

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 616 562**

51 Int. Cl.:

F15B 1/033	(2006.01)
B60L 11/16	(2006.01)
F04B 23/02	(2006.01)
F15B 21/08	(2006.01)
H02J 15/00	(2006.01)
H02P 27/06	(2006.01)
H02J 1/00	(2006.01)
F02C 6/16	(2006.01)
H02K 99/00	(2014.01)
G05F 3/04	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **11.04.2011 PCT/CA2011/000405**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **13.10.2011 WO11123955**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.04.2011 E 11764997 (0)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.10.2016 EP 2556263**

54 Título: **Sistema para almacenamiento y recuperación de energía**

30 Prioridad:

24.03.2011 US 467168 P
24.02.2011 US 446387 P
15.02.2011 US 443171 P
09.04.2010 US 322778 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
13.06.2017

73 Titular/es:

KENWAY, DANIEL JOHN (33.3%)
4300 Banker's Hall West, 888 3rd Street SW
Calgary, Alberta T2P 5C5, CA;
SYSCHENKO, OLEKSANDR (ALEX) (33.3%) y
BAUER, WILL (33.3%)

72 Inventor/es:

KENWAY, DANIEL JOHN;
SYSCHENKO, OLEKSANDR (ALEX) y
BAUER, WILL

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 616 562 T3

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

DESCRIPCIÓN

Sistema para almacenamiento y recuperación de energía

Referencia cruzada a solicitudes relacionadas

5 Esta solicitud reivindica prioridad bajo 35 U.S.C. 119(e) de la solicitud de patente provisional de los Estados Unidos número 61/322.778 presentada el 9 de abril de 2010, solicitud de patente provisional de los Estados Unidos número 61/446.387 presentada el 24 de febrero de 2011, solicitud de patente provisional de los Estados Unidos número 61/443.171 presentada el 15 de febrero de 2011, y solicitud de patente provisional de los Estados Unidos número 61/467.168 presentada el 24 de marzo de 2011, el contenido de cada una de las cuales se incorpora al presente documento por referencia en su totalidad.

10 Campo de la invención

Esta solicitud se refiere en general a la conversión de potencia y al almacenamiento de energía y, más particularmente, a sistemas y métodos para y relacionados con el almacenamiento y recuperación de energía en y desde gas comprimido.

Antecedentes de la invención

15 Es deseable desarrollar tanto procesos como aparatos que permitan un almacenamiento y recuperación eficientes de energía. Las mejoras en el almacenamiento y la recuperación de energía tienen aplicaciones importantes en muchos campos diferentes, tal como en sistemas en automóviles, o en el almacenamiento temporal de energía producida por fuentes intermitentes (como turbinas eólicas o paneles solares) de modo que la energía pueda acumularse, almacenarse y posteriormente liberarse cuando sea necesario (o cuando el precio es más alto como reflejo de esa necesidad).

20 Muchos tipos diferentes de sistemas de almacenamiento de energía son ya bien conocidos. El más común de éstos son baterías eléctricas recargables incluyendo ejemplos comunes sencillos como baterías de plomo-ácido en automóviles y extendiéndose a innovaciones más recientes en las pilas basadas en iones de litio y otras. Las pilas eléctricas recargables están entre los sistemas de almacenamiento/recuperación de energía comunes más ampliamente usados. En otras escalas y marcos temporales se pueden utilizar volantes para mantener constante la velocidad de rotación de los generadores o árboles, el agua puede ser bombeada hacia arriba para proporcionar sistemas de almacenamiento y recuperación de energía a gran escala cuando se usan junto con presas hidroeléctricas y existen al menos dos casos de almacenamiento de energía de aire comprimido (CAES) donde se utilizan parques eólicos (u otras fuentes intermitentes) para generar electricidad que se utiliza para alimentar compresores que bombean aire comprimido hacia cavernas subterráneas donde la energía potencial dentro del aire comprimido permanece almacenada. La energía almacenada se puede entonces utilizar para proporcionar la mayor parte de la impulsión a turbinas de la expansión de gas (como la General Electric LM2500), pero debido a la termodinámica del gas expandiéndose desde 1000 psi a 15 psi (1 atmósfera) se producen grandes pérdidas de temperatura de dentro del gas expandido y para mantener un sistema operativo el gas natural debe quemarse en las turbinas de gas para proporcionar calor adecuado para permitir temperaturas de funcionamiento "razonables".

35 Se conocen problemas con sistemas CAES conocidos y estos se refieren a dos áreas específicas. En primer lugar, los sistemas conocidos no son realmente "renovables" ya que dependen de la quema de gas natural (o algún otro combustible) para proporcionar calor con el fin de equilibrar la termodinámica del sistema. En segundo lugar, aquellos son relativamente ineficientes con una eficiencia total de entre un 30 y un 40 por ciento (donde la eficiencia se define como la cantidad de energía consumida dividida por la cantidad de energía producida).

