sección en vista lateral, el primer recinto y el frente ascendente 1e que separa la zona inferior a la temperatura de aproximadamente 20°C , y la parte superior a la temperatura de aproximadamente 1300°C . Este frente ascendente corresponde en realidad a una zona de transición de una altura h, como se detalla en el gráfico derecho de la misma figura 7. Durante la fase de almacenaje de la energía, la zona de transición se desplaza hacia abajo (figura 7B), y durante la fase de restitución se desplaza hacia arriba (figura 7A). Con el fin de permanecer en los intervalos de funcionamiento de las turbo-máquinas que corresponden a su mejor rendimiento, ventajosamente no se carga completamente, ni se descarga completamente el primer recinto, lo cual corresponde, como se detalla en la figura 7B, a limitar el ciclo de carga/descarga a la altura máxima δH_1 , que corresponde por ejemplo al 80-90% de la altura total, por lo tanto de la capacidad calorífica total de dicho primer recinto. Asimismo, esta zona de transición existe también en el segundo recinto pero corresponde a temperaturas diferentes, por ejemplo -50°C en la parte baja, y 500°C en la parte alta. El porcentaje de la masa calorífica utilizado corresponde entonces a una altura δH_2 , siendo dicho porcentaje utilizado preferentemente de manera sustancialmente idéntica a la de dicho primer recinto, es decir al 80-90%.

50 Gracias a esta configuración que incluye 2 recintos a temperaturas diferentes, cuyas masas de materiales refractarios se utilizan sólo al 80-90% de su capacidad calorífica, es posible obtener un rendimiento global muy bueno, del orden del 75 al 85%.

55 Esto se debe en primer lugar al hecho de que la energía es alternativamente bombeada y recuperada entre 2 niveles de temperatura T2 y T1 que son ambas ampliamente superiores a la temperatura ambiente. Se sabe, según el teorema de Carnot, que la eficacia de las máquinas térmicas se mejora cuando aumenta la temperatura de la fuente caliente.

60 Una segunda razón reside en la igualdad de las temperaturas T1 y T2 durante las 2 fases de almacenaje/restitución, obtenidas utilizando unos conjuntos turbina-compresor diferentes que trabajan con relaciones de presión diferentes (P_1/P_2 y P'_1/P'_2).

65 Una tercera razón de la buena eficacia global procede del hecho de que durante la fase de almacenaje las pérdidas del compresor caliente 3b son extraídas en forma de calor en el gas. Esta energía se almacena en el refractario del primer recinto 1 del mismo modo que el calor bombeado desde el segundo recinto. Esta pérdida de energía del compresor caliente se recupera en gran parte en forma de trabajo útil durante la fase de restitución.

La cuarta razón resulta de la utilización de regeneradores para intercambiar el calor con el gas. En efecto, es posible

5 disponer unos conjuntos de piezas refractarias capaces de funcionar a muy alta temperatura y que presentan una superficie muy grande de intercambio entre el gas y los sólidos. Esto permite acercarse lo mejor posible a la igualdad de las temperaturas T1 y T2 durante las 2 fases. La capacidad de almacenaje está relacionada con la masa de refractario. La disposición según la invención presenta la ventaja de que se aprovecha casi la totalidad de la masa de refractario para desempeñar un doble papel: almacenaje de calor e intercambio de calor con el gas.

10 La última razón del buen rendimiento global resulta del hecho de que el frío producido en la expansión de la turbina 3c durante la fase de almacenaje está asimismo almacenado en el recinto 2. Durante la fase de restitución esto permite enfriar el gas antes de la compresión por el compresor 4b, lo cual disminuye la energía absorbida por este compresor 4b, energía que viene en disminución de la energía restituida E_R .

La potencia de una turbomáquina se da mediante la fórmula:

$$W = m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1)$$

15 en la que m es el caudal másico de gas en kg/s, C_p la capacidad calorífica del gas en J/kg/K, T1 la temperatura del gas a la entrada y T2 a la salida. Para una turbina, $T_2 < T_1$ y W es entonces negativo (potencia extraída del gas). Para un compresor W es positivo (potencia proporcionada al gas).

20 La densidad del gas es proporcional a la masa molar del gas. Ahora bien, es más fácil comprimir o expandir un gas pesado que un gas ligero. Las máquinas necesarias son más pequeñas y más económicas con un gas pesado que con un gas ligero.

25 La masa molar es respectivamente de 40 para el argón, de 44 para el CO2, de 84 para el kriptón, de 131 para el xenón y de 222 para el radón.

Así, una turbomáquina que utiliza como gas el kriptón o el xenón será mucho más compacta que con un gas de tipo helio de masa molar 4, o de nitrógeno de masa molar 28. Además, en la fórmula termodinámica: $PV^\gamma = \text{constante}$,

30 $\gamma = 1,66$ para un gas mono-atómico,
 $\gamma = 1,4$ para un gas di-atómico, y
 $\gamma = 1,33$ para un gas tri-atómico.

35 La relación de las temperaturas T1, T2 depende de la relación de las presiones P1, P2 o P'1, P'2 según la fórmula:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

40 Se observa que para una relación de temperaturas dada, la relación de las presiones es más baja para un gas mono-atómico ($\gamma = 1,66$) que para un gas di-atómico ($\gamma = 1,4$) o tri-atómico ($\gamma = 1,33$). Esto presenta un interés práctico para la concepción de los recintos. En efecto, el grosor de las paredes de los recintos está relacionado con la presión máxima del gas. Además, este procedimiento que tiene la capacidad de almacenar cantidades muy grandes de energía utilizará unos recintos de grandes dimensiones. Por lo tanto, se tiene económicamente interés en buscar el nivel mínimo de presión interno del gas. Un medio simple de conseguir este resultado es limitar el porcentaje de compresión del gas, por lo tanto seleccionar preferentemente un gas mono-atómico.

45 Así, el mejor ciclo se obtendrá con un gas mono-atómico, tal como helio, neón, argón o los otros gases raros de masa molar más elevada.

50 Los gases di-atómicos tal como el nitrógeno, y tri-atómico tal como el aire o el CO2 son muy abundantes y baratos, pero a alta temperatura, son agresivos frente a los metales que constituyen la envolvente de los recintos, las canalizaciones o los álabes de las turbinas y compresores, por lo cual se utiliza ventajosamente como gas dentro del dispositivo un gas neutro totalmente inerte frente a los elementos metálicos del dispositivo, tal como el helio, el neón, el argón o los otros gases raros de masa molar más elevada. El helio, neón y argón está presentes en el aire ambiente en porcentajes significativos y están disponibles en gran cantidad a costes aceptables. Entre estos tres gases, el argón representa el gas con más rendimiento para su utilización en el dispositivo según la invención, ya que es mono-atómico, inerte a alta y muy alta temperatura frente a los elementos metálicos que componen el dispositivo según la invención y presenta una masa molar elevada así como un coste de adquisición bajo.

