



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 314 599**

51 Int. Cl.:
F17C 9/04 (2006.01)
F17C 9/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **05292705 .0**
96 Fecha de presentación : **15.12.2005**
97 Número de publicación de la solicitud: **1672270**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **21.06.2006**

54 Título: **Sistema de compresión-evaporación para gas licuado.**

30 Prioridad: **17.12.2004 FR 04 13486**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
16.03.2009

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
16.03.2009

73 Titular/es: **SNECMA**
2, boulevard du Général Martial Valin
75015 Paris, FR

72 Inventor/es: **Valentian, Dominique;**
Feger, Damien;
Marchal, Noël;
Danguy, François y
Lagnel, Olivier

74 Agente: **Curell Suñol, Marcelino**

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

DESCRIPCIÓN

Sistema de compresión-evaporación para gas licuado.

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a un sistema de compresión-evaporación para gas licuado contenido en un depósito, que comprende unos medios de extracción y de bombeo para extraer e impulsar el gas licuado a baja presión fuera del depósito, unos medios de bombeo a alta presión, unos medios de evaporación por intercambio térmico con un fluido
10 líquido y unos medios de acondicionamiento y de transferencia hacia un gasoducto.

La invención se refiere al campo general de los procedimientos de regasificación de los gases licuados y en particular al caso del gas natural licuado (GNL).

15 En la práctica, una parte del gas natural extraído es licuado para permitir su conducción en esta forma a unos buques metaneros entre las zonas de producción y las zonas de consumo de este gas. Esta logística gasista comprende por tanto un terminal de licuación y de almacenado donde vienen a alimentarse los buques metaneros que conducen a continuación el gas licuado hacia un terminal de almacenado, de presurización y vaporización que alimenta la red de distribución terrestre por gasoducto de la zona de consumo. Este último terminal se denomina terminal metanero de
20 regasificación.

Estado de la técnica anterior

Para asegurar la puesta a presión y el calentamiento a la temperatura ambiente del GNL inicialmente en equilibrio
25 en las cubas de almacenado del terminal o en las del buque metanero, con su vapor a una presión ligeramente superior a la presión atmosférica, el estado de la técnica es, hasta el presente, como se ha ilustrado en la figura 10, utilizar en primer lugar una motobomba de baja presión 302 sumergida en el depósito de almacenaje 301 que alimenta una motobomba de alta presión 303 sumergida en una capacidad tampón 307. A la salida de la motobomba de alta presión 303, el líquido es enviado hacia un intercambiador-evaporador 304, o bien alimentado por agua a temperatura ambiente
30 y disponible en abundancia (agua de mar, de estuario, ...) cuando las condiciones climáticas lo permiten, o bien alimentado con agua calentada (que puede ser obtenida por una combustión específica o por recuperación de las pérdidas de una máquina térmica próxima), y que lleva el GNL a alta presión a la temperatura ambiente antes de inyectarlo en el gasoducto 400. Los motores 305a utilizados para accionar las motobombas de alta presión 303 son en general unos motores asíncronos de jaula de ardilla que giran a velocidad fija y limitada: como máximo 3.000 rpm para
35 corriente trifásica a 50 Hz y 3.600 rpm para una corriente a 60 Hz. Esta tecnología conduce a unas motobombas 303 con gran número de etapas y de grandes dimensiones. En particular dicha tecnología representará un handicap cierto para todas las aplicaciones a cierta distancia (off-shore). Por otra parte, las motobombas de alta presión 303 requieren una gran cantidad de energía eléctrica que representa la apuesta financiera más importante en el coste de explotación del terminal.

40 La figura 10 presenta un esquema de principio del procedimiento de regasificación en un terminal metanero según la técnica anterior. Las funciones de bombeo de alta presión, así como el calentamiento/vaporización están agrupados geográficamente en el terminal, y el número de líneas de transferencia 370, 371, 372 está limitado a una o dos. El esquema sólo representa un equipo por función y, además, los equipos de válvulas, regulación y control no figuran
45 tampoco para facilitar la comprensión. Solamente tres tipos de válvulas están representados en el esquema. Una válvula 3V1 está implantada en la impulsión de una bomba HP303 y una válvula 3V2 está implantada a la entrada del gasoducto 400 que desempeña la función de vertedor. Las válvulas 3V1 y 3V2 participan en el ajuste del caudal y de la presión de emisión hacia el gasoducto 400 en las líneas 371, 372. En la práctica, la válvula 3V2 está en serie con una válvula de paro o una válvula antirretorno. Por último, una válvula 3V3 permite recircular GNL a baja presión
50 hacia el depósito 301 o un circuito específico por una línea 373 para realizar el enfriado antes de poner en marcha las motobombas HP 303. El GNL es extraído del depósito 301 por una motobomba de baja presión 302 hacia la entrada de las motobombas de alta presión 303, atraviesa un intercambiador-evaporador 304 antes de ser inyectado en forma gaseosa a presión en la red del gasoducto 400. El agua es introducida en el intercambiador-evaporador 304 por un circuito de alimentación 374 y es evacuada por un circuito de evacuación 375.

55 La presencia de una fuente fría a muy baja temperatura que debe ser calentada en el proceso industrial representa una oportunidad interesante de valorización y existen numerosas utilizaciones o han sido propuestas en unas patentes o publicaciones anteriores. A título de ejemplo, se puede citar el acoplamiento del terminal con unas instalaciones frigoríficas o de licuación de gases industriales. Entre todas las utilizaciones posibles de las frigorías del GNL, se
60 limitarán aquí a unas soluciones de adaptación del procedimiento de compresión/calentamiento/evaporación con el fin de recuperar energía directamente utilizable por el terminal.

Cuando se considera el aspecto termodinámico del procedimiento, que consiste en primer lugar en aumentar la presión del GNL por las bombas y en segundo lugar en aumentar su temperatura y su entalpía por los intercambiadores-
65 evaporadores, se pueden identificar dos esquemas posibles para recuperar energía:

Una primera solución consiste, cuando tiene lugar el bombeo, en sobrepresurizar el gas natural líquido con respecto a lo necesario, y en realizar a continuación una expansión hasta la presión del gasoducto en una turbina encargada de

ES 2 314 599 T3

transformar esta energía fluida en energía mecánica. El balance en este caso es positivo puesto que la recuperación de entalpía en la turbina por la expansión gaseosa es superior al complemento a proporcionar para el bombeo.

Una segunda solución consiste en utilizar el gas natural líquido como la fuente fría de un ciclo termodinámico que utiliza una fuente caliente a la temperatura ambiente o a una temperatura superior.

Estos diferentes principios de recuperación de energía han constituido en el pasado el objeto de numerosas patentes o comunicaciones, como por ejemplo los documentos US nº 2.937.504, US nº 3.068.659, FR 2 133 683, CH 569 865, FR 2 300 216, FR 2 317 590, US nº 4.444.015, EP 0 470 532 así como el artículo XP-002 079414 (1981) de J.Ribes (Distrigaz-Belgica) titulado "Cycles de récupération des frigories contenues dans le gaz naturel liquéfié".

Estos documentos se aplican esencialmente a describir el principio de los ciclos de recuperación de energía y no dan en general ejemplo de lo que podría ser una aplicación concreta.

La patente US nº 5.678.411 describe una aplicación más precisa con una turbobomba utilizada en un dispositivo que utiliza la evaporación del gas natural en un intercambiador alimentado por agua de mar, aportando la turbina la potencia motriz a la bomba por la expansión parcial del gas vaporizado por el intercambiador. Sin embargo, la entalpía del gas es justo suficiente para permitir una presión de salida de 3 a 6 MPa. Esta presión resulta ser insuficiente para numerosos gasoductos, y en particular para red europea cuya presión de alimentación es próxima a 8 MPa, y puede alcanzar 10 MPa para ciertas aplicaciones. Esto proviene de las características del gas natural, compuesto esencialmente por metano cuyo punto crítico está situado en 4,596 MPa y 190,5 K. La diferencia de entalpía en una expansión adiabática comprendida entre 15 MPa, 273 K y 10 MPa (por tanto próxima al punto crítico) es inferior a la potencia de compresión del líquido entre 0,5 MPa y 15 MPa.

Para evitar este problema, la patente US nº 5.649.425 recurre al calentamiento del gas natural corriente arriba de la turbina más allá de la temperatura ambiente por un quemador aire-gas natural. Este calentamiento permite recuperar más entalpía en la turbina y por tanto compensar la energía de bombeo, pero en contrapartida el gas quemado representa una pérdida económica del mismo título que la potencia eléctrica utilizada en una motobomba de alta presión. Esta patente US nº 5.649.425 propone una segunda solución: la bomba es una bomba de dos etapas (o dos grupos de etapas) pasando el caudal total de GNL en la primera etapa de bomba y siendo una fracción del caudal principal entonces llevada a una presión superior, y después calentada y vaporizada en el intercambiador para accionar la turbina. El caudal de GNL que procede de la primera etapa es utilizado para unas funciones anexas, como de alimentación de una central térmica por ejemplo.

Esta solución sólo se puede utilizar en la medida en que el terminal metanero está acoplado a una central térmica o si puede suministrar gas natural a dos niveles de presión.

Las motobombas de alta presión presentan asimismo las desventajas siguientes:

a) son accionadas por un motor asíncrono de jaula no regulado que gira a relativamente baja velocidad (3.000 ó 3.600 rpm) y que necesita un número de etapas importante (típicamente 10 a 20) para realizar la sobrepresión requerida;

b) esta disposición de bomba con gran número de etapas centrífugas conduce a unas máquinas de grandes dimensiones (típicamente 6 metros de altura) onerosas, pesadas y voluminosas, y además poco tolerantes a un aumento de la presión en los gasoductos, si éste resulta necesario,

c) están limitadas en caudal por la limitación en potencia de estos mismos motores (1 a 2 mega watios) y deben ser multiplicadas para asegurar el caudal de emisión del terminal;

d) las mismas no son reguladas a nivel del motor y sólo pueden ser condicionadas en caudal por medio de válvulas de laminado implantadas en la impulsión, solución muy penalizante en términos de consumo eléctrico.

Se conocen asimismo a partir del documento GB 1 204 119A unos sistemas de turbomáquina que utilizan unos ciclos termodinámicos en los cuales por lo menos dos fluidos de trabajo utilizados en circuito cerrado producen energía eléctrica.

Objeto y sumario de la invención

La invención prevé evitar los inconvenientes citados y permitir reducir, incluso anular, el consumo eléctrico del terminal metanero de regasificación.

La invención prevé así aportar unas soluciones globales y económicamente rentables a los terminales metaneros de regasificación permitiéndoles reducir o anular su consumo eléctrico, incluso resultar productores de electricidad evitando al mismo tiempo los inconvenientes de los sistemas existentes citados. La invención está además bien adaptada a las configuraciones particulares en las que el terminal está acoplado a una central eléctrica que utiliza unas máquinas térmicas, en la cual las pérdidas térmicas de la central son recuperadas y transferidas a los intercambiadores-

ES 2 314 599 T3

evaporadores del terminal. La invención se puede aplicar asimismo a cualquier procedimiento industrial que utilice la compresión y el calentamiento a temperatura ambiente de un gas licuado.

Estos objetivos se alcanzan gracias a un sistema de compresión-evaporación para gas licuado contenido en un depósito, que comprende unos medios de extracción y de bombeo para extraer e impulsar el gas licuado a baja presión fuera del depósito, unos medios de bombeo a alta presión, unos medios de evaporación por intercambio térmico con un fluido líquido y unos medios de acondicionamiento y de transferencia hacia un gasoducto, caracterizado porque comprende por lo menos una turbomáquina constituida por una turbomotobomba que comprende un conjunto que gira con gran rigidez en flexión sobre una misma línea de árbol, con por lo menos una bomba de alta presión que comprende una etapa de aspiración axial y por lo menos una rueda centrífuga, una turbina y una máquina eléctrica central que puede ser utilizada en modo motor o generatriz y situada entre la bomba de alta presión y la turbina, estando esta turbomotobomba dispuesta de manera compacta en el interior de un cárter rígido que sólo presenta unas estanqueidades estáticas con el medio circundante, estando el conjunto giratorio de la turbomotobomba adaptado para presentar una alta velocidad de rotación superior a 12.000 rpm, permaneciendo al mismo tiempo fuera de las zonas de excitación de las velocidades críticas de rotación, estando todas las partes internas de la turbomotobomba bañadas por un mismo fluido criogénico que el gas licuado contenido en el depósito, estando la separación de cavidades internas de la turbomotobomba, que se encuentran en unas condiciones termodinámicas diferentes, asegurada por unas juntas de estanqueidad dinámicas sin contacto, y unos circuitos electrónicos de potencia conectados a una red eléctrica que asegura el mando de la máquina eléctrica central en modo motor o generatriz.

Ventajosamente, la velocidad de rotación del conjunto giratorio de la turbomotobomba es de varias decenas de millares de revoluciones por minuto y preferentemente comprendida entre 20.000 y 40.000 rpm.

Son posible diversos modos de realización y en particular, de acuerdo con la invención, una turbomotobomba puede ser implantada o bien en directo sobre la línea de emisión del terminal, o bien en derivación entre la salida de una motobomba de alta presión y un intercambiador de regasificación.

Según un modo particular ventajoso, el sistema comprende un primer intercambiador-evaporador intercalado entre la bomba de alta presión y la turbina para asegurar la compresión/evaporación del gas licuado utilizado como fluido de trabajo en la turbomotobomba.

Los medios de evaporación pueden comprender dicho primer intercambiador-evaporador intercalado entre la bomba de alta presión y la turbina y un segundo intercambiador-evaporador dispuesto entre la turbina y el gasoducto a alimentar.