40 Rufer y otros el documento WO 2008-139267 han identificado las eficiencias básicas últimas posibles mediante el uso de compresión de pistón y expansión de gas y, en particular, mediante el uso de pistones líquidos para conseguir esta compresión/expansión. Rufer y otros enseñan el uso de un dispositivo de lanzadera para separar fluido de bomba de motor hidráulico de los fluidos de trabajo del recipiente de almacenamiento, y sobre las densidades de energía y las eficiencias que son alcanzables con tal aparato. Rufer y otros enseñan además que el intercambio de calor dentro de la parte de "pistón líquido" del aparato mejorará las posibles densidades de energía. Si uno elige una cualquiera de dos condiciones límite para el sistema físico responsable de la compresión/expansión de gas, ya sea adiabática o isotérmica, entonces se sigue que el proceso mismo (no realizable en un aparato del mundo real) podría ser eficiente en un 100 por cien. Sin embargo, Rufer y otros enseñan que un proceso que es casi isotérmico conseguirá densidades de almacenamiento de energía mucho mejores por unidad de volumen de gas comprimido.

En la tesis doctoral de Sylvain LEMOFOUET-GATSI, titulada "Investigación y optimización de sistemas híbridos de almacenamiento de electricidad basados en aire comprimido y supercondensadores" se proporcionan más detalles. (Tesis N 3628 (2006), Instituto Federal Suizo de Tecnología, Lausanne (EPFL Lausanne – Suiza).

55 Van de Ven y Li (Applied Energy 86, 10) muestra las altas eficiencias (mayores del 83 por ciento) obtenibles con compresores de pistón líquido

Kenway y otros en la publicación de solicitud PCT WO 2009-076757 enseñan que la termodinámica puede gestionarse mejor limitando las relaciones de compresión de gas a aproximadamente 3,2:1. El aparato revelado hace uso de componentes comunes disponibles comercialmente para lograr la implementación de una compresión hidráulico-neumática.

5 Adler y Siebert en la publicación de solicitud PCT WO 2006-034748 enseñan además el diseño realizable práctico de un dispositivo para comprimir un medio gaseoso, particularmente hidrógeno. Se enseña que mediante el uso de un líquido apropiado (un líquido iónico), es posible conseguir una compresión muy alta (y relaciones de compresión) dado que las ventajas completas de los pistones líquidos pueden explotarse sin temor a la cavitación de la(s) bomba(s)/motor(es).

10 La cavitación (o burbujeo) es la aparición altamente destructiva de burbujas formadas por gases arrastrados y usualmente nucleadas alrededor de pequeñas impurezas en el fluido hidráulico. Si la expansión del gas es de, por ejemplo, 1000 veces, entonces una burbuja que fue arrastrada a una escala de 10 micras se expande hasta 10 mm con la fuerza destructiva de una pequeña explosión.

15 Adler y Siebert y Van Ven y Li enseñan además que los pistones líquidos se acomodan fácilmente a los intercambiadores de calor en la cámara de compresión (o cilindro) de manera que se consigue mucho más fácilmente el mantenimiento de unas condiciones casi isotérmicas que con los compresores o expansores convencionales.

20 La patente norteamericana número 3.648.458 revela un sistema que convierte calor en movimiento mecánico mediante la derivación de vapor calentado hacia atrás y hacia delante entre depósitos a través de un motor fluido, pero el sistema no está configurado para almacenar y liberar subsiguientemente energía.

La patente norteamericana número 3.901.033 revela un sistema de accionamiento hidrostático generalmente del tipo en el que el vapor se dirige alternadamente hacia el interior de dos tanques de reserva, pero el sistema no está configurado para almacenar y liberar subsiguientemente energía.

25 Las siguientes referencias son también útiles para comprender el estado de la técnica: patente norteamericana número 3.947.736 (Byers y otros); patente norteamericana número 4.286.203 (Ehret); patente norteamericana número 3.971.972 (Stitch); patente norteamericana número 4.128.793 (Stitch); patente norteamericana número 4.618.810 (Hagerman y otros); patente norteamericana número 4.364.073 (Becke y otros); Bose, Bimal K. (1980). Sistemas de accionamiento de corriente alterna de velocidad ajustable. Nueva York: IEEE Press. ISBN 0-87942-146-0; Heinlein, R. (1982). Viernes. Nueva York, Holt Reinhart y Winston-Shipstone.