60 Dicho primer material refractario del primer recinto es por ejemplo chamota, también denominada arcilla de segunda cocción ("fire clay") capaz de resistir a 1200°C o también un producto de alto contenido en alúmina y/o magnesia. El segundo material refractario en el segundo recinto puede ser arcilla de primera cocción.

Como se ha mencionado anteriormente, los materiales refractarios 11 se presentan en forma de ladrillos perforados

ES 2 442 941 T3

por canales unos paralelos de 5 a 20 mm de diámetro y pasantes de lado a lado, y dispuestos para permitir la circulación y el paso del gas a través de los canales en la dirección longitudinal del recinto.

5 Los diversos tipos de materiales refractarios a muy alta temperatura disponibles en condiciones económicas aceptables están listados en la tabla siguiente,

Producto	Composición	T límite	Densidad Kg. m ⁻³	Capacidad calorífica (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Capacidad calorífica (kJ·m ⁻³ ·K ⁻¹)
Chamota	Arcilla cocida (35% Al ₂ O ₃)	1250 °C	2000	1000	2000
Magnesia	MgO	1800 °C	3000	1200	3600
Dolomía	CaO-MgO	1800 °C	2700	1100	2970
Mulita	70% Al ₂ O ₃	1700 °C	2600	1088	2830
Carbono	C	2200 °C	2200	1300	2860

La chamota sigue siendo el más económico de todos estos productos, pero su temperatura máxima es claramente inferior a la de los demás.

10 Además, la energía almacenada en un metro cúbico de refractario viene dada por la fórmula: $E = V \cdot C_p \cdot (T - T_0)$ en la que E se expresa en julios, V es el volumen de refractario calentado, C_p la capacidad calorífica en J/m³/K, T la temperatura de calentamiento y T₀ la temperatura inicial antes del calentamiento.

15 Se constata así que cuanto más elevada sea la temperatura de almacenamiento T, más importante es la energía almacenada por unidad de volumen de refractario.

Así, la magnesia de temperatura límite 1800°C presenta el mejor rendimiento en términos de capacidad calorífica en volumen, con un valor $C_p = 3600 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$.

20 A título de ejemplo, un dispositivo de 3000 MWh de capacidad, capaz de almacenar y restituir una potencia de 100 MW, que corresponde a una carga de 40 horas y una restitución de 30 horas está constituido:

25 - por un primer recinto cilíndrico de 41 m de diámetro y de 20 m de altura, en el que se han instalado 16500 m³ de magnesia, que presenta una porosidad del 25%, es decir 37000 t de materiales refractarios, y

30 - por un segundo recinto de 48 m de diámetro y de 20 m de altura en el que se han instalado 22500 m³ de chamota, que presenta una porosidad del 35%, es decir 29000 t de materiales refractarios, un grupo de almacenaje compuesto por un motor eléctrico 3a de 100 MW, un compresor 3b de 117 MW, una turbina 3c de 17 MW, un grupo de restitución compuesto por una generadora 4a de 100 MW, por una turbina 4c de 156 MW, por un compresor 4b de 56 MW. El volumen interno de la instalación completa, incluyendo los conductos de conexión, pero excluyendo el volumen que corresponde a la masa efectiva de refractario es de aproximadamente 35000 m³. Una parte del gas está confinada dentro de los materiales aislantes que aíslan las paredes de los recintos de los refractarios calientes (aproximadamente 12000 m³) y solo un volumen libre de 23000 m³ puede participar en la circulación del gas. La instalación está cargada con argón antes de la puesta en marcha de la presión de 1 bar, es decir 2 bar, lo cual corresponde a un volumen de 70000 Nm³ de los cuales 46000 Nm³ pueden circular. En fase de almacenaje, la presión es de 3 bar en el primer recinto P1 y de 0,9 bar en el segundo P2, mientras que durante la descarga, estas presiones son respectivamente de 3,3 (P'1) y de 0,6 (P'2) bar. La temperatura T1 se establece a 1256°C mientras que la temperatura T2 es de 600°C. En la fase de almacenaje, el caudal de gas en la turbina 3c o el compresor 3b es de 193 Nm³/s, es decir con un tiempo de ciclo termodinámico según la figura 5 de 238 segundos, lo cual corresponde a 600 ciclos de circulación del gas para la duración de una carga completa. Se obtienen unos valores similares para el ciclo de descarga.

45 Las turbinas y los compresores centrífugos o axiales son en general limitados en temperatura debido a la agresividad de los gases resultantes de la combustión, pero en el dispositivo según la invención, se utilizan dichas turbinas y dichos compresores en circuito cerrado con un gas neutro tal como el argón, lo cual permite para estas máquinas unos puntos de funcionamiento a temperaturas mucho más elevadas que en la técnica anterior.

50 La energía almacenada en el primer y segundo recinto no se pierde, salvo en caso de inactividad prolongada del dispositivo en carga-descarga, efectuándose las pérdidas entonces hacia el medio exterior, principalmente por medio del aislante 12 de dichos recintos.

55 Como el procedimiento es interesante esencialmente para el almacenaje de energía en gran cantidad, los recintos son relativamente voluminosos, lo cual quiere decir que la relación entre superficie y volumen es baja. Las pérdidas térmicas para los grandes recintos representan sólo una pequeña fracción de la energía almacenada. El aislamiento térmico se realiza con materiales que presentan una gran porosidad, como filtros de fibras cerámicas o espumas cerámicas. Los cálculos muestran que para el ejemplo citado anteriormente, un aislamiento de 2 m de grosor con

unos materiales fibrosos clásicos permite limitar la pérdida de energía a menos del 1% por día.

- 5 Como el gas es neutro, el gran compresor 3b y la gran turbina 4c que trabajan a temperatura elevada pueden ser realizados ventajosamente con materiales a base de carbono. Este cuerpo resiste en efecto mecánicamente a las temperaturas muy elevadas, hasta más de 2000°C. No se utiliza habitualmente para construir turbomáquinas, ya que se oxida rápidamente en los gases oxidantes, tal como el aire o los productos que resultan de la combustión. Esta limitación no interviene en este caso, lo cual permite considerar su uso. A título experimental, ya se han realizado unas turbinas de carbono, o también para motores de cohetes, cuyo tiempo de vida útil es sólo de algunos minutos.
- 10 En esta aplicación según la invención, dichas turbinas o compresores no tendrían limitación de tiempo de vida útil. En las máquinas actuales realizadas con materiales metálicos, es necesario enfriar los álabes mediante circulación interna de gas frío, lo cual viene en detrimento del rendimiento. A pesar de ello, los álabes móviles tienen un tiempo de vida útil limitado debido al fenómeno de deformación.
- 15 En la figura 1 se han descrito dos calentadores 5a-5b separados, pero se puede adelantar un mismo y único calentador, siempre y cuando se adapte el encaminamiento de los conductos.