Según un modo particular de realización, los medios de bombeo a alta presión comprenden exclusivamente la bomba de alta presión de la turbomotobomba que está montada en serie entre el depósito y el gasoducto.

El sistema puede comprender una capacidad tampón dispuesta a la entrada de la bomba de alta presión de la turbomotobomba.

Según un modo particular de realización, el sistema comprende además un condensador con un primer circuito interpuesto entre la salida de la bomba de alta presión de la turbomotobomba y el primer intercambiador-evaporador y un segundo circuito interpuesto entre la salida de la turbina de la turbomotobomba y la capacidad tampón, estando el segundo circuito en intercambio de calor con el primer circuito para relicuar el fluido gaseoso que sale de dicha turbina.

Según otro modo particular de realización, los medios de bombeo a alta presión comprenden una motobomba cuya entrada está conectada a dichos medios de extracción y de bombeo, y cuya salida está conectada a un primer circuito de un condensador, estando la salida de este primer circuito conectada con la entrada de un intercambiador-evaporador cuya salida está conectada a dicho gasoducto, estando dicha capacidad tampón montada en derivación a la salida de dicha motobomba y estando la salida de la turbina de la turbomotobomba conectada con la entrada de un circuito del condensador, estando la salida de este segundo circuito conectada a dicha capacidad tampón, y estando el segundo circuito en intercambio de calor con el primer circuito para licuar de nuevo el fluido gaseoso que sale de dicha turbina.

Ventajosamente, los medios de evaporación por intercambio térmico con un fluido líquido comprenden unos medios de introducción y de evacuación de un fluido líquido constituido por agua cuya temperatura es por lo menos igual a la temperatura ambiente.

Asimismo, el primer intercambiador-evaporador intercalado entre la bomba de alta presión y la turbina comprende unos medios de introducción y de evacuación de un fluido líquido constituido por agua cuya temperatura es por lo menos igual a la temperatura ambiente.

Según un modo de realización posible, la turbomotobomba comprende unos cojinetes fluidos hidrostáticos alimentados a partir del mismo fluido en estado líquido y comprimido que el fluido disponible a la salida de la bomba de alta presión de la turbomotobomba.

ES 2 314 599 T3

La turbomotobomba puede comprender asimismo un dispositivo hidráulico de equilibrado activo de los esfuerzos axiales alimentado a partir del mismo fluido en estado líquido y comprimido que el fluido disponible a la salida de la bomba de alta presión de la turbomotobomba.

5 Según una variante de realización, la turbomotobomba comprende un tope fluido axial alimentado a partir del mismo fluido en estado líquido y comprimido que el fluido disponible a la salida de la bomba de alta presión de la turbomotobomba.

10 Según otro modo de realización posible, la turbomotobomba comprende unos cojinetes magnéticos activos y puede comprender asimismo un tope axial magnético.

Según también otro modo de realización posible, la turbomotobomba comprende unos rodamientos de alta velocidad con bolas cerámicas.

15 Ventajosamente, la turbina de la mototurbobomba comprende un rotor de aleación de titanio de alta resistencia de tipo TA6 V ELI o TA5 E ELI o de aleación ligera del tipo aluminio-litio.

20 Asimismo, la bomba de alta presión de la turbomotobomba comprende uno o varios rodets de aleación de titanio de alta resistencia del tipo TA6 V ELI ó TA5 E ELI o de aleación ligera del tipo aluminio-litio.

Según un modo particular de realización, la máquina eléctrica central de la turbomotobomba comprende un rotor de imanes permanentes, asegurando los circuitos electrónicos de potencia la alimentación a frecuencia síncrona de la velocidad de rotación y tensión variable en modo motor y convirtiendo la tensión variable creada en tensión fija rectificada en modo generador.

25 Según otro modo particular de realización, la máquina eléctrica central de la turbomotobomba comprende un rotor monobloque con bobina de excitación alimentada por un transformador giratorio y un puente de diodos de rectificado para regular la excitación de la máquina eléctrica y proporcionar una tensión constante en modo generador y un par controlado en modo motor.

30 Según también otro modo particular de realización, la máquina eléctrica central de la turbomotobomba comprende un rotor de jaula de ardilla, asegurando los circuitos electrónicos de potencia la alimentación a frecuencia y tensión variable en modo motor y convirtiendo la tensión variable creada en tensión fija rectificada en modo generador.

35 Breve descripción de los dibujos

Otras características y ventajas de la invención se pondrán más claramente de manifiesto a partir de la descripción siguiente de modos particulares de realización de la invención, dados a título de ejemplo, haciendo referencia a los planos adjuntos, en los que:

40 - las figuras 1 a 4 son unas vistas esquemáticas de conjunto de un sistema de compresión-evaporación para gas licuado respectivamente según unos primer, segundo, tercer y cuarto modos de realización de la invención;

45 - la figura 5 es una vista esquemática en sección axial de un ejemplo de turbomotobomba que puede ser utilizada en el marco de un sistema de compresión-evaporación de un gas licuado, de acuerdo con la invención,

- la figura 6 es una vista esquemática en sección axial de un ejemplo de máquina eléctrica central que puede ser utilizada con una turbomotobomba de acuerdo con la invención,

50 - la figura 7 representa una vista esquemática de la circulación de fluidos en una turbomotobomba utilizada en el marco del modo de realización de la figura 1,

- la figura 8 representa una vista esquemática de la circulación de fluidos en una turbomotobomba utilizada en el marco de los modos de realización de las figuras 2, 3 y 4,

55 - la figura 9 es un esquema-bloque que muestra los principales módulos que constituyen los circuitos electrónicos de potencia de mando de la máquina eléctrica central de una turbomotobomba utilizada en el marco de la presente invención,

60 - la figura 10 es una vista esquemática de un ejemplo de sistema de compresión-evaporación para gas licuado según la técnica anterior.

Descripción detallada de los modos particulares de realización

65 La invención, que se aplica en particular a un terminal metanero de regasificación, prevé reducir, incluso anular, el consumo eléctrico de dicho terminal y utiliza una turbomáquina específica denominada turbomotobomba (MTP) que puede aplicarse a diferentes ciclos de recuperación de energía.

ES 2 314 599 T3

La invención se refiere a un sistema de compresión-evaporación para gas licuado, que comprende además unos medios convencionales utilizados para asegurar la compresión/calentamiento/evaporación del gas licuado, a saber unos medios de extracción y de bombeo centrífugo para impulsar el gas líquido a baja presión fuera del depósito, unos medios de bombeo de alta presión y de evaporación por intercambio térmico con agua a temperatura ambiente o calentada y unos medios de acondicionado y de transferencia hacia un gasoducto.

El sistema de compresión-evaporación según la invención comprende unos medios complementarios que comprenden por lo menos una turbomáquina específica, asociada a uno o varios intercambiadores térmicos y a unos equipos fluidos y de control destinados a asegurar la recuperación de energía en forma térmica o eléctrica. La turbomáquina adicional puede estar implantada o bien en directo sobre la línea de emisión del terminal salida del depósito de gas licuado y que conduce al gasoducto, o bien en derivación entre la salida de una motobomba de alta presión y un intercambiador de regasificación.

La turbomáquina adicional o turbomotobomba integra sobre una misma línea de árboles una bomba 26, una máquina eléctrica 11 que puede ser utilizada en modo motor o en modo generatriz y que puede ser calificada indiferentemente de alternador, y una turbina 29, estando la máquina eléctrica 11 dispuesta de forma central entre la bomba 26 y la turbina 29 (fig. 5).

La mototurbobomba está ideada para poder girar a una velocidad muy superior a la velocidad de las motobombas de alta presión convencionales. La velocidad de rotación de una turbomotobomba es así superior a 12.000 rpm y puede ventajosamente alcanzar algunas decenas de millares de revoluciones por minuto, típicamente entre 20.000 y 40.000 rpm, debiendo esta velocidad simplemente encontrarse fuera de las zonas de excitación de las velocidades críticas de la turbomotobomba.

La turbomotobomba con su máquina eléctrica central 11 comprende un conjunto que gira con gran rigidez en flexión sobre una misma línea de árbol y está dispuesta de manera compacta en el interior de un cárter rígido 25 que sólo presenta unas estanqueidades estáticas con el medio circundante (fig 5).

Todas las partes internas de la turbomotobomba están bañadas por un fluido criogénico común, en forma líquida o gaseosa, que es extraído del depósito de gas licuado a evaporar o es de una misma naturaleza.

La parte de bomba 26 comprende una etapa de aspiración axial 41 acoplada a una primera rueda centrífuga 42. Una o varias ruedas centrífugas pueden en caso necesario ser añadidas a la primera rueda centrífuga 42. Un difusor con álaves 43a y una voluta 43b o un difusor con álaves y un canal de retorno aseguran la recuperación de energía cinética del fluido a la salida de cada rueda centrífuga. La alimentación de las ruedas centrífugas sucesivas está así asegurada por los canales de retorno. La bomba 26 asegura la compresión del gas líquido introducido en la etapa de aspiración axial.

La turbina 29 comprende una tubería 46 de llegada de gas a presión, un distribuidor con álaves 47 que asegura la puesta en velocidad del gas y un rotor 48 que asegura la transformación de la energía cinética de los gases en energía mecánica.

La turbina 29 puede ser por ejemplo del tipo axial con admisión total, según una aplicación monoetapa o bietapa, supersónica, transónica o subsónica.

La turbina 29 puede también del tipo centrípeto con una etapa.

La máquina eléctrica central 11, que puede también ser denominada alternador, puede funcionar en modo motor para aportar el complemento de energía necesaria para el buen funcionamiento de la bomba 26. La máquina eléctrica 11 puede funcionar asimismo en modo generatriz para restituir en forma de electricidad la energía excedente en el balance turbina-bomba. La máquina eléctrica 11 está conectada a unos circuitos electrónicos de potencia 12 que están conectados a una red eléctrica 13 para asegurar el mando de la máquina eléctrica 11 en modo motor o generatriz (figuras 1 a 4 y 9).

La máquina eléctrica 11 comprende un circuito magnético de estator 22 y unas bobinas de estator 23 (figuras 5 y 6).

La máquina eléctrica 11 comprende un rotor 20 cuya velocidad periférica es elevada, típicamente del orden de 250 m/s. El rotor 20 debe así ser realizado según una tecnología compatible con dicha velocidad de rotación. El rotor 20 puede por ejemplo estar constituido por un rotor en hojas en jaula de ardilla. En este caso, los circuitos electrónicos 12 aseguran la alimentación a frecuencia y tensión variable en modo motor y convierten en tensión fija rectificada la tensión variable salida de la máquina en modo generador.

El rotor 20 solidario de un árbol 38 puede ventajosamente estar realizado, como se ha representado en la figura 6, en forma de un rotor monobloque de acero de alta resistencia con una bobina de excitación 21 alimentada por medio de un transformador giratorio 37 asociado a unos diodos de rectificado 30, de manera que regule la excitación de la máquina y proporcione una tensión constante en modo generador y un par controlado en modo motor.

ES 2 314 599 T3

El rotor 20 puede también ser de imanes permanentes para asegurar la alimentación a frecuencia síncrona de la velocidad de rotación y tensión variable en modo motor y convertir en modo generador la tensión variable salida de la máquina en tensión fija rectificada.

5 El hecho de que la máquina eléctrica 11 esté situada entre la bomba 26 y la turbina 29 con una interacción sobre una misma línea de árbol confiere al conjunto giratorio una rigidez en flexión importante, lo que permite que la turbomotobomba funcione por debajo de su primera velocidad crítica de flexión hasta una velocidad de rotación elevada del orden de varias decenas de millares de revoluciones por minuto.

10 Ventajosamente, el rotor 48 de la turbina 29 y los rodets 41, 42 de la bomba 26 están realizados en una aleación de titanio de alta resistencia, por ejemplo del tipo de TA6 V ELI o TA5 E ELI o de aleación ligera por ejemplo aluminio-litio. Dicha utilización de aleaciones con alto valor de la relación límite elástico/densidad permite la fabricación de una turbomotobomba monobloque y muy compacta debido a que, incluso con una presión de impulsión de 10 a 20 MPa, los elementos giratorios conservan una buena resistencia mecánica y que el número de etapas puede ser muy
15 reducido, por el lado de la bomba y por el lado de la turbina.

El conjunto giratorio de la turbomotobomba puede estar soportado por dos cojinetes fluidos hidrostáticos 31 (figura 5).

20 Cuando la turbomotobomba está equipada con cojinetes fluidos 31, unas juntas dinámicas 28 pueden estar dispuestas entre la bomba 26, el cojinete fluido 31 situado al lado de la bomba 26, entre este cojinete fluido 31 situado al lado de la bomba 26, y la máquina eléctrica 11, entre la máquina eléctrica 11 y el cojinete fluido 31 situado al lado de la turbina 29, así como entre este último cojinete fluido 31 situado al lado de la turbina 29 y la turbina 29.

25 El cárter 25 de la turbomotobomba es compacto, de gran rigidez y sólo presenta unas estanqueidades estáticas con el medio circundante. Este cárter 25 está ideado para minimizar las fugas térmicas entre la turbina 28 y la bomba 26 manteniendo al mismo tiempo la alineación de los cojinetes.

Un cojinete con rodamientos 44 puede estar previsto de forma opcional para realizar la función de cojinete de
30 socorro como tope giratorio axial que actúa cuando tiene lugar la aparición de transitorios de la turbomotobomba, de manera que asegure la absorción de los esfuerzos en particular cuando la velocidad de rotación es demasiado baja para que las presiones disponibles en la turbomotobomba permitan equilibrar los esfuerzos, o en caso de avería.