30 **Sumario de la invención**

Según un aspecto, se proporciona un sistema para almacenar y liberar energía, teniendo el sistema un estado de almacenamiento y un estado de liberación y comprendiendo: un subsistema de generador/motor; una bomba hidráulica configurada para bombear fluido hidráulico entre las lumbreras primera y segunda de bomba en respuesta a una fuerza aplicada a la bomba hidráulica por el subsistema de generador/motor durante el estado de almacenamiento y configurada también para impartir fuerza al subsistema de generador/motor en respuesta a un fluido hidráulico que se fuerza a fluir a través de la bomba hidráulica durante el estado de liberación entre las lumbreras primera y segunda de bomba; un primer recipiente de compresión/expansión para intercambiar fluido hidráulico con la bomba hidráulica a través de la primera lumbrera de bomba; un segundo recipiente de compresión/expansión para intercambiar fluido hidráulico con la bomba hidráulica a través de la segunda lumbrera de bomba; un subsistema de almacenamiento de gas que comprende al menos una pluralidad de válvulas de gas y configurado para recibir y almacenar gas forzado a través del fluido hidráulico desde los recipientes primero y segundo de compresión/expansión de gas durante el estado de almacenamiento, estando configurado el subsistema de generador/motor para liberar gas durante el estado de liberación para impartir así fuerza al subsistema de generador/motor a través del fluido hidráulico; un intercambiador de calor interno dentro de cada uno de los recipientes primero y segundo de compresión/expansión para intercambiar calor entre el fluido hidráulico y el gas presente en el mismo, teniendo cada intercambiador de calor interno una masa térmica muy grande con respecto a la masa de gas dentro de los recipientes primero y segundo de expansión; y un subsistema de control configurado para controlar al menos la bomba hidráulica y las válvulas de gas para conmutar de este modo entre el estado de almacenamiento y el estado de liberación. Durante el estado de almacenamiento, en respuesta fluido hidráulico que es bombeado por la bomba hidráulica entre las lumbreras primera y segunda de bomba, se hace que el gas sea comprimido en el subsistema de almacenamiento de gas para almacenar así energía. Durante el estado de liberación, en respuesta a la presión procedente de la liberación de gas comprimido desde el subsistema de almacenamiento de gas, el fluido hidráulico es obligado a fluir entre las lumbreras primera y segunda de bomba para liberar así energía.

55 En la presente memoria se describen otros aspectos y realizaciones.

Breve descripción de los dibujos

A continuación se describirán más detalladamente realizaciones con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

ES 2 616 562 T3

- La figura 1 es un diagrama esquemático de un sistema para almacenar y recuperar energía usando gas comprimido, según una realización;
- La figura 2 es un diagrama esquemático de conexiones de un subsistema de control con diversos componentes del sistema de la figura 1;
- 5 Las figuras 3A y 3B son diagramas de un recipiente de compresión/expansión para el sistema de la figura 1 sin un intercambiador de calor interno y unos niveles respectivos de fluido hidráulico diferentes dentro del mismo;
- Las figuras 3C y 3D son diagramas de un recipiente de compresión/expansión para el sistema de la figura 1 con un intercambiador de calor interno y unos niveles respectivos de fluido hidráulico diferentes;
- 10 La figura 4 es un diagrama esquemático que muestra componentes del sistema de la figura 1 durante la compresión de gas para almacenar energía en la que un recipiente de compresión/expansión tiene una cantidad máxima de fluido hidráulico en su interior y otro recipiente de compresión/expansión tiene una cantidad mínima de fluido hidráulico en su interior;
- La figura 5 es un diagrama esquemático que muestra componentes del sistema de la figura 1 durante la compresión de gas para almacenar energía en la que ambos recipientes de compresión/expansión tienen más de la cantidad mínima y menos de la cantidad máxima de fluido hidráulico en su interior;
- 15 La figura 6 es un diagrama esquemático que muestra componentes del sistema de la figura 1 durante la expansión del gas para liberar energía en la que ambos recipientes de compresión/expansión tienen más de la cantidad mínima y menos de la cantidad máxima de fluido hidráulico en su interior;
- La figura 7 es un diagrama esquemático de una realización alternativa de un subsistema de almacenamiento de gas;
- 20 La figura 8 es una realización alternativa de un sistema para almacenar y recuperar energía usando gas comprimido;
- La figura 9 es un gráfico que muestra la variación de la salida/entrada de potencia de un generador/motor a lo largo del tiempo;
- La figura 10 es un gráfico que muestra la variación de la velocidad angular de rotación y la variación de la salida/entrada de potencia del generador/motor a lo largo del tiempo;
- 25 La figura 11 es un gráfico que muestra la variación de la corriente de excitador del generador/motor con la variación de la velocidad angular a lo largo del tiempo para alisar las variaciones de la salida/entrada de potencia;
- La figura 12 es un gráfico que muestra la variación resultante de la salida/entrada de potencia del generador/motor a lo largo del tiempo como resultado de la variación de la corriente de excitador como se muestra en la figura 11;
- La figura 13 muestra el volumen de bomba hidráulica y variaciones de dirección de flujo con el tiempo;
- 30 La figura 14 es un diagrama de circuito esquemático de un circuito para acondicionar potencia trifásica que se aplica a (liberada a través de) un generador/motor durante el almacenamiento (recuperación) de energía;
- La figura 15 muestra la forma de onda de la tensión de salida como resultado de la modulación de ancho de impulso filtrada;
- 35 La figura 16 muestra un recipiente de compresión/expansión en cooperación con un cilindro de aislamiento para una configuración tamponada de dos líquidos;
- La figura 17 muestra un recipiente de compresión/expansión con dos capas de líquido en el mismo para una configuración sin tampón de dos líquidos;
- La figura 18 muestra dos recipientes de compresión/expansión para una realización alternativa de una configuración tamponada de dos líquidos con un pistón macizo;
- 40 La figura 19 es un diagrama esquemático de una fuente de alimentación ininterrumpible;
- La figura 20 es un diagrama esquemático de una etapa de rectificación para la fuente de alimentación ininterrumpible de la figura 19;
- La figura 21 es un diagrama esquemático de una etapa de rectificación alternativa para la fuente de alimentación ininterrumpible de la figura 19;
- 45 La figura 22 es un diagrama esquemático de etapas de rectificación, alisamiento e inversión de tensión de la fuente de alimentación ininterrumpible de la figura 19;