REIVINDICACIONES

1. Instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica, caracterizada porque comprende:

- 5 - dos primer y segundo recintos (1, 2) que contienen un gas, y un primer y segundo materiales refractarios porosos (11) aptos para transferir unas calorías térmicas por contacto entre dichos materiales refractarios porosos y un gas que circula a través de dichos recintos, y
- 10 - un circuito cerrado de canalizaciones (1c, 1c', 2c, 2c', 1d, 1d', 2d, 2d') que permite la circulación de un gas que atraviesa sucesivamente cada uno de los dos recintos de un extremo al otro, y
- unos medios de compresión (3b, 4b) y unos medios de expansión (3c, 4c) del gas que circula en dichas canalizaciones entre cada uno de los extremos de un recinto unido a un extremo del otro recinto, y
- 15 - preferentemente, unos primeros medios de calentamiento de gas aptos para calentar el gas que circula en dicho segundo recinto (5a), y
- preferentemente también, unos medios de enfriamiento (6) de gas que circula entre uno de los extremos del primer recinto y de dichos medios de compresión (4b) y medios de expansión (3c), aptos para enfriar el gas que sale de dicho primer recinto en este extremo antes de ser expandido en dichos medios de expansión (3c) o respectivamente del gas que entra en dicho primer recinto después de haber sido comprimido por dichos medios de compresión (4b).
- 20

2. Instalación de almacenamiento y restitución de energía según la reivindicación 1, caracterizada porque comprende:

- A) un primer recinto calorifugado (1) llenado con un primer material refractario poroso apto para ser atravesado por un gas que circula a través de dicho primer recinto entre 2 extremos superior e inferior (1₁, 1₂) de dicho primer recinto, y
- 30 B) un segundo recinto calorifugado (2) llenado con un segundo material refractario poroso apto para ser atravesado por un gas que circula a través de dicho segundo recinto entre 2 extremos superior e inferior de dicho segundo recinto (2₁, 2₂), y
- 35 C) unas canalizaciones calorifugadas (1c, 1c', 2c, 2c', 1d, 1d', 2d, 2d') que permiten la circulación de gas en circuito cerrado entre los 2 recintos que comprenden unas primeras y segundas canalizaciones superiores (1d-1d', 2d-2d') entre los extremos superiores (1₁, 2₁) de los dos recintos y unas primeras y segundas canalizaciones inferiores (1c-1c', 2c-2c') entre los extremos inferiores (1₂, 2₂) de los dos recintos, y
- 40 D) preferentemente, unos primeros medios de calentamiento de gas (5a) aptos para calentar gas en el interior de dicho segundo recinto, y
- E) unos primeros medios de compresión de gas (3) que comprenden un primer motor eléctrico (3a) apto para ser alimentado por una energía eléctrica a almacenar (E₁) para accionar un primer compresor (3b) apto para comprimir un gas que procede de dicho extremo superior (2₁) del segundo recinto por dicha segunda canalización superior (2d) para enviarlo a dicho extremo superior (1₁) del primer recinto mediante dicha primera canalización superior (1d), y
- 45 F) unos primeros medios de expansión de gas (3c) que comprenden una primera turbina (3c), apta para descomprimir el gas que procede de dicho extremo inferior (1₂) del primer recinto por una primera canalización inferior (1c) para enviarlo a dicho extremo inferior (2₂) del segundo recinto por una segunda canalización inferior (2c), y
- 50 G) unos segundos medios de compresión de gas (4b) aptos para comprimir el gas que procede de dicho extremo inferior (2₂) del segundo recinto por otra segunda canalización inferior (2c, 2c') para enviarlo a dicho extremo inferior (1₂) del primer recinto por otra primera canalización inferior (1c, 1c'), y
- 55 H) unos segundos medios de expansión de gas que comprenden una segunda turbina (4c) apta para descomprimir el gas que procede de dicho extremo superior (1₁) del primer recinto por otra primera canalización superior (1d, 1d') para enviarlo a dicho extremo superior (2₁) del segundo recinto por otra segunda canalización superior (2d, 2d'), siendo dichos segundos medios de expansión aptos para accionar un generador eléctrico (4a) apto para restituir energía eléctrica (E_R), y
- 60 I) unos medios de enfriamiento de gas, preferentemente un intercambiador térmico (6) aptos para enfriar un gas que circula en dichas primeras canalizaciones inferiores (1c, 1c') entre, por un lado, el extremo inferior (1₂) de dicho primer recinto y, por otro lado, la salida y la entrada de dichos segundo compresor (4b) y
- 65

respectivamente primera turbina (3c).

- 5 3. Instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica según la reivindicación 2, caracterizada porque comprende unos segundos medios de calentamiento de gas (5b) aptos para calentar el gas que circula en dicha segunda canalización superior (2d) entre el extremo superior de dicho segundo recinto y dicho primer compresor (3b).
- 10 4. Instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica según la reivindicación 2 o 3, caracterizada porque dicha primera turbina (3c) es apta para ser accionada por dicho primer compresor (3b) al cual está acoplada mecánicamente.
- 15 5. Instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica según una de las reivindicaciones 2 a 4, caracterizada porque dicha segunda turbina (4c) está acoplada a un motor eléctrico auxiliar (4d) apto para accionarla.
- 20 6. Instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica según una de las reivindicaciones 2 a 5, caracterizada porque dicho segundo compresor (4b) es accionado por dicha segunda turbina (4c) a la cual está acoplado mecánicamente.
- 25 7. Instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica según una de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizada porque está llenada con un gas, preferentemente argón.
- 30 8. Instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica según una de las reivindicaciones 2 a 7, caracterizada porque dicho primer recinto y primer material refractario poroso son capaces de resistir a una temperatura T1 de por lo menos 750°C, preferentemente de por lo menos 750 a 2000°C, más preferentemente de 1000 a 1500°C, y dicha segunda turbina está dimensionada para descomprimir un gas a dicha temperatura T1 mientras que dicha primera turbina de menor capacidad que la segunda turbina está dimensionada para descomprimir un gas de la temperatura ambiente T0 a una temperatura T3 de -80 a -20°C.
- 35 9. Instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica según una de las reivindicaciones 2 a 8, caracterizada porque dicho segundo recinto y segundo material refractario poroso son capaces de resistir a una temperatura T2 de por lo menos 400°C, preferentemente de por lo menos 400°C a 1000°C, más preferentemente de 500 a 700°C, y dicho primer compresor está dimensionado para comprimir un gas a dicha temperatura T2 mientras que dicho segundo compresor de menor capacidad que el primer compresor está dimensionado para comprimir un gas de la temperatura T3 de -80 a -20°C, a temperatura ambiente.
- 40 10. Instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica según una de las reivindicaciones 2 a 9, caracterizada porque dicho primer compresor es apto para liberar un caudal en volumen más importante que dicha primera turbina, y dicha segunda turbina es apta para liberar un caudal en volumen más importante que dicho segundo compresor y dichos primer compresor y segunda turbina están realizados en carbono.
- 45 11. Instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica según una de las reivindicaciones 1 a 10, caracterizada porque dicho primer y segundo materiales refractarios porosos presentan una porosidad del 20 al 60%.
- 50 12. Instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica según la reivindicación 11, caracterizada porque dicho primer y segundo materiales refractarios porosos están constituidos por ladrillos porosos (11) ensamblados unos contra otros, preferentemente atravesados por perforaciones cilíndricas (11₁) dispuestos paralelamente en una misma dirección longitudinal que dicho recinto en el que están ensamblados, siendo dichas perforaciones también de 5 a 20 mm de diámetro.
- 55 13. Instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica según una de las reivindicaciones 1 a 12, caracterizada porque dicho primer y segundo materiales refractarios porosos están constituidos por arcilla cocida en contenidos elevados de compuestos seleccionados de entre magnesia, alúmina y cal.
- 60 14. Instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica según una de las reivindicaciones 1 a 13, caracterizada porque dicho primer material refractario poroso está constituido por arcilla de segunda cocción o chamota.
- 65 15. Instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica según una de las reivindicaciones 1 a 14, caracterizada porque dicho segundo material refractario poroso está constituido por arcilla de primera cocción.
16. Instalación de almacenamiento y restitución de energía eléctrica según una de las reivindicaciones 1 a 15, caracterizada porque dicho primer y segundo recintos tienen un volumen cada uno de por lo menos 5000 m³, preferentemente de 10000 a 45000 m³.