35 Sin embargo, debe observarse que todas las partes internas de la turbomotobomba está bañadas por el mismo fluido criogénico, en forma líquida o gaseosa, asegurando las juntas de estanqueidad dinámica sin contacto 28 la separación de las cavidades internas que se encuentran en unas condiciones termodinámicas diferentes.

Las barreras de estanqueidad dinámica 28 pueden estar compuestas por juntas laberínticas o de anillo flotante simple, o por pares de juntas laberínticas o de anillos flotantes y con recuperación de fuga para asegurar el confinamiento
40 de los fluidos en cada una de las cavidades internas de la turbomotobomba.

Los cojinetes fluidos 31 son alimentados con fluido líquido a alta presión extraído corriente abajo de la última rueda centrífuga de la bomba 26.

45 La geometría de la o de la última de las ruedas centrífugas 42 de la bomba 26 así como la parte estatórica enfrentada están diseñadas de manera que formen una o dos restricciones 49 al paso del fluido, siendo estas restricciones de sección variable según la posición relativa entre el rotor y el estator de la bomba 26 y constituyendo un dispositivo de equilibrado axial que permite modificar el campo de presión local y anular la resultante de los esfuerzos axiales sobre el conjunto giratorio.

La arquitectura y los conductos internos de la turbomotobomba están definidos de manera que optimicen las recirculaciones necesarias para alimentar los cojinetes fluidos 31, así como el dispositivo de equilibrado axial 49, asegurando al mismo tiempo un enfriado de la máquina eléctrica 11 y las evacuaciones fluidas hacia la entrada de la bomba
55 o el circuito corriente abajo de la turbina 29.

El dispositivo de equilibrado axial activo 49 puede ser reemplazado en caso necesario por un tope fluido alimentado a partir de la alta presión de la bomba 26.

60 La alimentación de los cojinetes fluidos 31 y en caso necesario el tope fluido, puede ser realizada a partir de una fuente externa suplementaria del mismo fluido en estado líquido y comprimido que el fluido licuado salido de un depósito principal y destinado a alimentar un gasoducto. En el caso en que el fluido principal es GNL, la fuente externa suplementaria puede ser por ejemplo un terminal metanero de regasificación que dispone de gas natural líquido presurizado. La alimentación de los cojinetes fluidos 31 a partir de la fuente externa suplementaria puede ser efectuada
65 o bien de forma permanente, o bien durante las únicas fases de funcionamiento transitorias de la turbomotobomba.

La máquina eléctrica 11 puede ser enfriada por ejemplo por circulación de gas extraído a la entrada de la turbina 29 y expandido a una presión ligeramente superior a la presión del circuito de evacuación, de manera que mantenga

el fluido en su estado termodinámico gaseoso o ligeramente difásico. Esta elección tiene por objeto minimizar las pérdidas por rozamiento viscoso en el entrehierro.

Como ya se ha indicado, el dispositivo hidráulico de equilibrado 49 así como los cojinetes fluidos 31 son directamente alimentados con gas natural líquido extraído en la parte de alta presión de la bomba 26 por medio de recirculaciones internas. Los cojinetes fluidos 31 pueden ser también alimentados de forma permanente por unas fuentes gaseosas líquidas de alta presión disponibles en el terminal o simplemente antes y durante los regímenes transitorios en tanto la presión suministrada por la bomba 26 no es suficiente.

La arquitectura propuesta para la turbomotobomba permite acondicionar todos sus volúmenes internos con gas natural en forma líquida o vapor y presentar sólo unas estanqueidades estáticas con respecto al entorno externo. La bomba 26, los cojinetes fluidos 31 y eventualmente la máquina eléctrica 11 están en un entorno líquido, estando los otros volúmenes internos en ambiente gaseoso. El confinamiento de cada cavidad que presenta una presión y una calidad de fluido diferente de las cavidades adyacentes está asegurado por unas estanqueidades dinámicas 28 realizadas por unas juntas de tipo laberinto o con anillos flotantes, que permiten minimizar las fugas y que aseguran a la máquina la ausencia de desgaste por contacto rozante. Las juntas dinámicas 28 están montadas según la necesidad solas o por pares, y en este segundo caso, las fugas a baja presión son recogidas entre cada par de juntas de estanqueidad, y evacuadas cuando es posible hacia corriente abajo de la turbina 29, o reincorporadas a la entrada de la bomba 26.

A título de variante, la máquina eléctrica 11 puede ser enfriada por circulación de fluido en fase líquida. En este caso, la máquina eléctrica que funciona en un entorno térmico a menos 150 K ve sus características mejoradas. El estator de la máquina eléctrica 11 está en este caso encamisado de manera que minimice las pérdidas por fricción del líquido en el entrehierro.

Según otro modo de realización posible, los cojinetes fluidos hidrostáticos 31 pueden ser reemplazados por unos cojinetes magnéticos activos. Dichos cojinetes son totalmente insensibles al desgaste y confieren así a la turbomotobomba una duración de vida muy importante.

En este caso, el dispositivo hidráulico 49 de equilibrado de los esfuerzos axiales que se ejercen sobre el conjunto giratorio de la turbomotobomba puede también ser reemplazado por un tope magnético axial activo.

Para una aplicación al GNL y en el caso en que la turbomotobomba está equipada con cojinetes magnéticos, el conjunto de los cojinetes magnéticos activos y de la máquina eléctrica 11 está acondicionado con gas natural en estado líquido o gaseoso, y las estanqueidades dinámicas 28 están reducidas a dos situadas por una parte entre la bomba 26 y el cojinete situado al lado de la bomba 26 y por otra parte entre la turbina 29 y el cojinete situado al lado de la turbina 29.

Con unos cojinetes fluidos o unos cojinetes magnéticos que presentan unas rigideces de cojinetes particularmente bajas, es posible tener una velocidad de rotación en funcionamiento normal estabilizado que está por ejemplo situada entre los dos primeros modos de cojinetes y la primera velocidad crítica de flexión del conjunto giratorio.

En la turbomotobomba según la invención, la bomba 26 es utilizada para comprimir un fluido líquido a baja temperatura, tal como gas natural licuado, y la turbina 29 asegura la provisión de energía mecánica a la bomba 26 por expansión del mismo fluido al estado gaseoso.

La máquina eléctrica 11 aporta el complemento de energía mecánica a la bomba 26 si la turbina 29 no es suficiente o por el contrario evacua el exceso de energía de la turbina 29 en forma de producción de energía eléctrica.

Como se ha representado en la figura 9, la máquina eléctrica 11 es mandada en modo motor o generador por unos circuitos electrónicos de potencia 12 conectados a una red eléctrica 13 de frecuencia f y de tensión nominal U determinadas.

Los circuitos electrónicos de potencia 12 pueden comprender un rectificador de corriente 51, un convertidor de tensión 52 y un ondulator 53 interpuestos entre la máquina eléctrica 11 y la red eléctrica de alimentación 13.

El conjunto de los circuitos 12 permite controlar la transferencia de corriente en los dos sentidos, de la turbomotobomba hacia la red 13 en el modo generatriz y de la red 13 hacia la turbomotobomba en el modo motor. Unos circuitos 55 de condicionamiento del par y de la velocidad de rotación de la máquina eléctrica 11 están conectados a esta última, al rectificador 51 y al convertidor de tensión 52. Los circuitos electrónicos de potencia 12 comprenden asimismo unos circuitos 54 de mando de diversas válvulas asociadas a la turbomotobomba.

El mando de la turbomotobomba puede estar asegurado cuidadosamente en velocidad cualquiera que sea el balance energético entre la bomba 26 y la turbina 29: cuando este balance es a favor de la turbina 29, los circuitos electrónicos retransmiten la corriente excedente hacia la red local 13 adaptando sus características de tensión y frecuencia, e inversamente proporcionan las buenas características de frecuencia, y tensión al motor 11 en caso de déficit de potencia entre la necesidad de la bomba 26 y la prestación de la turbina 29. Así, el dispositivo permite regular perfectamente las transitorias de arranque o de parada de la turbomotobomba y asegurar el buen funcionamiento del sistema. Los circuitos electrónicos están adaptados a la tecnología particular considerada para la máquina eléctrica 11.

ES 2 314 599 T3

En el caso en que la máquina eléctrica 11 es del tipo con excitación variable, los circuitos electrónicos pueden ser muy simples. La tensión constante suministrada a la salida de la máquina eléctrica 11 permite suprimir el módulo 52 de conversión de tensión.

- 5 Cuando la máquina eléctrica 11 es del tipo en jaula de ardilla o con imanes permanentes, el módulo 52 de conversión de tensión es necesario y un sensor de posición del rotor es necesario para mandar la puesta en fase en el modo motor o generador.

- 10 Se describirá ahora con referencia a las figuras 1 a 4 la aplicación de la turbomotobomba descrita anteriormente a diferentes tipos de ciclos de recuperación de energía a partir de un terminal de regasificación que comprende un depósito 1 de gas licuado en el cual está instalada una motobomba de baja presión 2 que permite el envío, sobre una línea 170 (figuras 1, 3 y 4), ó 170, 170a (figura 2) de gas licuado hacia la entrada de una bomba de alta presión.

- 15 En el caso del ciclo ilustrado en la figura 1, la única motobomba de alta presión utilizada está constituida por la bomba de alta presión 26 de la turbomotobomba 5 tal como se ha descrito más arriba. En ese caso, la bomba 26 está ideada para suministrar una presión superior a la necesaria para la alimentación del gasoducto 200. El gas salido del depósito 1 puede así, después de vaporización y calentamiento a la temperatura ambiente, en un primer intercambiador-evaporador 4, ser expansionado en la turbina 29 hasta la presión de entrada en el gasoducto 200, produciendo así energía mecánica que pasa a reducir la energía que debe proporcionar el motor eléctrico 11 para accionar la bomba 26, siendo la variación de entalpía por unidad de presión en estado gaseoso superior a la del estado líquido.

- 20 El gas a la salida de la turbina 29 que se encuentra a una temperatura inferior a la ambiente, debe sufrir un complemento de calentamiento atravesando un segundo intercambiador térmico 4' que funciona con agua a temperatura ambiente (agua de mar o de río), introducida por un circuito 174' y evacuada por un circuito 175'.

- 25 Es posible introducir en el circuito 174 de introducción de agua del primer intercambiador-evaporador 4 agua calentada, por ejemplo a una temperatura del orden de 40 a 50°C, obtenida recuperando las pérdidas térmicas de un motor o de una turbina que produce electricidad en la proximidad u otra fuente de cogeneración, de manera que aumente la temperatura a la entrada de la turbina 29, siendo el agua calentada evacuada normalmente del intercambiador-evaporador 4 por el circuito 175 de evacuación de agua. En este caso de utilización de agua calentada, el segundo intercambiador térmico 4' situado corriente abajo de la turbina 29 puede ser suprimido, y la energía producida por la turbina 29 está muy aumentada. Dicha configuración permite equilibrar toda la energía de bombeo por la energía proporcionada por la turbina 29 e incluso disponer de un balance positivo que permita hacer funcionar el alternador 11 como generatriz.

- 30 En la figura 1, se observa una válvula de regulación V1 situada en la línea 171 de impulsión de la bomba de alta presión 26 que conduce a la entrada del intercambiador-evaporador 4. La salida de este intercambiador-evaporador 4 está conectada por una línea 172 con la entrada de la turbina 29. La salida de la turbina 29 está conectada por una línea 176 con la entrada del segundo intercambiador-evaporador 4'. La salida de este último está conectada a una línea 177 que conduce al gasoducto 200 y sobre la cual está situada una válvula V2 de aislamiento entre el gasoducto y el sistema de compresión-evaporación que constituye un regulador de presión.

- 35 Una válvula V3 está situada sobre la línea 173 de enfriado dispuesta en derivación a la salida de la bomba de alta presión 26 y que conduce de retorno al depósito 1.

- 40 En el caso del modo de realización ilustrado en la figura 1, la turbomotobomba 5 está asociada sistemáticamente a un primer intercambiador-evaporador 4 situado corriente arriba de la turbina 29 y corriente abajo de la bomba 26, y en caso necesario también a un segundo intercambiador-evaporador 4' situado corriente abajo de la turbina 29.

- 45 El modo de realización de la figura 1 permite evitar la colocación de un sistema complejo de repartición de caudal hacia cada turbina 29 de una turbomotobomba 5. No es necesario prever unos equipos suplementarios de enfriado o de reciclado para la bomba de alta presión 26 distintos de los existentes. Por el contrario, la presencia de los circuitos 12 de regulación electrónica de potencia permite regular la velocidad de la turbomotobomba 5, de manera que en caso necesario la válvula de regulación V1 situada en la impulsión de la bomba de alta presión 26 sobre la línea 171 podría ser suprimida.

- 50 La figura 7 muestra la disposición de los diferentes componentes y la conducción de los flujos en el interior de una turbomotobomba 5 utilizada en el marco de la aplicación ilustrada en la figura 1.

- 55 Se aprecia en esta figura 7 unas juntas de estanqueidad dinámica que comprenden una doble barrera 28a, 28b y que definen unas cavidades 27 interjuntas dinámicas dando lugar a una recuperación de las fugas recogidas a nivel de la junta de estanqueidad dinámica por una línea 63 que reintroduce a la entrada de la bomba HP26 el fluido recuperado en las cavidades 27.