La figura 23 es un diagrama esquemático de la etapa de salida de la fuente de alimentación ininterrumpible de la figura 19;

La figura 24 es un diagrama esquemático de uno de los conjuntos de transistores bipolares de puerta aislada de la etapa de salida de la figura 23;

- 5 La figura 25 es un diagrama esquemático que muestra la interconexión de múltiples fuentes de energía secundarias, junto con una fuente de potencia primaria, a un bus de potencia, según una realización;

La figura 26 es un diagrama esquemático que muestra la interconexión de múltiples fuentes de alimentación trifásicas secundarias, junto con una fuente de alimentación trifásica primaria, a un bus de potencia, según una realización;

- 10 La figura 27 es un diagrama esquemático que muestra la interconexión de múltiples cargas trifásicas a un bus de potencia;

La figura 28 es un diagrama esquemático que muestra un mecanismo de conmutación de tensión;

La figura 29 es un gráfico que muestra variaciones de tensión con fuentes de potencia primaria y secundaria; y

- 15 La figura 30 es un diagrama esquemático que muestra un control centralizado de múltiples fuentes de potencia y su entrega de potencia a múltiples cargas.

Descripción detallada de realizaciones

Volviendo ahora a la figura 1, se muestra un sistema para almacenar y recuperar (es decir, liberar) energía según una realización de la invención y se identifica generalmente con el número de referencia 5. El sistema 5 está controlado por un subsistema 7 de control que, en esta realización, es un controlador lógico programable (PLC), pero que podría implementarse alternativamente por otro dispositivo tal como un ordenador personal o similar con hardware de interfaz apropiado. El sistema 5 comprende también un subsistema de generador/motor que, en esta realización, comprende un solo generador/motor 10 acoplado mecánicamente a una bomba hidráulica 12 con un acoplador de árbol para impartir fuerza de rotación a la bomba hidráulica 12 con el fin de bombear así fluido hidráulico 13 entre una primera lumbrera 14 y una segunda lumbrera 16 de la bomba hidráulica 12 durante el almacenamiento de energía. Además, el generador/motor 10 y la bomba hidráulica 12 están acoplados mecánicamente de tal manera que la bomba hidráulica 12 puede impartir fuerza de rotación al generador/motor 10 en respuesta al fluido hidráulico 13 que es bombeado entre las lumbreras primera y segunda 14, 16 durante la liberación de energía, según se describirá.

En esta realización, el generador/motor 10 es un generador/motor trifásico de CA (corriente alterna) con devanados de excitador que funcionan como el impulsor primario de la bomba hidráulica 12 tras la aplicación de potencia eléctrica durante el almacenamiento de energía y que funciona como un generador eléctrico al rotar la bomba hidráulica 12 durante la liberación de energía.

En esta realización, la bomba hidráulica 12 tiene un desplazamiento variable y una configuración descentrada y, por lo tanto, tiene un árbol que gira en una sola dirección (por ejemplo, en el sentido de las agujas del reloj), si fluye fluido hidráulico 13 desde la primera lumbrera 14 hacia la segunda lumbrera 16, o desde la segunda lumbrera 16 hacia la primera lumbrera 14. Esto es, a pesar de la dirección de flujo del fluido hidráulico 13, durante todo el almacenamiento y liberación, la bomba hidráulica 12 rota en una sola dirección. La bomba hidráulica 12 comprende filtros, válvulas y circuitería de presión de carga para su funcionamiento. En esta realización, la(s) válvula(s) (no mostrada(s) para asegurar que la figura 1 sea fácil de entender) de la bomba hidráulica 12 es(son) controlada(s) electrónicamente por medio de señales proporcionadas por el subsistema 7 de control.