17. Procedimiento de almacenamiento de energía eléctrica (E1) en forma de energía térmica, en el que se utiliza una instalación según una de las reivindicaciones 1 a 16, caracterizado porque, después de una etapa inicial de precalentamiento del gas de dicho segundo recinto que se calienta a temperatura T_2 , estando dicha instalación llenada con un gas permanente, inicialmente a temperatura ambiente T_0 , se realizan las etapas sucesivas en las que:

- 1) el gas que sale del extremo superior (2_1) del segundo recinto (2) a una temperatura T_2 se calienta a una temperatura T_1 superior a una temperatura T_2 por compresión en dicho primer compresor (3b) antes de ser enviado al extremo superior (1_1) de dicho primer recinto, en el que se establece una presión P_1 superior a la presión P_2 del segundo recinto, siendo dicho primer compresor (3b) arrastrado por un primer motor eléctrico (3a) alimentado por la energía eléctrica a almacenar (E1), y
- 2) el gas atraviesa de lado a lado dicho primer recinto entre dicho extremo superior (1_1) y dicho extremo inferior (1_2) y vuelve a salir de dicho extremo inferior (1_2) del primer recinto a una temperatura ambiente T_0 o una temperatura T_1 superior a T_0 pero inferior a T_2 , y
- 3) el gas se enfría a continuación, llegado el caso, a una temperatura ambiente T_0 gracias a dichos medios de enfriamiento de gas (6) preferentemente del tipo intercambiador de calor, aguas abajo de la salida del extremo inferior (1_2) del primer recinto, y
- 4) el gas se expande a continuación a través de dicha primera turbina (3c), preferentemente arrastrada por dicho primer compresor (3b), a dicha presión P_2 del segundo recinto inferior a la presión P_1 , encontrándose así el gas enfriado a una temperatura T_3 inferior a T_0 antes de entrar en dicho segundo recinto por su extremo inferior (2_2), y
- 5) se hace circular el gas a través de dicho segundo recinto entre dichos extremos inferior (2_2) y superior (2_1) del segundo recinto, lo cual tiene por efecto aumentar el volumen de material refractario de la parte inferior (2b) de dicho segundo recinto enfriada a la temperatura T_3 , y disminuirlo en su parte superior (2a) a la temperatura T_2 o T_2' inferior a T_2 , pero superior a T_0 y T_1 , y si es necesario, llegado el caso, se recalienta a la temperatura T_2 el gas que sale del segundo recinto a la temperatura T_2' , con la ayuda de segundos medios de calentamiento de gas (5b), y
- 6) se reiteran las etapas 1) a 5) anteriores hasta que la parte superior (1a) del primer recinto recalientado a la temperatura T_1 ocupe por lo menos el 80% del volumen de dicho primer recinto, y que la parte inferior (2b) del segundo recinto enfriada a la temperatura T_3 ocupe por lo menos el 80% del volumen del segundo recinto.

18. Procedimiento según la reivindicación 17, caracterizado porque, en la etapa 6), se interrumpe el almacenaje de manera que la parte inferior (1b) del primer recinto a dicha temperatura T_1 represente por lo menos el 10% del volumen del primer recinto, preferentemente del 10 al 20% del volumen del primer recinto, y/o la parte superior (2a) del segundo recinto a la temperatura (T_2) represente menos del 20%, preferentemente del 10 al 20% del volumen de dicho segundo recinto.

19. Procedimiento según una de las reivindicaciones 17 o 18, caracterizado porque dichas temperaturas T_1 y T_2 son tales que $T_1/T_2=1,5$ a 3 y T_1/T_0 es superior a 2, preferentemente superior a 3 y más preferentemente superior a 6 y P_1/P_2 es de 2 a 4.

20. Procedimiento según una de las reivindicaciones 17 a 19, caracterizado porque T_1 es de 750°C a 2000°C, preferentemente de 1000 a 1500°C, y T_2 es de 400 a 1000°C, preferentemente de 500 a 700°C.

21. Procedimiento según la reivindicación 19 o 20, caracterizado porque la presión P_1 es de 2 a 4 bar absolutos ($2 \cdot 10^5$ a $4 \cdot 10^5$ Pa) y P_2 es de 0,5 a 1,5 bar absolutos ($0,5 \cdot 10^5$ a $1,5 \cdot 10^5$ Pa).

22. Procedimiento según una de las reivindicaciones 17 a 21, caracterizado porque T_0 es de 10°C a 50°C y T_3 es de -80°C a -20°C, siendo T_1 , llegado el caso, de 20° a 150°C.

23. Procedimiento según una de las reivindicaciones 17 a 21, caracterizado porque se almacena una cantidad de energía eléctrica de 20 MW-h a 10.000 MW-h.

24. Procedimiento de restitución de una energía eléctrica (E_R) a partir de una energía térmica almacenada mediante un procedimiento según una de las reivindicaciones 17 a 23, caracterizado porque, después de una fase inicial de puesta en marcha en la que se acciona dicho segundo compresor (4b) y dicha segunda turbina (4c) con dicho motor eléctrico auxiliar (4d), durante la cual se establece un gradiente de presión entre la presión P_1 del primer recinto y una presión P_2' inferior a P_1 del segundo recinto, tal que P_1 es superior a P_2' , siendo P_1 preferentemente superior a P_1 y siendo P_2' inferior a P_2 , se realizan las etapas sucesivas en las que:

ES 2 442 941 T3

- 1) el gas que sale por el extremo superior (1₁) de primer recinto (1) a dicha temperatura T₁ se expande y se enfría a la temperatura T₂ a través de la segunda turbina (4c), y dicha segunda turbina (4c) acciona dicho generador de electricidad (4a) que permite suministrar una energía eléctrica restituida (E_R), y
 - 5 2) el gas atraviesa dicho segundo recinto desde su extremo superior (2₁) hasta su extremo inferior (2₂), siendo una parte superior (2a) del segundo recinto recalentada a dicha temperatura T₂, permaneciendo una parte inferior (2b) del segundo recinto a dicha temperatura T₃, y
 - 10 3) el gas que sale del extremo inferior (2₂) de dicho segundo recinto con su extremo inferior (2₂) a la temperatura T₃ se comprime a continuación pasando por dicho segundo compresor (4b), preferentemente accionado por la energía liberada por la segunda turbina (4c), de manera que lo caliente a una temperatura T₄ superior a una temperatura ambiente T₀ y, llegado el caso, superior a T'₁, pero inferior a T₂ a la salida de dicho segundo compresor (4b), y
 - 15 4) preferentemente, el gas se enfría a continuación a la temperatura ambiente T₀ o T'₁ gracias a dichos medios de enfriamiento (6) antes de ser introducido en dicho primer recinto (1) por su extremo inferior (1₂) para incorporarse a la parte inferior (1b) de dicho primer recinto que se encuentra a dicha temperatura T'₁, y
 - 20 5) se hace circular el gas a través de dicho primer recinto, lo cual tiene por efecto aumentar el volumen del material refractario de la parte inferior (1b) a dicha temperatura T'₁ y disminuir el volumen de material refractario de la parte superior (1a) a dicha temperatura caliente T₁, y
 - 25 6) se reiteran las etapas 1) a 5) anteriores, hasta que la parte inferior (1b) del primer recinto a dicha temperatura (T₁) represente por lo menos el 80% del volumen del primer recinto y la parte superior (2a) de dicho segundo recinto a dicha temperatura (T₂) represente por lo menos el 80% en volumen de dicho segundo recinto.
25. Procedimiento según la reivindicación 24, caracterizado porque, en la etapa 6, se interrumpe el procedimiento de restitución de energía de manera que se mantenga una parte superior (1a) del primer recinto a dicha temperatura T₁, representando dicha parte superior (1a) menos del 20%, preferentemente del 10 al 20%, en volumen de dicho primer recinto, y/o una parte inferior (2b) del segundo recinto a dicha temperatura fría T₃ representa menos del 20%, preferentemente del 10 al 20% del volumen del segundo recinto.
- 30 26. Procedimiento según una de las reivindicaciones 24 o 25, caracterizado porque el rendimiento de restitución de energía eléctrica por dicho generador de electricidad (4a) E_R/E₁ es superior al 60%, preferentemente del 75 al 85%.
- 35 27. Procedimiento según una de las reivindicaciones 24 a 26, caracterizado porque P'₁/P'₂ es de 3 a 5.
28. Procedimiento según una de las reivindicaciones 24 a 27, caracterizado porque T₄ es de 150 a 400 °C.
- 40 29. Procedimiento según una de las reivindicaciones 24 a 28, caracterizado porque la presión P'₁ es de 3 a 5 bar absolutos (3·10⁵ a 5·10⁵ Pa) y P'₂ es de 1 a 1,5 bar absolutos (1·10⁵ a 1,5·10⁵ Pa).