- 60 En la figura 7, la referencia 60 designa una línea de alimentación de los cojinetes fluidos 31 a partir de gas natural en estado líquido extraído a la salida de la última rueda centrífuga de la bomba 26 o en caso necesario directamente extraído de una línea líquida de alta presión del terminal donde se encuentra el depósito 1. El caudal de alimentación

ES 2 314 599 T3

de los cojinetes fluidos 31 es determinado por unos orificios calibrados 64. El gas natural líquido es recogido a baja presión a la salida de los cojinetes fluidos 31 y reincorporado a la entrada de la bomba 26 por una línea 61.

El caudal de enfriado de la máquina eléctrica 11 es extraído a la entrada de la turbina 29, expansionado a través de un orificio calibrado 64' y sufre una expansión complementaria a través de un segundo orificio calibrado 64'' situado a la salida de la máquina eléctrica 11 antes de ser reincorporado por la línea 62a a la entrada de la bomba 26.

Se observa asimismo en la figura 7 una válvula de tres vías V15 situada sobre el circuito 173 de enfriado de los cojinetes fluidos 31.

La alimentación de los cojinetes fluidos 31 y el enfriado de la máquina eléctrica 11 pueden realizarse a partir de conductos de circulación perforados en los cárteres de la turbomotobomba o por unas tuberías externas.

Cuando se utiliza un dispositivo 49 hidráulico de equilibrado de los esfuerzos axiales ejercidos sobre el conjunto giratorio de la turbomotobomba 5, este dispositivo está equipado con dispositivos que realizan la función de calibrado para el caudal que circula en el dorso del plato de equilibrado y que permiten adaptar el campo de presión para anular la resultante de los esfuerzos.

La figura 2 muestra otro ejemplo de ciclo de recuperación de energía, en el cual, como en el ciclo de la figura 1, una motobomba de alta presión clásica 303 de un terminal (como el de la figura 10) está reemplazada por una turbomotobomba 5. En el caso del modo de realización de la figura 2, la presión de salida de la bomba de alta presión 26 de la moturbobomba 5 no está sin embargo aumentada. Una fracción del caudal de fluido que atraviesa la bomba 26 es extraída a la salida del intercambiador-evaporador 4 y derivada, por una línea 172 equipada con una válvula de aislamiento V4, hacia la turbina 29 para ser expansionada a baja presión en esta turbina 29 antes de ser evacuada por una línea 176 para atravesar otro intercambiador térmico 6 que ejerce la función de condensador. El fluido nuevamente licuado salido del circuito 6b del intercambiador-condensador 6 es reinyectado en forma líquida, por una línea 182 equipada con una válvula de aislamiento V5, en una capacidad 7 destinada a eliminar las burbujas que pueden subsistir en el condensado, y situada a la entrada de la bomba de alta presión 26.

El flujo principal de gas licuado extraído por la bomba HP26 sobre la línea 170a de conexión con la capacidad 7 circula a la salida de esta bomba por una línea 171 equipada con una válvula de regulación V1 y atraviesa un circuito 6a del condensador 6. El flujo de salida del circuito 6a del condensador 6 es aplicado por una línea 178 equipada con una válvula de aislamiento V6 a la entrada del intercambiador térmico 4 con agua a temperatura ambiente (introducida por el circuito 174 y evacuada por el circuito 175). El flujo que circula por el circuito 6a del condensador 6 desempeña la función de fuente fría y proporciona al circuito 6b las frigorías necesarias para la condensación del fluido que circula en la línea 176 de salida de la turbina 29.

Como en el caso del modo de realización de la figura 1, es posible acoplar el circuito 174 del intercambiador térmico 4 destinado al calentamiento a temperatura ambiente, con una fuente de agua caliente de tipo cogeneración para aumentar la temperatura a la entrada de la turbina 29 y así incrementar la energía recuperada en la turbina.

A la salida del circuito 6a del condensador 6, una línea 177 equipada con una válvula de enfriado V3b alimenta un circuito de enfriado.

La salida del intercambiador-evaporador 4 está conectada por una línea 179 equipada con una válvula de aislamiento V2 a un gasoducto 200.

Las válvulas V4, V5 aseguran el aislamiento del circuito turbina 29-condensador 6. La válvula V4 situada sobre la línea 172 permite además regular el caudal de fluido derivado hacia la turbina 29.

Se observará que el reincorporador del terminal, no representado en los esquemas, destinado a reintroducir la pequeña cantidad de gas natural evaporada llamada "boil-off gas" comprimida de nuevo en la línea de alimentación de una bomba HP puede también reemplazar la capacidad tampón 7.

Para asegurar unas condiciones de puesta en marcha satisfactorias para la bomba HP26, el lado del fluido frío del condensador 6 debe ser previamente enfriado a la temperatura del gas natural líquido. El enfriado de la parte de bomba HP26 es completado por una circulación de líquido establecida gracias a la apertura de la válvula V3b, estando la válvula V6 entonces cerrada para aislar el evaporador 4 (véase la figura 2). La puesta en marcha de la turbomotobomba 5 está asegurada por el alternador 11 que funciona en modo motor y mandado por el circuito electrónico 12, lo que permite asegurar una subida de presión progresiva. Las válvulas V4 y V5 son progresivamente abiertas para arrastrar la turbina 29. La regulación del caudal derivado hacia la turbina 29 está asegurada por la válvula V4 que realiza también la función de válvula de regulación. Cuando tiene lugar una parada, la válvula V4 puede ser cerrada para parar la alimentación de la turbina 29 y el motor 11 puede ser parado a continuación.

La presencia de circuitos electrónicos de mando y regulación 12 de la turbomotobomba 5 permite prever la supresión de la válvula de regulación V1 situada sobre la impulsión de la bomba HP26.

ES 2 314 599 T3

El conjunto turbomotobomba 5/condensador 6 puede ser ventajosamente agrupado sobre una misma plataforma de manera que minimice las líneas de transferencia líquidas y simplifique el aislamiento de las zonas frías (aislantes térmicos o cajas frías).

5 La figura 3 ilustra otro ejemplo de ciclo que utiliza una turbomotobomba 105 de acuerdo con la invención.

En este modo de realización de la figura 3, se utiliza una motobomba de alta presión clásica 103, análoga a la motobomba 303 de la figura 10, con una bomba de alta presión 103a accionada por un motor 103b que puede ser un motor eléctrico clásico.

10

En el modo de realización de la figura 3, que integra una motobomba 103 de un terminal existente, se introduce sobre la línea de alta presión 184, 186 que conecta la línea de salida 171 de la bomba de alta presión 103a a un intercambiador-evaporador 104 clásico cuya salida está conectada a un gasoducto 200 por una línea 187 equipada con una válvula de aislamiento V2, una válvula de regulación V7 con baja pérdida de carga. El intercambiador-evaporador

15

104 comprende de forma clásica un circuito de entrada de agua 174 y un circuito de salida de agua 175.

En derivación sobre la línea 184 equipada con la válvula de regulación V7 con baja pérdida de carga, una línea 185 equipada también con una válvula de regulación V8 está conectada a un circuito 106a de un condensador 106, estando la salida del circuito 106a conectada a la línea 186 de entrada del intercambiador-evaporador 104.

20

Las válvulas V7 y V8 tienen por función asegurar la regulación del caudal de gas licuado derivado hacia el circuito 106a del condensador 106.

La válvula V8 permite también aislar el condensador 106 del circuito de emisión del terminal y es utilizada para la puesta en marcha del bucle de recuperación de energía. Si el terminal no acepta pérdida de carga suplementaria en la línea de emisión 171, es posible reemplazar la válvula V7 por una bomba de circulación implantada sobre la línea de derivación 185 hacia el condensador 106, estando la regulación del caudal derivado asegurada en este caso por el mando de la válvula V8 y/o de la bomba de derivación.

25

En el modo de realización de la figura 3, el bucle de recuperación de energía comprende una turbomotobomba 105 del tipo descrito más arriba, un intercambiador-evaporador 108 que utiliza agua a temperatura ambiente o calentada, el circuito 106b o compartimiento "caliente" del condensador 106 así como una capacidad tampón 107 situada corriente arriba de la bomba 26, las tuberías de transferencia de fluido y las diversas válvulas destinadas a asegurar el buen funcionamiento del bucle. El bucle de recuperación funciona en ciclo cerrado.

30

35

El fluido introducido en el bucle de recuperación de energía se deriva de la línea de emisión del terminal, corriente abajo de la bomba de alta presión 103a, por una línea 183 equipada con una válvula V9 que alimenta la capacidad 107.

El intercambiador-evaporador 108 posee un circuito 174" de alimentación con agua a temperatura ambiente originalmente calentada y proporcionada por una fuente de cogeneración disponible en la proximidad, siendo el agua evacuada por un circuito 175".

40

El fluido proporcionado por la capacidad 107 a través de la línea 170b es admitido líquido en la entrada de la bomba 26 de la turbomotobomba 105, es presurizado por esta bomba 26, y después vaporizado y calentado en el intercambiador térmico de agua 108 hasta la temperatura ambiente o a una temperatura superior en el caso de utilización de agua calentada a la entrada 174" del intercambiador-evaporador 108. El fluido que circula a través de las líneas 192, 193 es expandido a continuación en la turbina 29 en la que cede una energía mecánica superior a la energía requerida para el bombeo. El fluido que sale de la turbina 29 por las líneas 176, 195 es licuado a continuación a baja presión en el circuito 106b del condensador 106, y después reciclado por una línea 196 a la capacidad 107 dispuesta a la entrada de la bomba 26.

45

50

El excedente de energía mecánica es transformado en electricidad por la máquina eléctrica 11 que funciona entonces en modo generatriz y puede ser proporcionada al terminal o a una red eléctrica local.

En el modo de realización de la figura 3, la utilización del bucle de recuperación de energía que comprende esencialmente la turbomotobomba 105, el intercambiador-evaporador 108 y el condensador 106 puede ser la siguiente:

55

El terminal en el cual se sitúa el depósito 1 funciona convencionalmente sin recuperación de energía cuando la válvula V7 está abierta y la válvula V8 cerrada. Para utilizar el bucle de recuperación de energía, la primera etapa consiste en activar las válvulas V7, V8 de manera que se establezca un caudal de gas natural líquido en el compartimiento frío 106a del condensador 106, siendo la válvula V8 abierta lentamente de manera que asegure un enfriado progresivo del condensador 106.

60

La etapa siguiente consiste en llenar el bucle de recuperación de energía abriendo para el gas natural la válvula V9, estando la válvula V11 situada sobre la línea 189 a la entrada del intercambiador 108 cerrada y estando la válvula V10 situada sobre la línea 191 abierta. Las evaporaciones resultantes del enfriado son evacuadas hacia el circuito de recogida de enfriado del terminal, siendo la válvula V9 cerrada de nuevo si la presión en la capacidad resulta demasiado importante. Cuando hay suficiente líquido en la capacidad 107, la turbomotobomba 105 puede ser activada

65

ES 2 314 599 T3

- como motor/bombeo a muy baja velocidad de manera que establezca una circulación de líquido en la bomba. Durante ese periodo, las fugas de los cojinetes fluidos 31 son recogidas y evacuadas a través de una válvula de tres vías V15 (ver figura 8) hacia un circuito de recogida de baja presión de manera que asegure una circulación fluida en los cojinetes y obtener así su enfriado. Al final de esta secuencia, las partes de bomba y de cojinetes de la turbomotobomba 105, así como el compartimiento caliente 106b del condensador 106 están a la temperatura del gas líquido, y la capacidad tampón 107 está llena de una cantidad suficiente de líquido para asegurar el buen funcionamiento del bucle. La válvula V9 es entonces cerrada de nuevo, así como la válvula V15 de evacuación de las fugas de cojinetes hacia el terminal, y el bucle se encuentra de nuevo aislado de la emisión.
- La tercera etapa consiste en poner en marcha la turbomotobomba 105 en modo motor gracias a los circuitos electrónicos 12, estando la válvula V11 abierta y la válvula V10 cerrada para alimentar la turbina 29 que toma progresivamente el relevo del motor, y después proporciona energía excedente a las necesidades de la bomba 26 y permite pasar a modo generatriz.
- El bucle de recuperación de energía posee sobre una línea 190 una válvula V12 de by-pass del intercambiador-evaporador 108 que permite ajustar la temperatura a la entrada de la turbina 29 y por consiguiente la temperatura a la salida el condensador 106, así como una válvula V13 de by-pass de la turbina 29 que, derivando sobre una línea 194 la totalidad o parte del caudal, puede asegurar la parada de emergencia de la turbomotobomba 105 en caso de avería de la generatriz o de su electrónica, y si es necesario la regulación en velocidad de la turbomotobomba 105. Ventajosamente, los circuitos electrónicos de potencia pueden asegurar asimismo la regulación de la velocidad de la turbomotobomba 105 sin perjuicio para el rendimiento puesto que en este caso todo el caudal bombeado atraviesa la turbina 29.
- La parada del bucle se efectúa cerrando la válvula V11 y abriendo la válvula V10, siendo la turbina 29 de la turbomotobomba 105 alimentada ya solamente por el volumen gaseoso contenido en el intercambiador-evaporador 108 y la línea corriente arriba se detiene progresivamente. Si es necesaria una parada de emergencia, es activada por la apertura de la válvula V13.
- La parte 26 de la turbomotobomba 105, así como la capacidad tampón 107, el contenedor 106 y las líneas líquidas están acondicionados en caja fría o aislados para evitar las pérdidas térmicas y permitir al bucle de recuperación tener unas fases de espera lleno de fluido, pero sin funcionamiento. Ventajosamente, la capacidad 107, la turbomotobomba 105, el condensador 106 así como los equipos de válvulas pueden estar integrados sobre una plataforma común.
- La figura 4 ilustra asimismo otro ejemplo de ciclo que utiliza una turbomotobomba 105 de acuerdo con la invención.
- La solución presentada en la figura 4 utiliza el mismo principio que el descrito con referencia a la figura 5, evitando al mismo tiempo la utilización de un intercambiador térmico de agua suplementario, tal como el intercambiador 108 de la figura 3.
- Como según el modo de realización anterior, una parte del gas licuado emitido por el terminal a partir de un depósito 1 es extraída a la salida de una bomba de alta presión tradicional 103a y corriente arriba de un evaporador clásico 104 para ser derivada hacia un condensador 106 para asegurar la función de fuente fría de un ciclo de recuperación de energía abierto, que utiliza el mismo gas natural que el del terminal.
- En el modo de realización de la figura 4, una fracción del gas natural es extraída a la salida del intercambiador-evaporador 104 clásico de un terminal para ser expansionado en la turbina 29 de la turbomotobomba 105 en la que el gas expansionado atraviesa a continuación el circuito 106b del condensador 106 para ser licuado y luego, después de haber sido reintroducido en la capacidad 107, para circular por la línea 170b, ser presurizado en forma líquida por la bomba 26 de la turbomotobomba 105 y a continuación ser reinyectado por la línea 200 y la válvula de aislamiento V14, o bien en el flujo principal del terminal a la entrada del intercambiador-evaporador 104, o bien eventualmente en el flujo derivado de la bomba 103a que alimenta como fuente fría el circuito 106a del condensador 106. En este último caso, la bomba 26 de la turbomotobomba 105 debe proporcionar la misma sobrepresión que las bombas de alta presión 103a del terminal.
- Como se acaba de ver, la solución presentada en la figura 4 difiere de la representada en la figura 3 por la utilización de unos intercambiadores-evaporadores 104 del terminal para el bucle de recuperación de energía. La misma puede ser fácilmente aplicada a un terminal existente creando además unas modificaciones precedentes sobre la línea de alta presión (derivación, válvulas V7, V8) dos interfaces suplementarias, la primera corriente arriba de los intercambiadores-evaporadores 104 para reintroducir el gas natural líquido que procede de la turbomotobomba 105, y la segunda corriente abajo de los mismos evaporadores 104 para alimentar la turbina 29 de la turbomotobomba 105. El bucle de recuperación comprende entonces el condensador 106, la turbomotobomba 105 y la capacidad corriente arriba 107 así como las tuberías y válvulas definidas en la figura 4, justificadas por la utilización definida a continuación.
- Cuando tiene lugar la utilización del modo de realización de la figura 4, como para el de la figura 3, la primera etapa consiste en activar las válvulas V7, V8 para asegurar la alimentación del circuito 106a del condensador 106 con fluido frío.