Un volante 18 está acoplado mecánicamente con el acoplador de árbol para mantener la rotación durante el flujo de fluido a través de la bomba hidráulica 12, los cambios de presión, los cambios en la dirección de flujo entre las lumbreras 14 y 16 del fluido hidráulico 13 y los cambios de modo (es decir, de almacenamiento de energía a liberación de energía y viceversa, como se describirá). El volante 18 proporciona un momento angular adicional que puede convertirse en energía eléctrica por el generador/motor mediante la pérdida de rpm en el corto plazo, que en esta realización está de entre aproximadamente 1 y 10 segundos.

Un módulo 19 de acondicionamiento de potencia está acoplado entre el generador/motor 10 y la red eléctrica (no mostrada) para controlar el generador/motor 10 y para acondicionar la potencia del generador/motor 10 para su uso en el suministro de potencia a la red eléctrica. En esta realización, el módulo 19 de acondicionamiento de potencia es un inversor precedido por diodos de rectificación y un condensador de corriente continua rígido. El acondicionamiento de potencia en la dirección opuesta entre la red y el aspecto del motor del subsistema de generador/motor es, por supuesto, un circuito similar en sentido inverso: una excitación de frecuencia variable.

La bomba hidráulica 12 está en comunicación de fluido con un volumen interior de un primer recipiente de compresión/expansión 20 a través de una tubería 40 de fluido que se extiende desde la primera lumbrera 14, a

ES 2 616 562 T3

través de la pared exterior del primer recipiente de compresión/expansión 20, y termina cerca de la parte inferior de su volumen interior. Se permite que el fluido hidráulico 13 fluya entre la bomba hidráulica 12 y el volumen interior del primer recipiente de compresión/expansión 20 a través de la tubería 40 de fluido.

5 La bomba hidráulica 12 está también en comunicación de fluido con un volumen interior de un segundo recipiente de compresión/expansión 30 a través de una tubería 50 de fluido que se extiende desde la segunda lumbrera 14, a través de la pared exterior del segundo recipiente de compresión/expansión 30, y termina cerca de la parte inferior de su volumen interior. Se permite fluir al fluido hidráulico 13 entre la bomba hidráulica 12 y el volumen interior del segundo recipiente de compresión/expansión 30 a través de la tubería 50 de fluido.

10 Las tuberías 40 y 50 de fluido están construidas de cualquier material o materiales que sean capaces de soportar presiones impartidas al fluido hidráulico 13 en el sistema 5, tal como acero.

En esta realización, el fluido hidráulico 13 es KRYTOX, que es un líquido no reactivo, no inflamable adecuado para su uso con compresión de gases que incluyen oxígeno, tales como aire. Pueden emplearse otros fluidos hidráulicos adecuados.

15 El volumen interior del primer recipiente de compresión/expansión 20 también está en comunicación de fluido con un subsistema 100 de almacenamiento de gas por medio de una tubería 60 de gas que se extiende desde cerca de la parte superior del volumen interior del primer recipiente de compresión/expansión 20, a través de su pared exterior, hasta el subsistema 100 de almacenamiento de gas.

20 El volumen interior del segundo recipiente de compresión/expansión 30 también está en comunicación de fluido con el subsistema 100 de almacenamiento de gas a través de una tubería 70 de gas que se extiende desde cerca de la parte superior del volumen interior del segundo recipiente de compresión/expansión 30, a través de su pared exterior, hasta el subsistema 100 de almacenamiento de gas.

Las tuberías 60 y 70 de gas están construidas de cualquier material o materiales que sean capaces de soportar presiones impartidas al gas en el sistema 5, tales como acero.

25 Al menos un transductor 24 de nivel de líquido está dispuesto dentro del volumen interior del primer recipiente de compresión/expansión 20 y genera señales de nivel de líquido indicativas del nivel de fluido hidráulico 13 dentro del primer recipiente de compresión/expansión 20. De manera similar, al menos un transductor 34 de nivel de líquido está dispuesto dentro del volumen interior del segundo recipiente de compresión/expansión 30 y genera señales indicativas del nivel de fluido hidráulico 13 dentro del segundo recipiente de compresión/expansión 30. El subsistema 7 de control recibe las señales de nivel de líquido procedentes de los transductores 24, 34 de nivel de líquido para controlar, en consecuencia, el sistema 5. En general, el subsistema 7 de control garantiza que el fluido hidráulico 13 no entre en las tuberías 60, 70 de gas. Los transductores 24, 34 de nivel de líquido generan unas señales respectivas que pueden ser recibidas por el subsistema 7 de control fuera de los recipientes primero y segundo de expansión/compresión 20, 30. Se entenderá que tales señales pueden proporcionarse al subsistema 7 de control por cable, o tanto por cables como inalámbricamente.