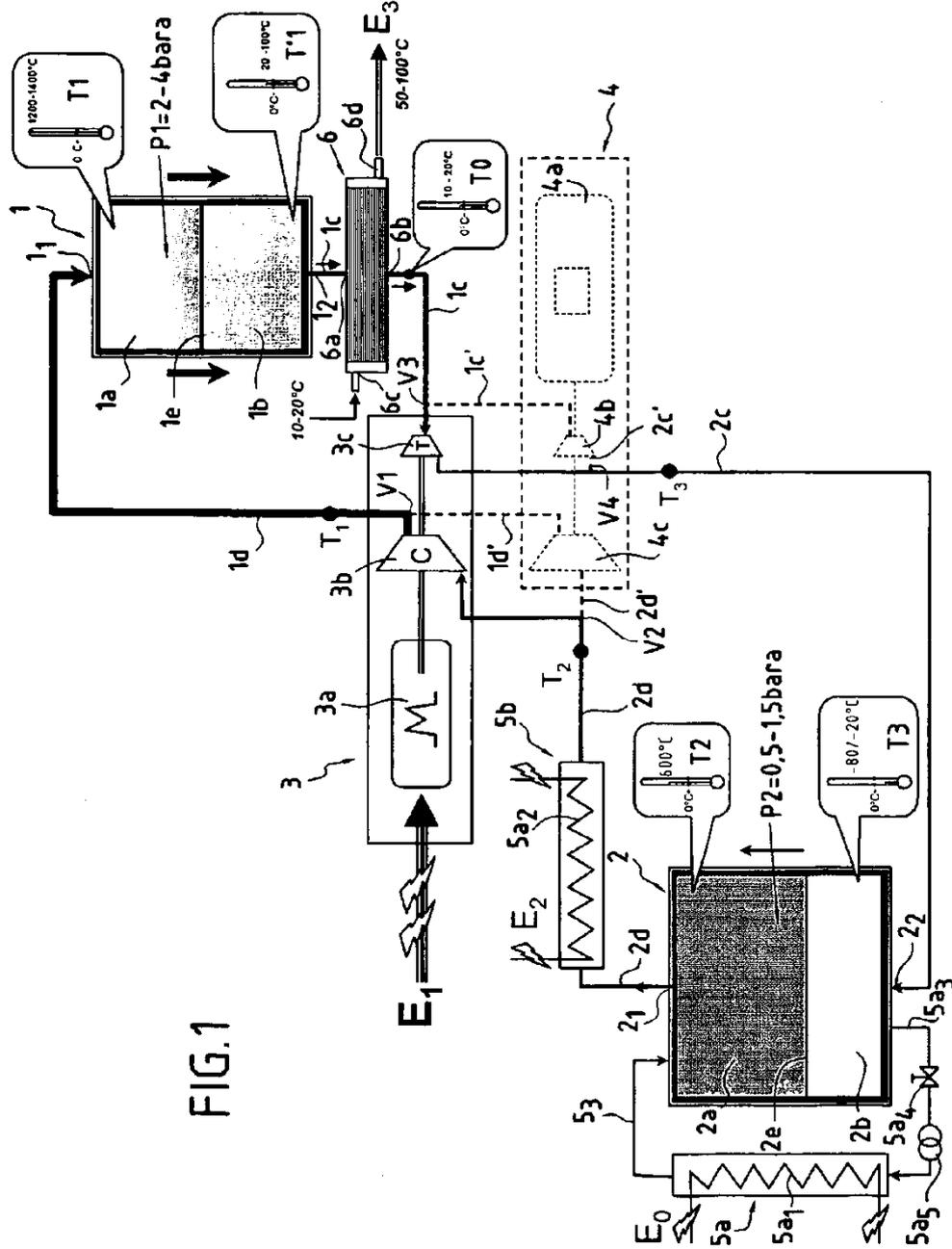


FIG. 1

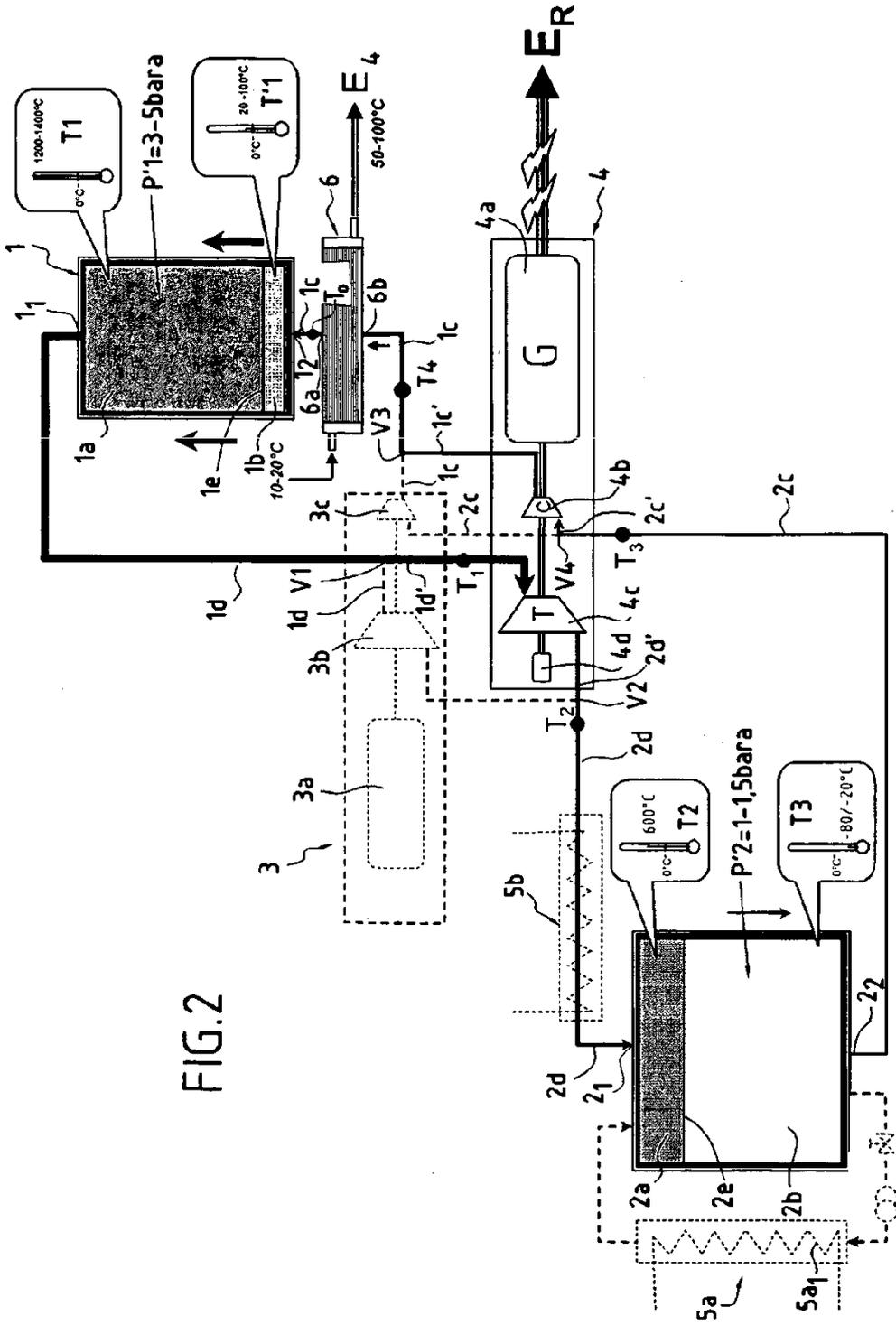


FIG.2

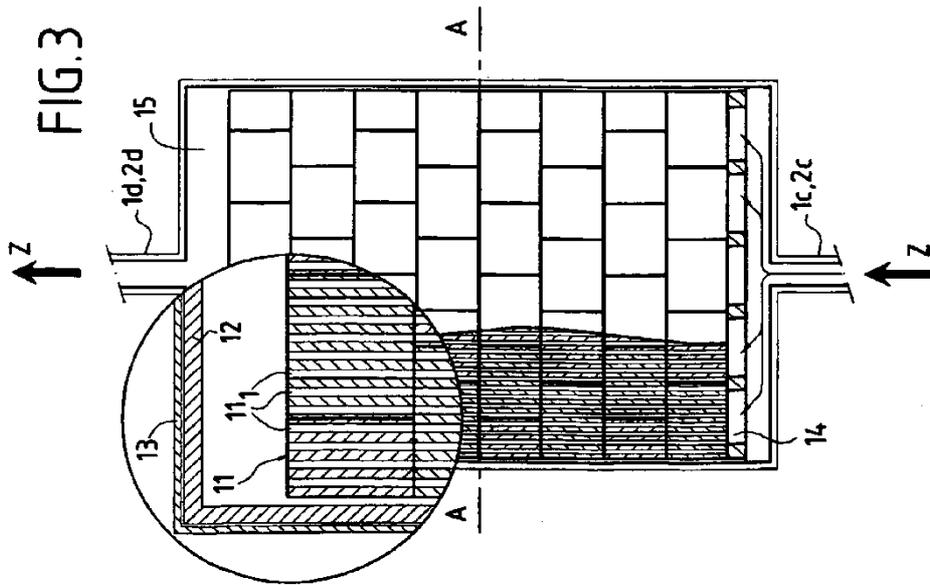
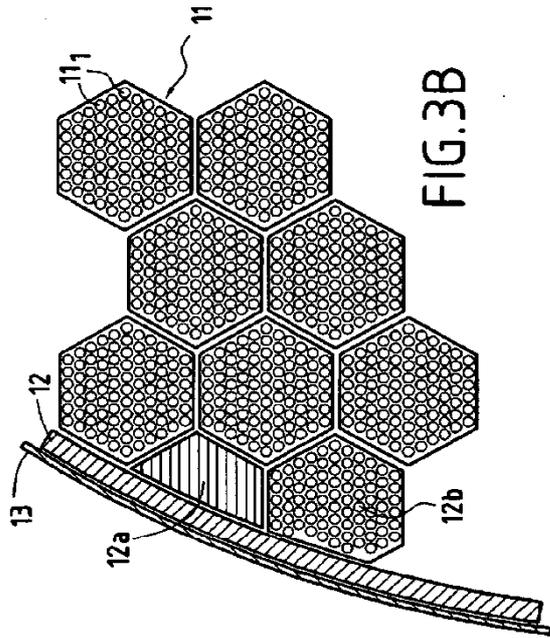
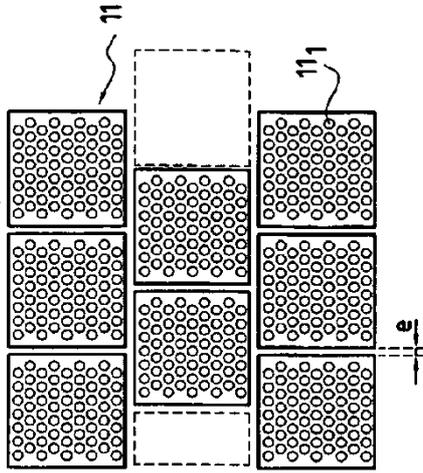