ES 2 314 599 T3

El llenado del circuito capacidad tampón 107, turbomotobomba 105, parte de bomba 103a, circuito 106b del condensador 106 (lado caliente) se efectúa abriendo la válvula V9, estando las válvulas V4,V14 cerradas y estando la válvula V10b sobre la línea 198 abierta. Como anteriormente, la puesta en marcha del alternador 11 a muy baja velocidad en modo motor permite utilizar la bomba 26 como circulador de fluido y asegurar así el enfriado de la parte
5 “líquida” del bucle. Durante esta fase, las fugas de los cojinetes fluidos 31 son como anteriormente evacuadas a través de la válvula V15 hacia un circuito de recogida de baja presión del terminal.

Cuando los circuitos están suficientemente fríos y la capacidad tampón 107 presenta una cantidad de líquido suficiente para asegurar el buen funcionamiento de la bomba 26, las válvulas V10b y V9 se cierran, la válvula V4 sobre
10 la entrada de la turbina 29 se abre progresivamente, y la máquina eléctrica 11 se activa en modo motor simultáneamente para lanzar la bomba 26. La máquina eléctrica 11 pasa a modo generatriz en cuanto la potencia proporcionada por la turbina 29 lo permite, y la válvula V14 se abre cuando la presión a la salida de la bomba 26 alcanza la presión existente en la entrada de los evaporadores 104 del terminal.

Durante el funcionamiento del bucle, la temperatura a la entrada de la turbina 29 puede ser ajustada actuando sobre la apertura de la válvula V12b dispuesta sobre una línea 199. La velocidad de rotación de la turbomotobomba 105 es regulada por los circuitos electrónicos de mando.
15

La parada del bucle de recuperación se obtiene cerrando la válvula V4 de alimentación de la turbina 29 así como la válvula V14 para evitar la circulación inversa de líquido a alta presión en la bomba 26 a través de la línea 197. Contrariamente a la solución anterior, no hay gran volumen gaseoso entrampado corriente arriba de la turbina 29 en cuanto la válvula V4 se cierra y no es necesario practicar un by-pass a la turbina 29 cuando tiene lugar una parada de emergencia.
20

La capacidad tampón 107 está equipada con sistemas de válvulas que permiten vaciar el bucle y evacuar el excedente gaseoso hacia los circuitos de recogida del terminal.
25

La solución de la figura 4 se presta bien a una configuración condensador 106/turbomotobomba 105/capacidad 107 y equipos líquidos integrados sobre una misma plataforma.

Si se hace referencia a la figura 8, se aprecia el esquema de la disposición de los diferentes componentes de la turbomotobomba 5 ó 105 y la conducción de los flujos por el interior de ésta en el caso de las aplicaciones que acaban de ser descritas con referencia a las figuras 2 a 4.
30

Se puede observar que según la figura 8, a diferencia del esquema de la figura 7 aplicable al modo de realización de la figura 1, la evacuación por la línea 63 de las fugas recogidas a nivel de las juntas de estanqueidad dinámica 28a, 28b y del enfriado del alternador por la línea 62b, se realiza corriente abajo de la turbina 29 y no hacia la entrada de la bomba 26.
35

Los otros elementos comunes a los esquemas de las figuras 7 y 8 no serán descritos de nuevo.
40

Se observará que en los diferentes modos de realización descritos, los intercambiadores-evaporadores pueden ser por ejemplo unos intercambiadores con chorreado de agua, o también del tipo tubo/calandra o también con serpentín en una cuba de agua calentada.

El condensador 106 es típicamente un intercambiador de placas o con tubos/calandra.
45

El sistema según la invención ha sido descrito anteriormente en diversos ejemplos haciendo referencia a una turbomotobomba 5 ó 105 asociada a un condensador 106 y/o un intercambiador-evaporador 4 ó 108 y que coopera en caso necesario también con un intercambiador-evaporador tradicional 104 y/o una motobomba clásica 103a.
50

Sin embargo, la invención se aplica a unos sistemas que comprenden un mayor número de componentes.

Tradicionalmente, los terminales de regasificación están dispuestos sobre la base de una agrupación de las diferentes funciones con unas baterías de motobomba HP conectadas por una o dos líneas de alta presión a unas baterías de intercambiadores-evaporadores. El número de equipos de bombas y evaporadores utilizado es función del caudal de emisión requerido en el terminal, y las válvulas de regulación situadas sobre la impulsión de las bombas HP, así como las que están implantadas corriente abajo de los evaporadores aseguran el ajuste del caudal y de la presión a la entrada del gasoducto.
55

La puesta en marcha de una motobomba HP impone una secuencia particular. En primer lugar, la motobomba debe ser enfriada a la temperatura del gas líquido por circulación de gas natural líquido a baja presión, recuperado a continuación en un circuito de recogida específico, para evitar la presencia de burbujas gaseosas en el líquido y la cavitación de la bomba en funcionamiento. Es esta secuencia de enfriado la que recurre a una válvula de purga 3V3 (véase la figura 10). Durante la puesta en marcha siguiente, y para evitar una subida de presión demasiado brutal del fluido bombeado y la presencia de golpe de ariete, una parte del caudal es derivada a la impulsión de la bomba y reciclada hacia otro circuito de recogida compatible con la presión más elevada. En el marco de la presente invención, una válvula de purga 3V2b, asociada a un circuito de enfriado, se utiliza asimismo con una turbomotobomba 5 ó 105 como se ha mencionado en los diferentes ejemplos de las figuras 1 a 4.
60
65

REIVINDICACIONES

1. Sistema de compresión-evaporación para gas licuado contenido en un depósito (1), que comprende unos medios
 5 (2) de extracción y de bombeo para extraer e impulsar el gas licuado a baja presión fuera del depósito (1), unos medios de bombeo a alta presión, unos medios (4, 4'; 104) de evaporación por intercambio térmico con un fluido líquido y unos medios de acondicionamiento y de transferencia hacia un gasoducto (200),

caracterizado porque comprende por lo menos una turbomáquina constituida por una turbomotobomba (5; 105)
 10 que comprende un conjunto giratorio de gran rigidez en flexión sobre una misma línea de árbol, con por lo menos una bomba de alta presión (26) que comprende una etapa de aspiración axial y por lo menos una rueda centrífuga, una turbina (29) y una máquina eléctrica central (11) que puede ser utilizada en modo motor o generatriz y situada entre la bomba de alta presión (26) y la turbina (29), estando esta turbomotobomba (5; 105) dispuesta de forma compacta en el interior de un cárter rígido (25) que únicamente presenta unas estanqueidades estáticas con el medio circundante, estando el conjunto giratorio de la turbomotobomba (5; 105) adaptado para presentar una alta velocidad de rotación
 15 superior a 12.000 rpm permaneciendo al mismo tiempo fuera de las zonas de excitación de las velocidades críticas de rotación, estando todas las partes internas de la turbomotobomba (5; 105) bañadas por un mismo fluido criogénico que el gas licuado contenido en el depósito (1), estando la separación de cavidades internas de la turbomotobomba (5; 105) que se encuentran en condiciones termodinámicas diferentes asegurada por unas juntas de estanqueidad dinámicas sin contacto (28), y asegurando unos circuitos electrónicos de potencia (12) conectados a una red eléctrica (13) el mando de la máquina eléctrica central (11) en modo motor o generatriz.

2. Sistema según la reivindicación 1, **caracterizado** porque la velocidad de rotación del conjunto giratorio de la turbomotobomba está comprendida entre 20.000 y 40.000 rpm.

25 3. Sistema según la reivindicación 1 ó 2, **caracterizado** porque comprende un primer intercambiador-evaporador (4; 104; 108) intercalado entre la bomba de alta presión (26) y la turbina (29) para asegurar la compresión/evaporación del gas licuado utilizado como fluido de trabajo en la turbomotobomba (5; 105).

30 4. Sistema según la reivindicación 3, **caracterizado** porque los medios de bombeo de alta presión comprenden exclusivamente la bomba de alta presión (26) de la turbomotobomba (5) que está montada en serie entre el depósito (1) y el gasoducto (200).

35 5. Sistema según la reivindicación 3 ó 4, **caracterizado** porque los medios de evaporación por intercambio térmico con un fluido líquido comprenden dicho primer intercambiador-evaporador (4) intercalado entre la bomba de alta presión (26) y la turbina (29) y un segundo intercambiador-evaporador (4') dispuesto entre la turbina (29) y el gasoducto (200) a alimentar.

40 6. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado** porque comprende además una capacidad tampón (7; 107) dispuesta a la entrada de la bomba de alta presión (25) de la turbomotobomba (5; 105).

45 7. Sistema según la reivindicación 3 y la reivindicación 6, **caracterizado** porque comprende además un condensador (6) con un primer circuito (6a) interpuesto entre la salida de la bomba de alta presión (26) de la turbomotobomba (5) y el primer intercambiador-evaporador (4) y un segundo circuito (6b) interpuesto entre la salida de la turbina (29) de la turbomotobomba (5) y la capacidad tapón (7), estando el segundo circuito (6b) en intercambio de calor con el primer circuito (6a) para licuar de nuevo el fluido gaseoso que sale de dicha turbina (29).

50 8. Sistema según la reivindicación 6, **caracterizado** porque los medios de bombeo a alta presión comprenden una motobomba (103a, 103b) cuya entrada está conectada a dichos medios (2) de extracción y de bombeo, y cuya salida está conectada a un primer circuito (106a) de un condensador (106), estando la salida de este primer circuito (106a) conectada a la entrada de un intercambiador-evaporador (104) cuya salida está conectada a dicho gasoducto (200), porque dicha capacidad tapón (107) está montada en derivación en la salida de dicha motobomba (103a, 103b) y porque la salida de la turbina (29) de la turbomotobomba (105) está conectada con la entrada de un segundo circuito (106b) del condensador (106), estando la salida de este segundo circuito (106b) conectada a dicha capacidad tapón (107), y estando el segundo circuito (106b) en intercambio de calor con el primer circuito (106a) para licuar de nuevo
 55 el fluido gaseoso que sale de dicha turbina (29).

60 9. Sistema según la reivindicación 1, **caracterizado** porque los medios (4, 4'; 104) de evaporación por intercambio térmico con un fluido líquido comprenden unos medios de introducción y de evacuación de un fluido líquido constituido por agua cuya temperatura es por lo menos igual a la temperatura ambiente.

10. Sistema según la reivindicación 3, **caracterizado** porque el primer intercambiador-evaporador (4, 104; 108) intercalado entre la bomba de alta presión (26) y la turbina (29) comprende unos medios de introducción y de evacuación de un fluido líquido constituido por agua cuya temperatura es por lo menos igual a la temperatura ambiente.

65 11. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, **caracterizado** porque la turbomotobomba (5; 105) comprende unos cojinetes fluidos hidrostáticos (31) alimentados a partir del mismo fluido en estado líquido y comprimido que el fluido disponible a la salida de la bomba de alta presión (26) de la turbomotobomba (5; 105).