35 Un primer intercambiador de calor interno 22 está dispuesto también dentro del volumen interior del primer recipiente de compresión/expansión 20, y un segundo intercambiador de calor interno 32 está dispuesto también dentro del volumen interior del segundo recipiente de compresión/expansión 30. Cada uno de los intercambiadores de calor internos 22, 32 funcionan para intercambiar calor entre cualquier fluido hidráulico 13 dentro de los recipientes de compresión/expansión 20, 30 y cualquier gas de dentro que esté siendo comprimido/expandido dentro de los respectivos recipientes de compresión/expansión 20, 30. El intercambiador de calor existe en todas partes dentro del volumen de los módulos de compresión/expansión y es térmicamente masivo (densidad física de aproximadamente 1 g/cc) y poroso (desplazando menos del 25% del volumen disponible). Debido a que el intercambiador de calor interno es térmicamente masivo con respecto al gas, y en todas partes, es difícil que el gas cambie mucho de temperatura y el proceso permanece casi isotérmico. A medida que el líquido del pistón líquido entra y sale de este intercambiador de calor interno masivo poroso, éste captura el calor atrapado dentro del intercambiador de calor, de modo que el calor sea transferido al fluido hidráulico líquido.

40 Un primer intercambiador de calor externo 42 asociado con la tubería 40 de fluido funciona para intercambiar calor entre el fluido hidráulico 13 dentro de la tubería 40 de fluido y la atmósfera ambiente. De manera similar, un segundo intercambiador de calor externo 52 asociado con la tubería 42 de fluido funciona para intercambiar calor entre el fluido hidráulico 13 dentro de la tubería 42 de fluido y la atmósfera ambiente.

45 El primer intercambiador de calor interno 22, el segundo intercambiador de calor interno 32, el primer intercambiador de calor externo 42 y el segundo intercambiador de calor externo 52 cooperan generalmente para proporcionar intercambio de calor entre la atmósfera ambiente fuera de los recipientes de compresión/expansión primero y segundo 20, 30 y el gas dentro de los recipientes primero y segundo de compresión/expansión 20, 30. Tal intercambio de calor es importante para mantener la eficacia y la eficiencia del sistema permitiendo que existan condiciones casi isotérmicas en el sistema 5. Como resultado, el gas bajo expansión/compresión e incluso el fluido hidráulico 13 se mantienen generalmente a una temperatura sustancialmente constante.

La solicitud de patente de los Estados Unidos 2007/0258828 (Adler y otros) revela que con un compresor de pistón líquido, es posible montar un intercambiador de calor dentro de la cámara de compresión de un compresor de gas de pistón líquido. También se menciona que puede ser posible el intercambio de calor pasivo llenando parcialmente el volumen con esferas o placas.

- 5 La solicitud PCT 2010/135658 A2 (Aborn e Ingersoll) revela que se pueden usar estructuras delgadas con forma de copa dentro del aparato para atrapar burbujas de gas y mejorar, por lo tanto, el intercambio de calor.

La patente de Estados Unidos número 7.802.426 (Bollinger) revela que se puede conseguir una compresión casi isotérmica de gas de alta eficiencia haciendo circular externamente una corriente de ese gas a través de un intercambiador de calor externo. Se enseña que si las tasas de compresión y el flujo de intercambio de calor se eligen apropiadamente y la tasa de compresión es suficientemente lenta, entonces se pueden conseguir resultados casi isotérmicos.

- 10

La publicación de solicitud PCT WO 2008/139267 (Lemofouet y otros) revela que puede conseguirse el intercambio de calor dentro de la cámara de compresión convirtiendo el líquido en una ducha de gotitas mientras aquel llena la cámara de compresión.

- 15 La publicación de solicitud PCT WO 2009/034421 (Lemofouet y otros) enseña que el intercambiador de calor puede ser mucho más efectivo tanto en compresión como en expansión si se implementa como una estructura de muchos tubos pequeños (algo así como un intercambiador de calor convencional) con un flujo independiente para la compresión de gas del pistón líquido, y el otro para hacer fluir simplemente fluido de intercambio de calor más allá del proceso de compresión o expansión encapsulado.

- 20 En esta realización de la invención descrita en el presente documento, los intercambiadores de calor internos 22 y 32 son idénticos entre ellos y están hechos de espuma de metal. Es preferible que los intercambiadores de calor internos 22, 32 se distribuyan cada uno a lo largo de sustancialmente todo el volumen interior de los respectivos recipientes 20, 30 de modo que el acceso al intercambio de calor esté disponible cerca (preferiblemente, cerca de 1 milímetro o menos) de unas moléculas sustancialmente a lo largo de todo el volumen interior. Por lo tanto, se proporciona una gran masa térmica disponible para la transferencia de calor. De esta manera, se puede mantener mejor una operación casi isotérmica del sistema 5. Preferiblemente, para los intercambiadores de calor internos 22, 32 de espuma metálica sustancialmente todos los poros de la espuma metálica tienen un tamaño que es inferior a aproximadamente 5 milímetros cúbicos. Sin embargo, se pueden disponer estructuras alternativas que no son tan eficientes en la transferencia de calor entre el gas y el fluido hidráulico 13 (u otro material de pistón líquido en un sistema de dos líquidos como se describirá) y que, de este modo, proporcionan una transferencia de calor menos rápida. Debe tenerse cuidado con las configuraciones de los intercambiadores de calor internos 22 y 32, porque en sistemas prácticos el tiempo requerido para comprimir o expandir el gas es inversamente proporcional a los niveles de potencia alcanzables con tales sistemas, y de manera similar es inversamente proporcional al "valor" del compresor, que sin tal cuidado tendría una entrega de aire libre (FAD) o un nivel de potencia efectivo menores.