FIG.4

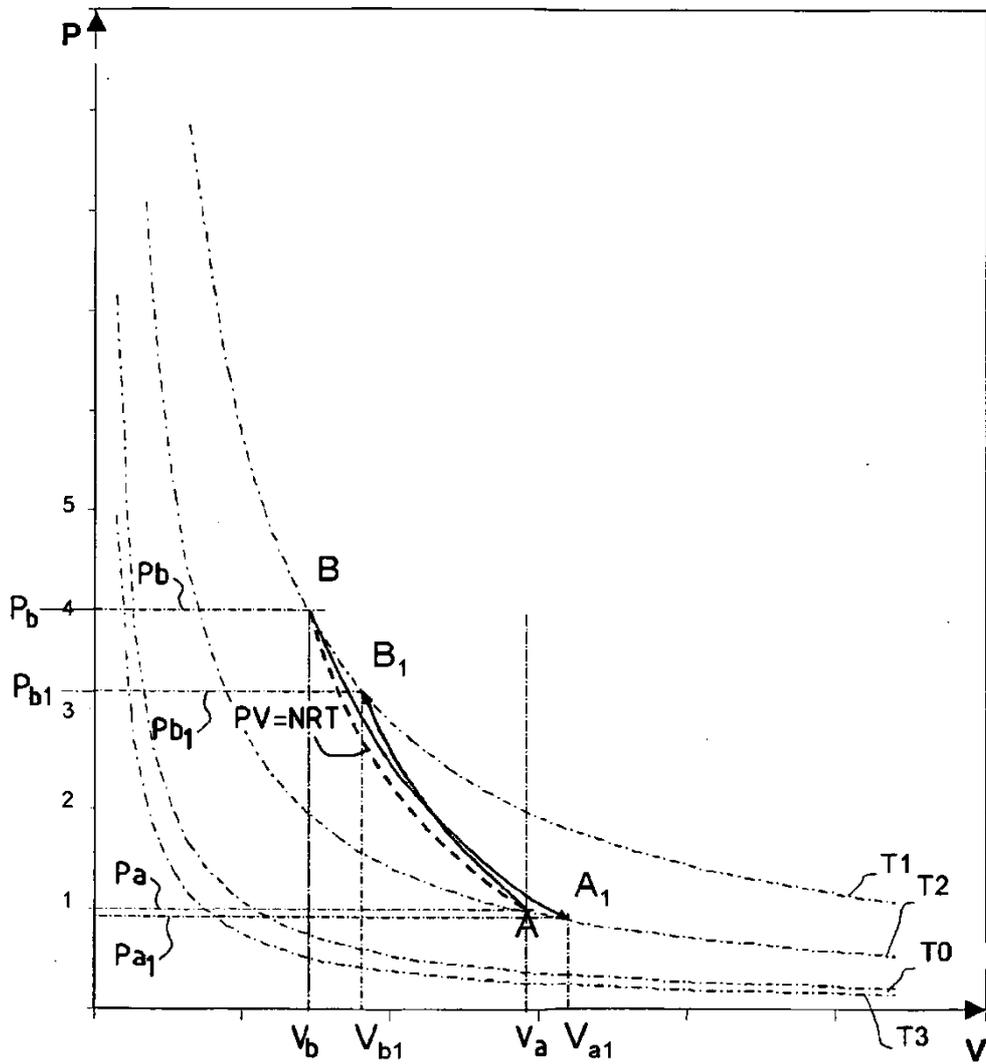


FIG.5

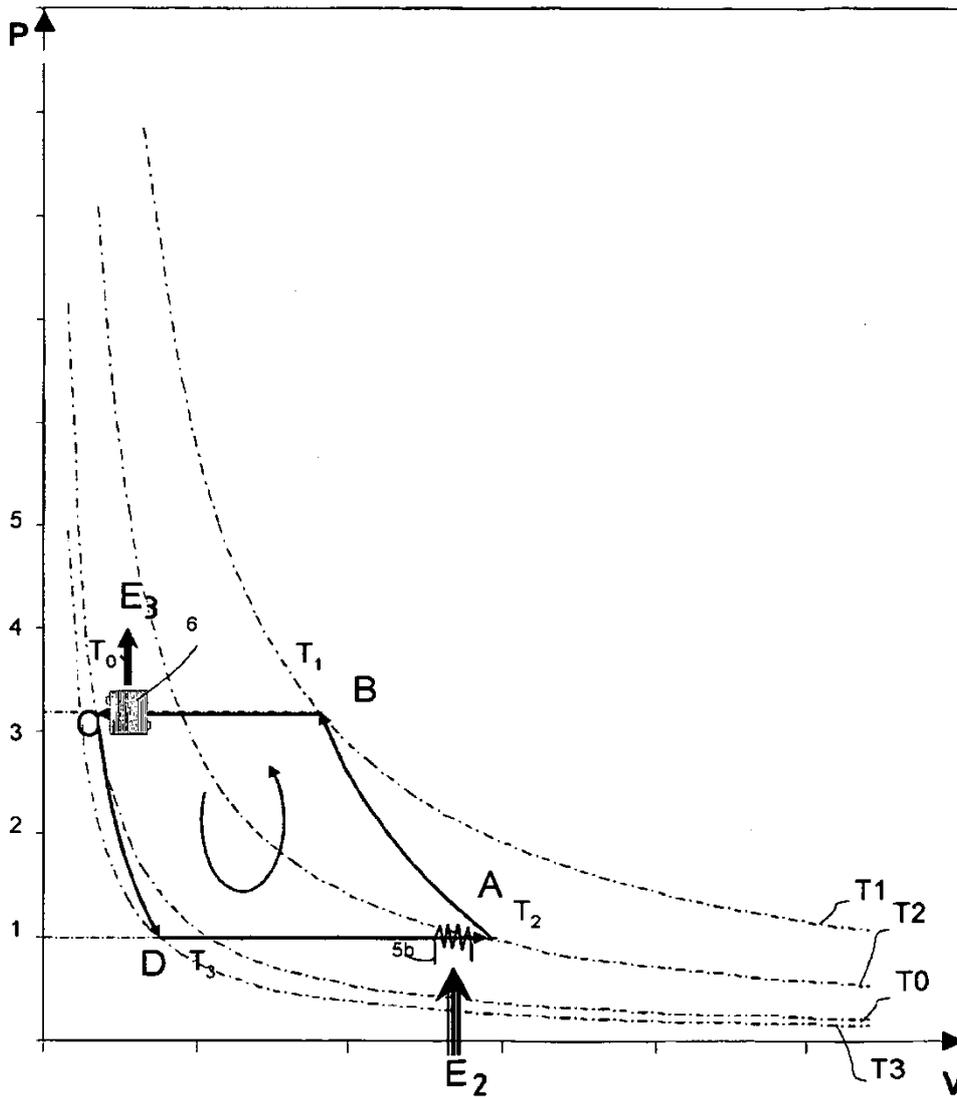