ES 2 314 599 T3

12. Sistema según la reivindicación 11, **caracterizado** porque la turbomotobomba (5; 105) comprende un dispositivo hidráulico de equilibrado activo de los esfuerzos axiales alimentado a partir del mismo fluido en estado líquido y comprimido que el fluido disponible a la salida de la bomba de alta presión (26) de la turbomotobomba (5; 105).

13. Sistema según la reivindicación 11, **caracterizado** porque la turbomotobomba (5; 105) comprende un tope fluido axial alimentado a partir del mismo fluido en estado líquido y comprimido que el fluido disponible a la salida de la bomba de alta presión (26) de la turbomotobomba (5; 105).

14. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, **caracterizado** porque la turbomotobomba (5; 105) comprende unos cojinetes magnéticos activos.

15. Sistema según la reivindicación 14, **caracterizado** porque la turbomotobomba (5; 105) comprende un tope axial magnético.

16. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, **caracterizado** porque la turbomotobomba (5; 105) comprende unos rodamientos de alta velocidad con bolas cerámicas.

17. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16, **caracterizado** porque la turbina (29) de la turbomotobomba (5; 105) comprende un rotor (48) de aleación de titanio de alta resistencia de tipo TA6 V ELI ó TA5 E ELI o de aleación ligera de tipo aluminio-litio.

18. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 17, **caracterizado** porque la bomba de alta presión (26) de la turbomotobomba (5; 105) comprende uno o varios rodets (41, 46) de aleación de titanio de alta resistencia del tipo TA6 V ELI ó TA5 E ELI o de aleación ligera del tipo aluminio-litio.

19. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 18, **caracterizado** porque la máquina eléctrica central (11) de la turbomotobomba (5; 105) comprende un rotor con imanes permanentes (21b), asegurando los circuitos electrónicos de potencia (12) la alimentación a frecuencia síncrona de la velocidad de rotación y tensión variable en modo motor y convirtiendo la tensión variable creada en tensión fija rectificada en modo generador.

20. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 18, **caracterizado** porque la máquina eléctrica central (11) de la turbomotobomba (5; 105) comprende un rotor monobloque con bobina de excitación (21a) alimentada por un transformador giratorio (37) y un puente de diodos de rectificado (30) para regular la excitación de la máquina eléctrica (11) y proporcionar una tensión constante en modo generador y un par controlado en modo motor.

21. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 18, **caracterizado** porque la máquina eléctrica central (11) de la turbomotobomba (5; 105) comprende un rotor de jaula de ardilla, asegurando los circuitos electrónicos de potencia (12) la alimentación a frecuencia y tensión variable en modo motor y convirtiendo la tensión variable creada en tensión fija rectificada en modo generador.

22. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 21, **caracterizado** porque se aplica a un gas licuado del tipo gas natural licuado (GNL).