- 35 Alternativamente, los intercambiadores de calor internos 22, 32 pueden estar situados solamente cerca de la parte superior del volumen interior de su respectivo recipiente de compresión/expansión 20, 30, donde el acceso de las moléculas al intercambio de calor es más crítico para proporcionar una operación casi isotérmica del sistema 5 debido a la rapidez de los cambios de temperatura en el gas que está siendo comprimido o expandido.

- 40 Con el uso de una malla o espuma metálica, el porcentaje de volumen de compresión llenado por los intercambiadores de calor internos 22, 32, a pesar de la ubicuidad de los intercambiadores de calor 22, 32 dentro de los volúmenes internos, puede mantenerse en un 25%, e incluso hasta el 3%, del volumen de compresión.

- 45 Aunque se ha hecho referencia a la espuma o malla metálica en las realizaciones descritas anteriormente para los intercambiadores de calor internos 22, 32, se comprenderá que son posibles alternativas. Por ejemplo, el intercambio de calor interno puede proporcionarse de manera similar por un tapón de metal sinterizado altamente poroso y/o por una bobina metálica enrollada apretadamente, y/o por un subsistema de tubos o dedos formados de material conductor. Los materiales conductores elegidos, tales como metales, pueden ser cobre y/o aluminio. Se pueden usar otros materiales para los intercambiadores de calor internos 22, 32, según se desee. Además, los intercambiadores de calor internos 22, 32 pueden conectarse a las tuberías 40, 50 de fluido o integrarse de algún modo con las tuberías 40, 50 de fluido.

- 50 Las figuras 3A y 3B son diagramas de un recipiente de compresión/expansión 20 o 30 sin un intercambiador de calor interno y de unos niveles de fluido hidráulico diferentes respectivos dentro del mismo. Las figuras 3C y 3D son diagramas de un recipiente de compresión/expansión 20 o 30 con un intercambiador de calor interno con la forma de una malla de cobre en espiral enrollada apretadamente situada dentro del volumen interior y de unos niveles de fluido hidráulico diferentes respectivos.

- 55 En esta realización, el subsistema 100 de almacenamiento de gas comprende una cámara de gas de alta presión 110 y una cámara de gas de baja presión 120. La tubería 60 de gas del primer recipiente de compresión/expansión 20 proporciona comunicación de fluido con la cámara de gas de alta presión 110 para el intercambio de gas, dependiendo de si se controla una primera válvula 112 de gas de la cámara de alta presión (FHPcV) para que esté

abierta o cerrada. De forma similar, la tubería 70 de gas del segundo recipiente de compresión/expansión 30 proporciona comunicación de fluido con la cámara de gas de alta presión 110 para el intercambio de gas, dependiendo de si se controla una segunda válvula 114 de gas de cámara de alta presión (SHPcV) para que esté abierta o cerrada. Asimismo, la tubería 60 de gas del primer recipiente de compresión/expansión 20 proporciona comunicación de fluido con la cámara de gas de baja presión 120 para el intercambio de gas, dependiendo de si se controla una primera válvula 122 de gas de cámara de baja presión (FLPcV) para que esté abierta o cerrada. Además, la tubería 70 de gas del segundo recipiente de compresión/expansión 30 proporciona comunicación de fluido de con la cámara de gas de baja presión 120 para el intercambio de gas, dependiendo de si se controla una segunda válvula 124 de gas de la cámara de presión baja (FLPcV) para que esté abierta o cerrada. El control eléctrico de los estados abierto/cerrado de FHPcV 112, SHPcV 114, FLPcV 122 y SLPcV 124 y, por lo tanto, el control para el almacenamiento y liberación de gas en el subsistema 100 de almacenamiento de gas se proporciona por el subsistema 7 de control como se describirá en el presente documento.

Los transductores de presión de gas (no mostrados con la finalidad de que la figura 1 sea fácil de leer) para medir la presión de gas dentro de cada recipiente de compresión/expansión 20, 30, cada una de las cámaras de gas de alta presión y baja presión 110, 120 se dotan de y se comunican con el subsistema 7 de control para proporcionar datos de presión del gas dentro de estos componentes. Estos datos de presión son recibidos por el subsistema 7 de control y utilizados durante el control de la operación del sistema 5. Además, uno o más transductores de presión de líquido hidráulicos (no mostrados con la finalidad de garantizar que la figura 1 sea fácil de leer) para medir la presión del fluido hidráulico en el sistema 5 se dota(n) de y se comunica(n) con el subsistema 7 de control para proporcionar datos de presión del fluido hidráulico en el sistema 5.