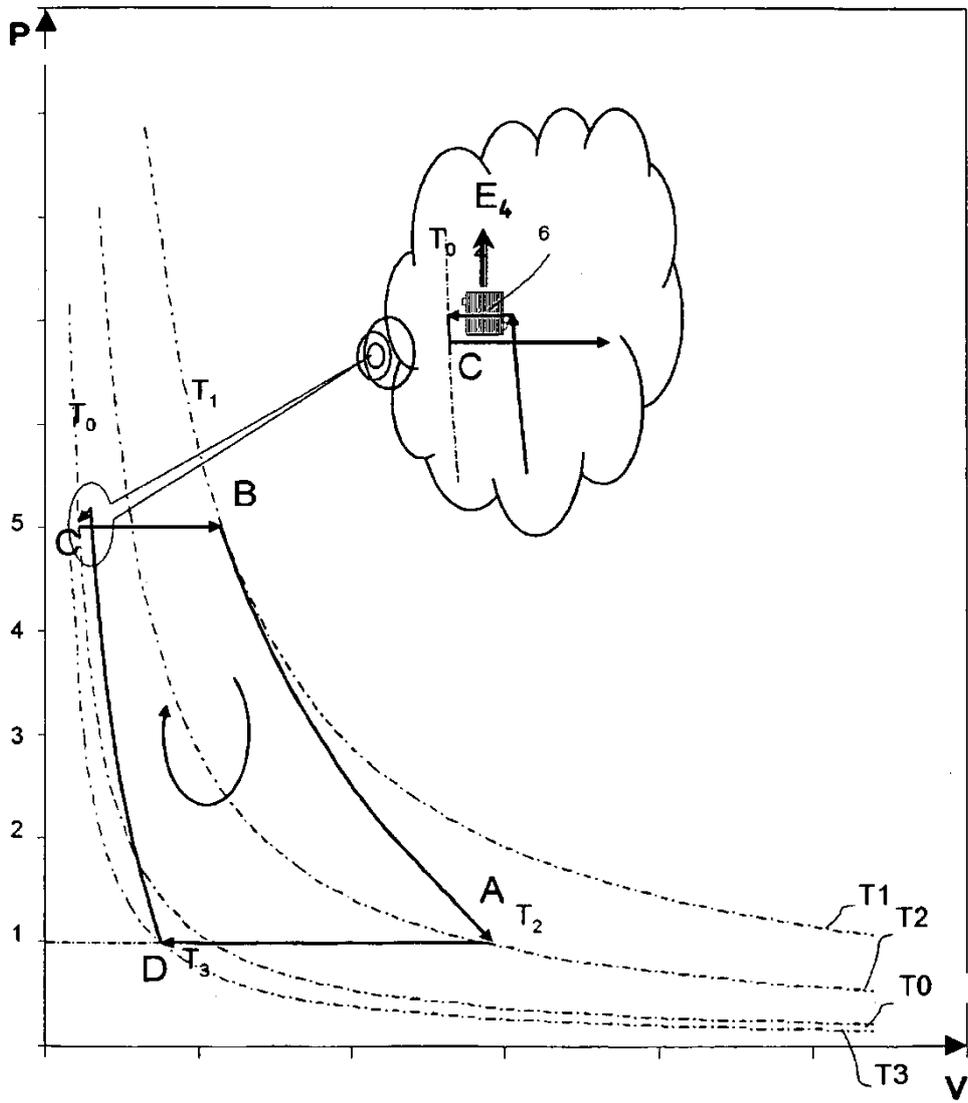


FIG.6



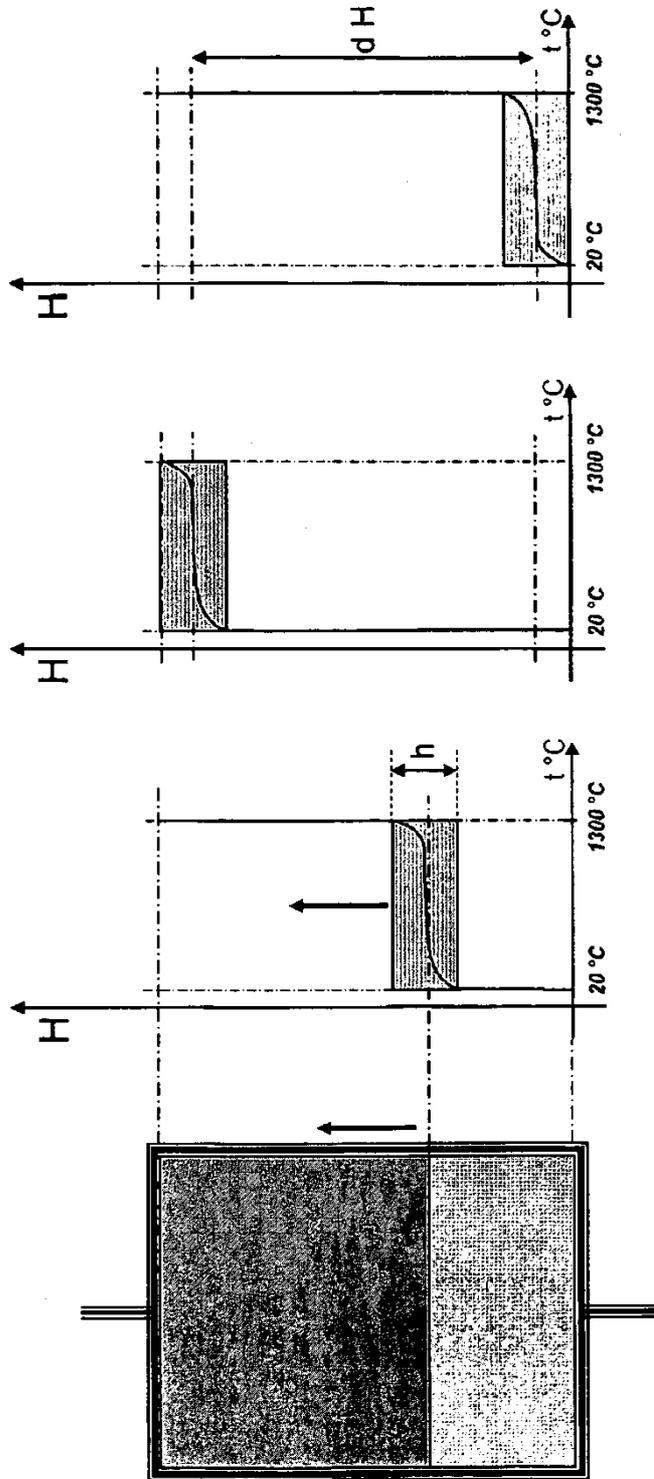


FIG.7A

FIG.7B

FIG.7