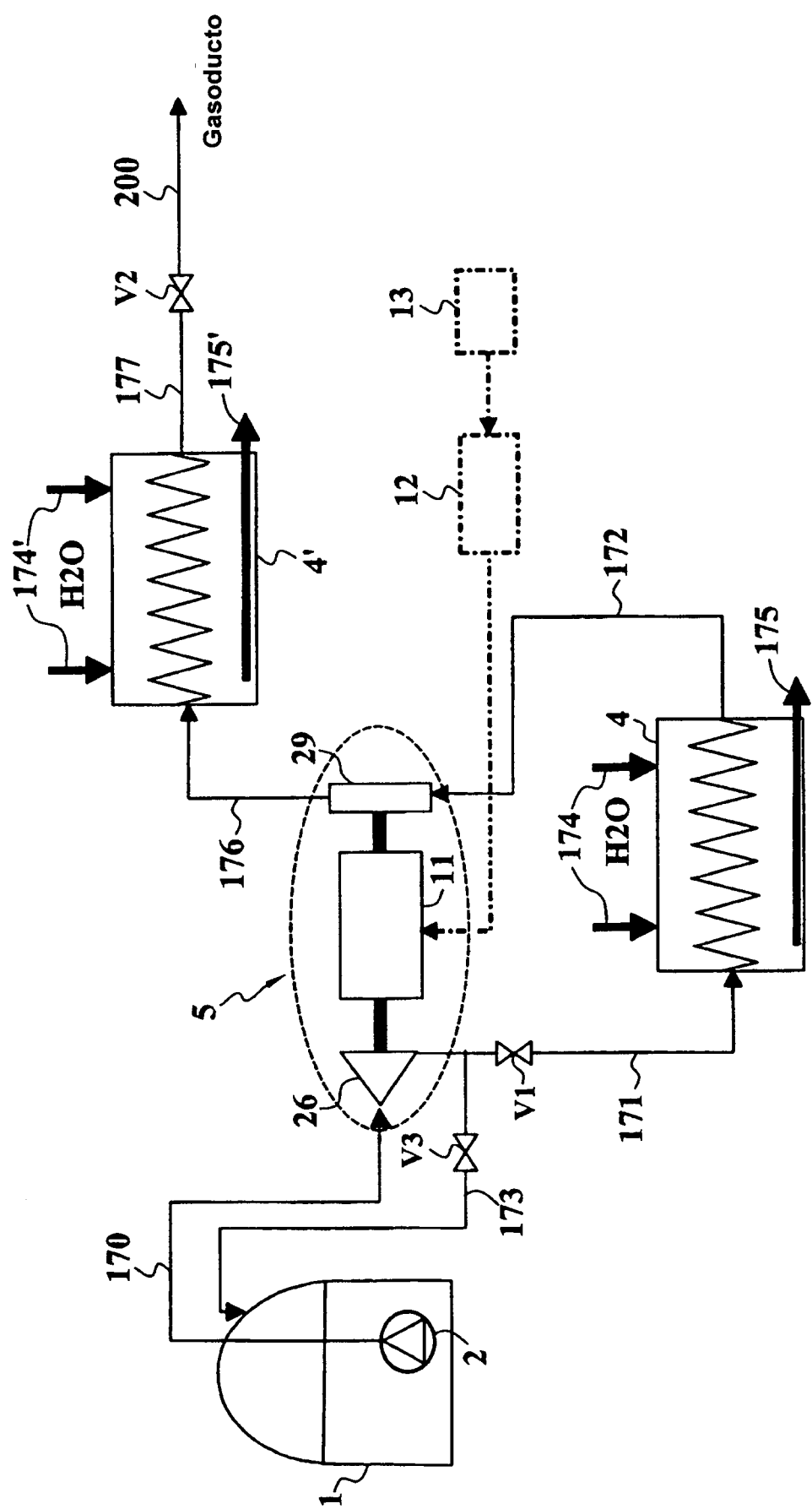


FIG.1

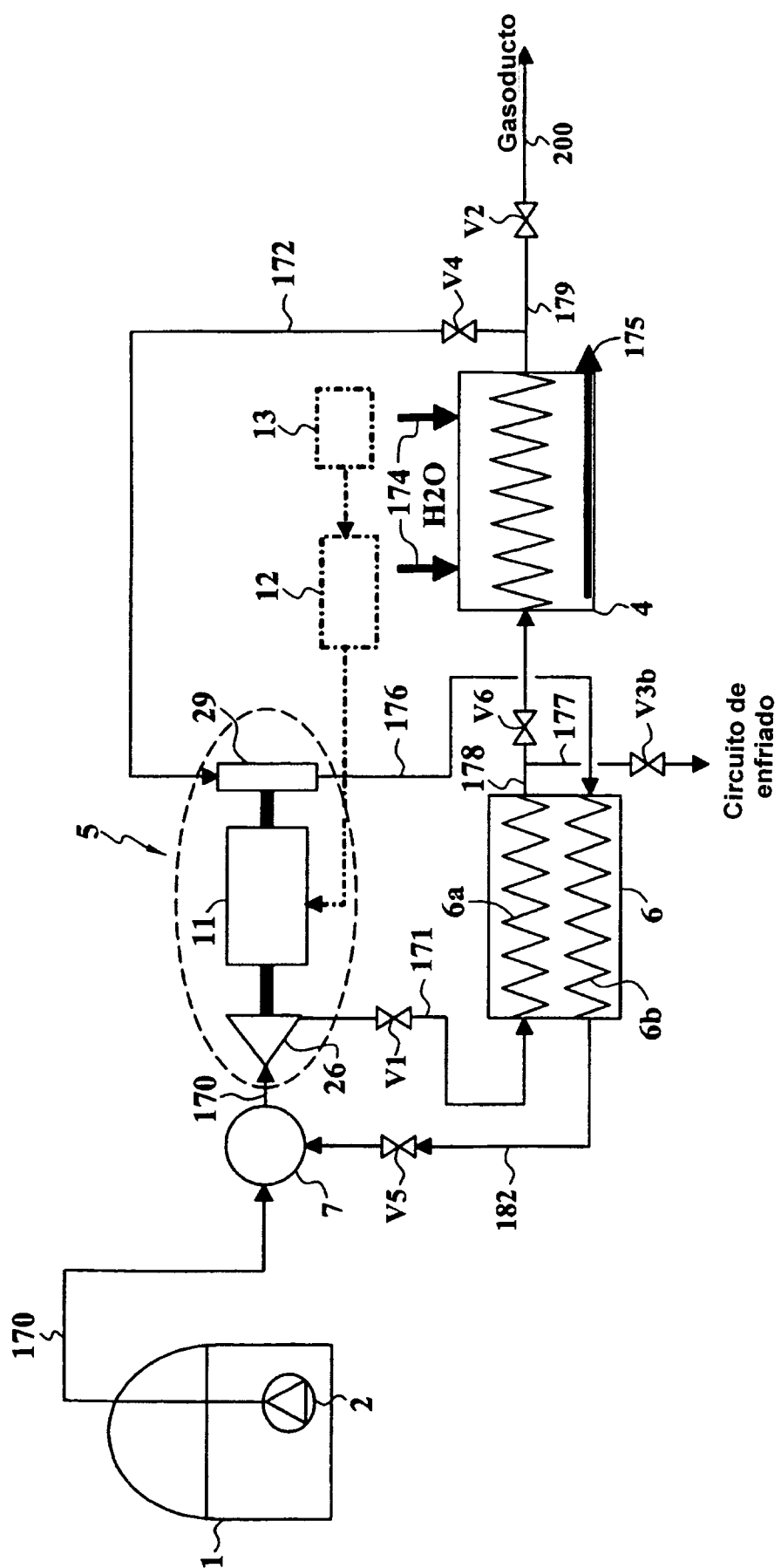


FIG.2

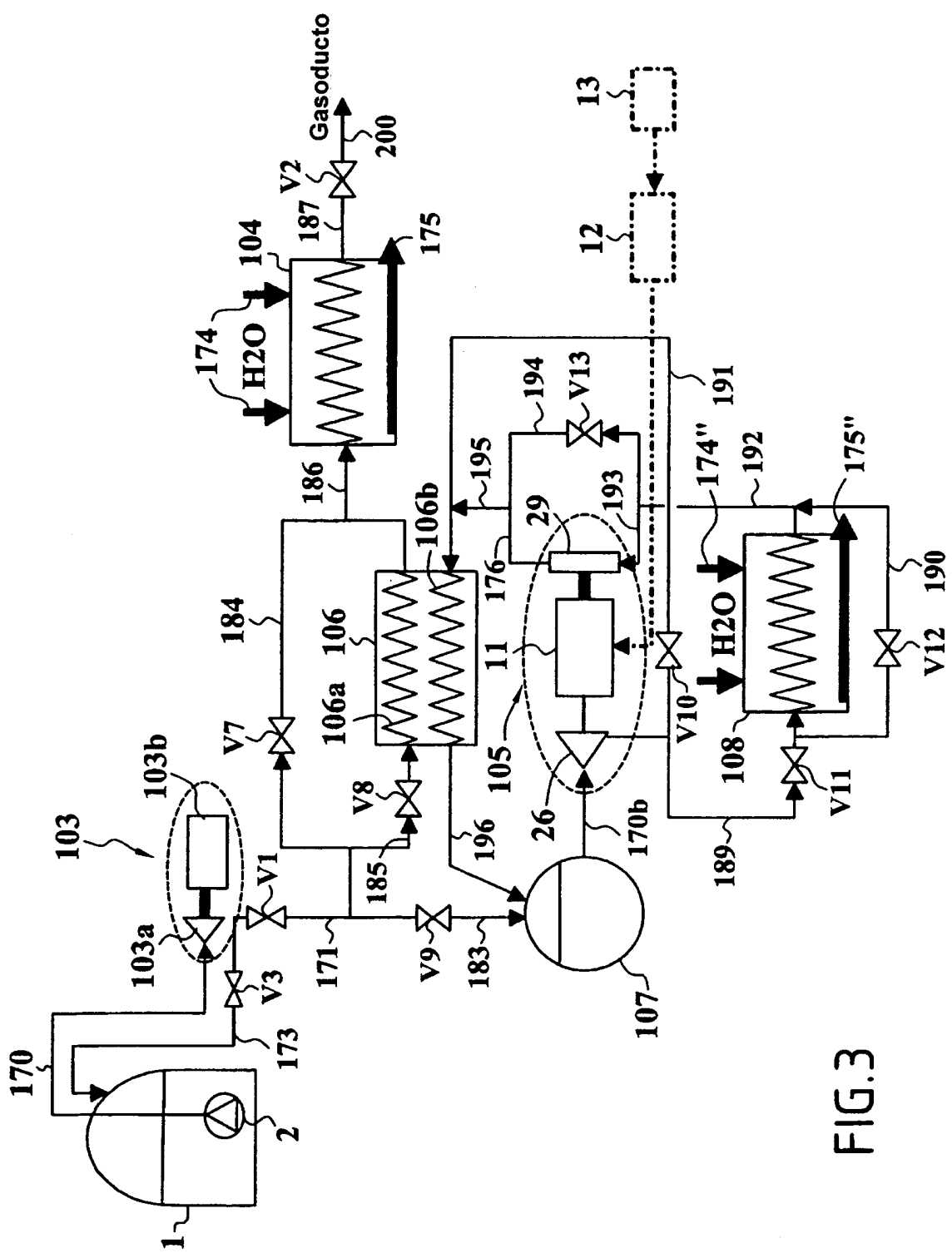


FIG.3

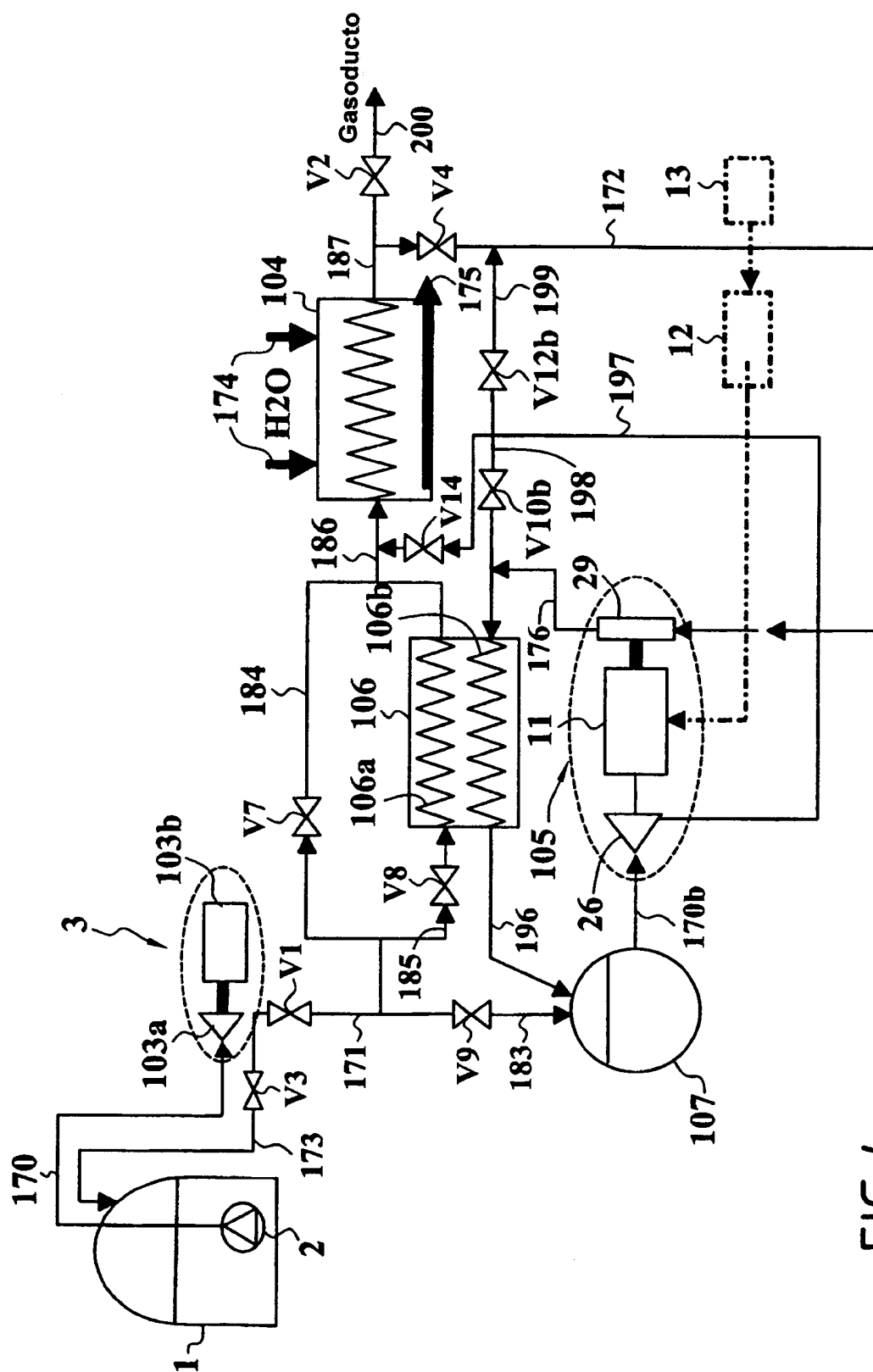


FIG.4

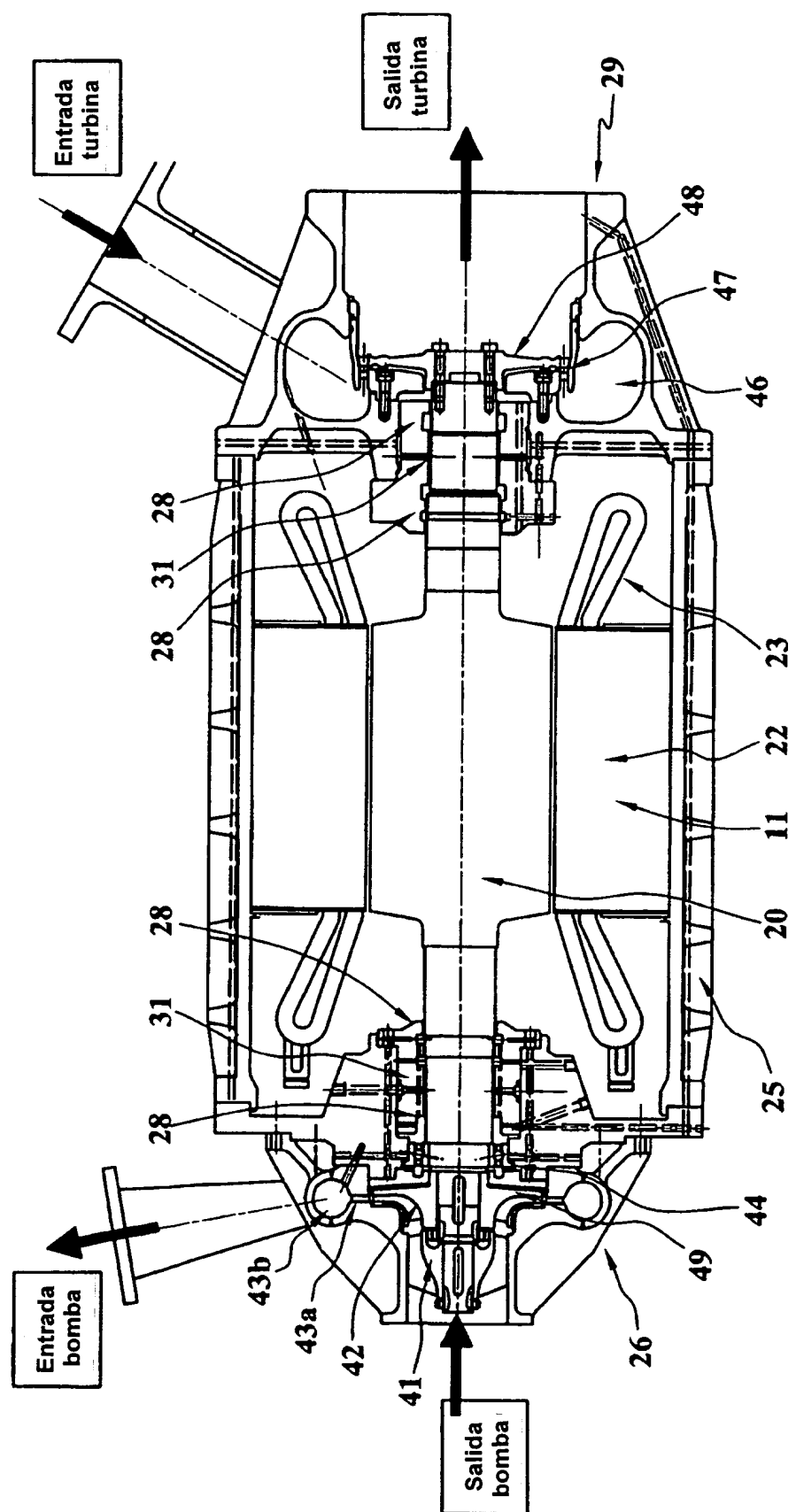


FIG.5

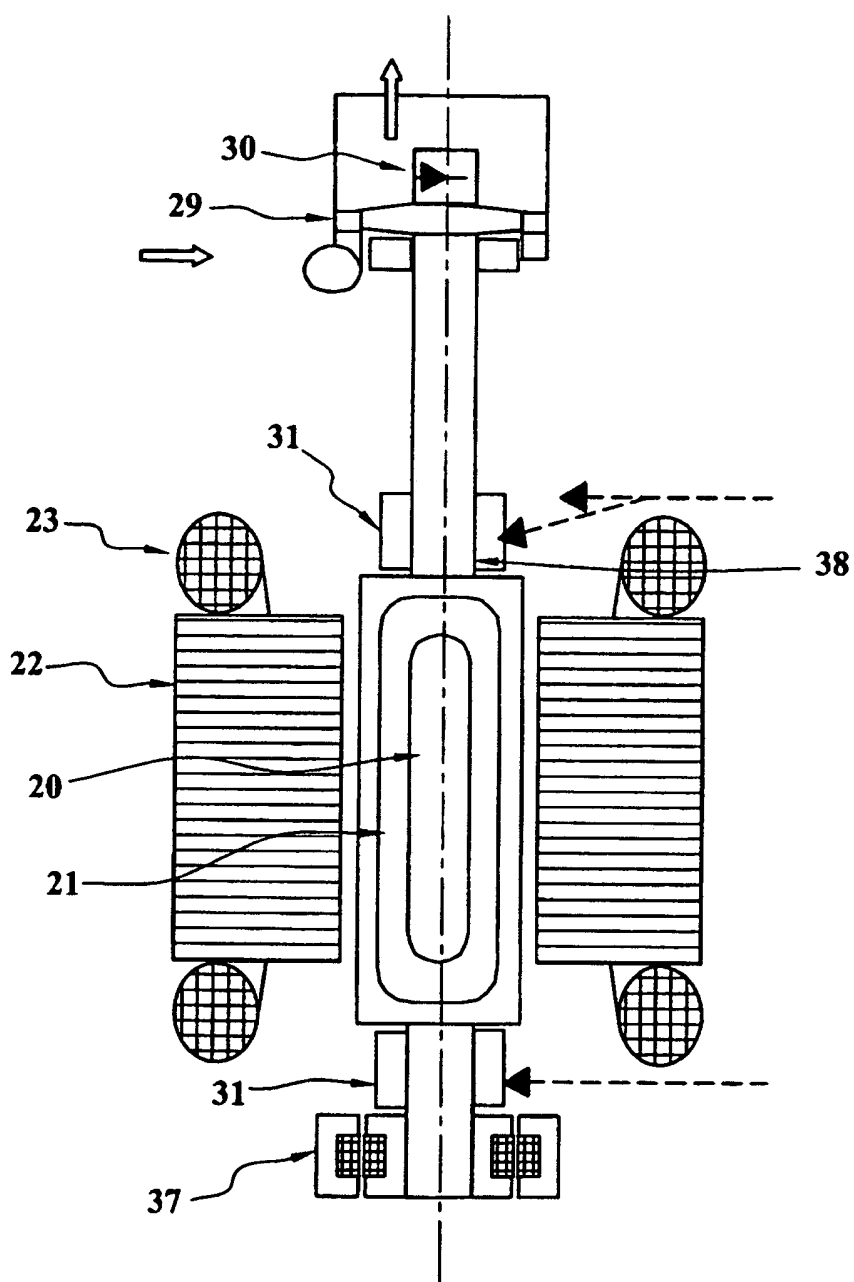


FIG.6

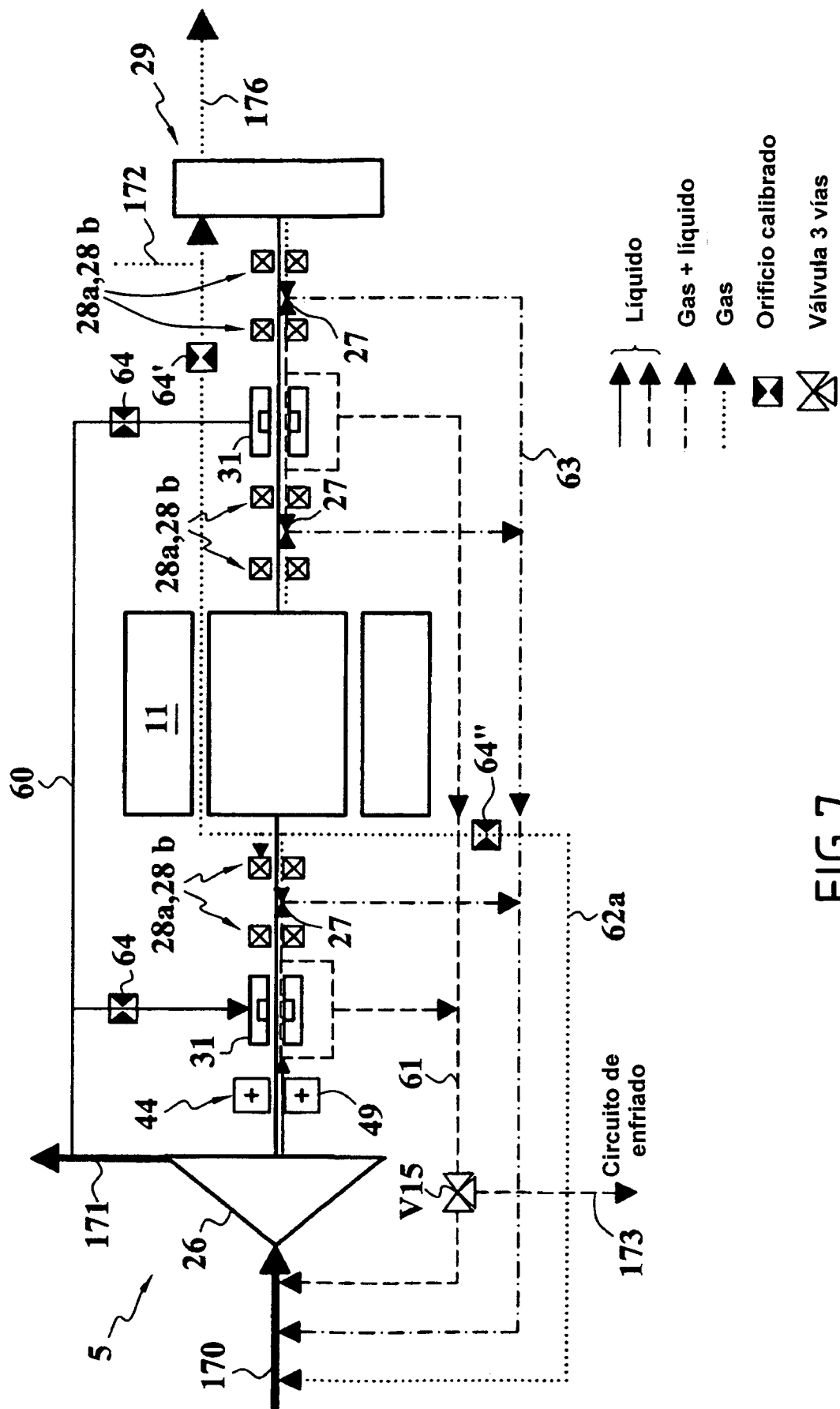


FIG.7

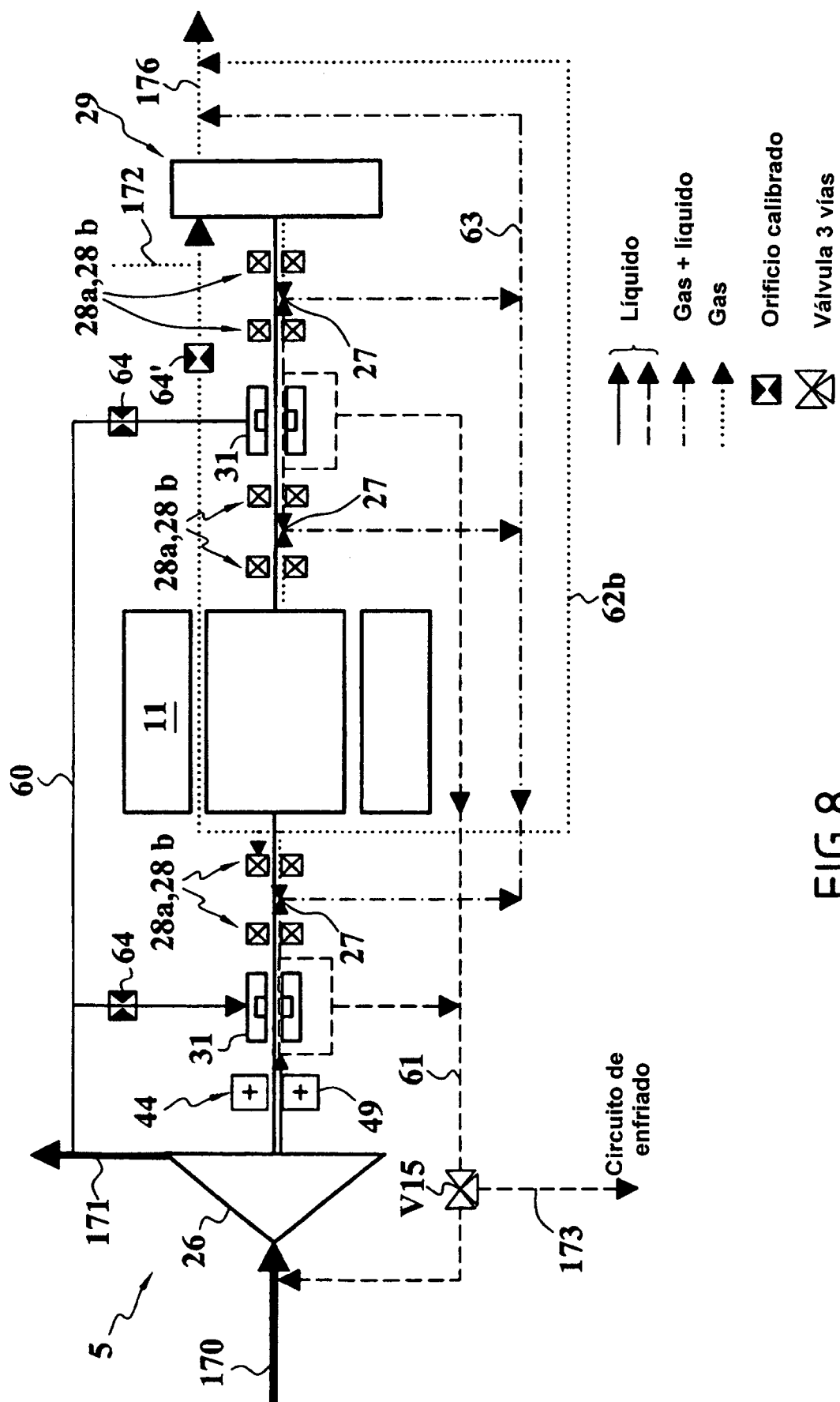


FIG.8

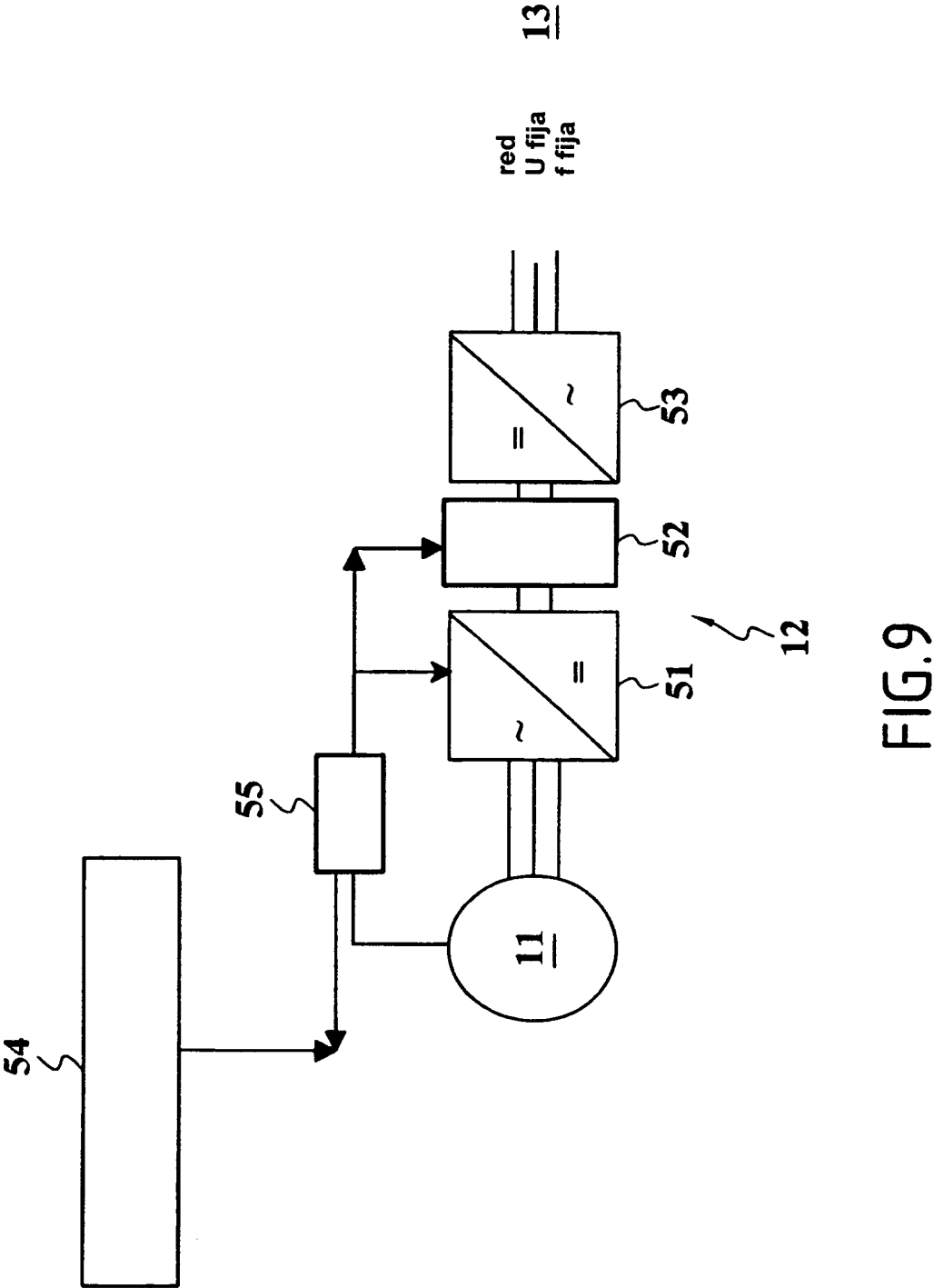


FIG.9

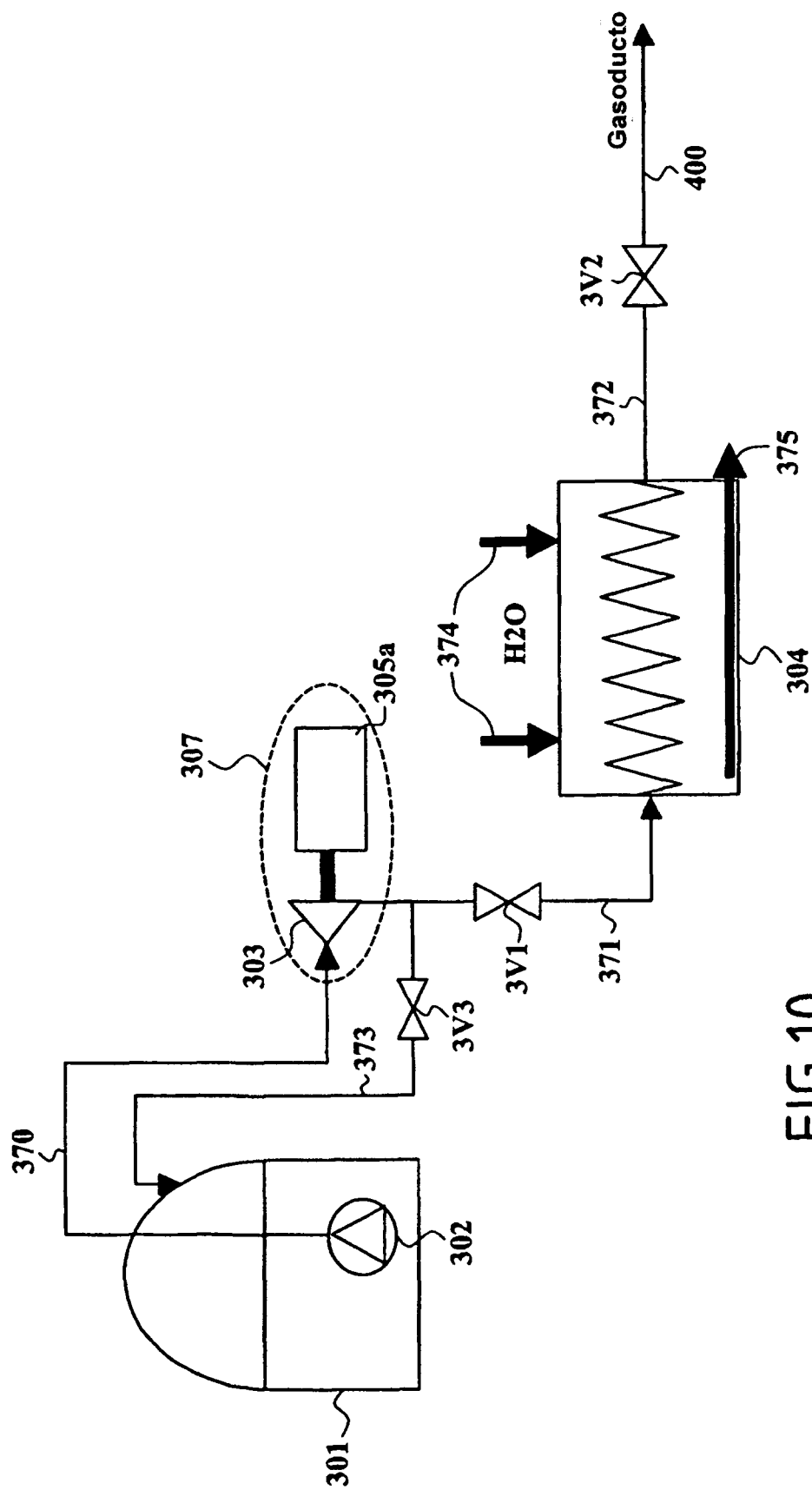


FIG.10

TÉCNICA ANTERIOR