La figura 2 es un diagrama esquemático de conexiones del subsistema 7 de control en comunicación con diversos componentes del sistema 5 tanto para recibir como para transmitir señales de control hacia y desde los transductores de presión, válvulas electrónicas, la bomba hidráulica 12 y así sucesivamente.

La operación general del sistema 5 para almacenar y liberar energía se describirá ahora con referencia a las figuras 4, 5 y 6.

La figura 5 es un diagrama esquemático de componentes del sistema 5 cuando está en un estado inicial. Como se muestra, el recipiente de compresión/expansión 20 está a un nivel máximo de fluido hidráulico 13 y el recipiente de compresión/expansión 30 está a un nivel mínimo de fluido hidráulico 13. En este estado, el subsistema 7 de control ha proporcionado señales tales que FLPcV 122 está abierto, FHPcV 112 está cerrado, SLPcV 124 está cerrado y SHPcV 114 está abierto.

El subsistema 7 de control proporciona señales de tal manera que la bomba hidráulica 12 se hace funcionar como una bomba con el flujo de fluido hidráulico 13 moviéndose desde la primera lumbrera 14 hasta la segunda lumbrera 16. En esta condición, el generador/motor 10 está accionando la bomba hidráulica 12, según se muestra en la figura 6. Cuando el generador/motor 10 hace rotar la bomba hidráulica 12, el fluido hidráulico 13 es bombeado desde la primera lumbrera 14 hasta la segunda lumbrera 16, superando una diferencia de presión Δp entre la cámara de almacenamiento de gas de alta presión 110 y la cámara de almacenamiento de gas de baja presión 120. De este modo, la energía eléctrica que acciona el generador/motor 10 se convierte en y se almacena como energía potencial en virtud de la diferencia de presión de gas entre las cámaras de almacenamiento de gas 110, 120.

En cualquier momento de este ciclo cuando el nivel del líquido en el primer recipiente de compresión/expansión 20 es menor que un nivel máximo y el nivel del líquido en el segundo recipiente de compresión/expansión 30 es mayor que un nivel mínimo, según se calibra por unos respectivos transductores de nivel de fluido, el sistema 5 puede cambiar de estado desde almacenamiento de energía a liberación de energía. Esto puede lograrse invirtiendo la dirección de flujo del fluido hidráulico 13 dentro de la bomba hidráulica 12 y permitiendo que el fluido hidráulico 13 imparta fuerza a la bomba hidráulica 12 para hacer rotar su árbol y accionar el generador/motor 10, según se muestra en la figura 5.

Debido a que la bomba hidráulica 12 tiene una configuración "descentrada", la inversión de la dirección de flujo no cambia la dirección de rotación del árbol de la bomba hidráulica 12. Como resultado, el momento angular no resulta perturbado significativamente. El tiempo de asentamiento/transición para que la bomba "descentrada" realice esta inversión podría ser del orden de 0,1 segundo y durante este tiempo de asentamiento/transición el momento angular del volante 18 mantiene la rotación a una velocidad angular casi constante.

Para un cambio de estado de almacenamiento de energía a liberación de energía, el generador/motor 10 funciona ahora como un generador y como la electricidad producida por el generador/motor 10 es utilizada por una carga eléctrica, el generador/motor 10 proporciona un contrapar que resiste la rotación de la bomba hidráulica 12 y absorbe la energía mecánica que se genera desde la bomba hidráulica 12 que, en este momento, actúa como un motor accionado por la diferencia de presión de gas.

Se apreciará que, aunque el sistema 5 es capaz de conmutar desde almacenamiento a liberación en medio de un ciclo (es decir, siendo medio "que no está en el final") como se ha descrito anteriormente, la conmutación no tiene que ocurrir en mitad de un ciclo. Cuando se conmuta desde almacenamiento de energía a recuperación de energía,

o desde recuperación a almacenamiento en general, las direcciones del flujo de fluido se invertirán (es decir, de izquierda a derecha, de derecha a izquierda o viceversa) y la bomba hidráulica 12 conmutará de bombeo a ser accionada (o de ser accionada a bombeo) durante el mismo momento de transición que el generador/motor eléctrico 10 conmuta de motor a generador (o de generador a motor).

- 5 Si el almacenamiento durante el flujo de izquierda a derecha del fluido hidráulico a través de la bomba hidráulica 12 continuara en lugar de ser interrumpido, como se describió anteriormente, para su recuperación, la "carrera" actual terminaría cuando el nivel del fluido hidráulico 13 en el primer recipiente de compresión/expansión 20 alcanzara un nivel mínimo, correspondiente al nivel del fluido hidráulico 13 en el segundo recipiente de compresión/expansión 30 que alcanza un nivel máximo, según se determina usando, en esta realización, los transductores de nivel de fluido.
10 Al final de esta carrera, el almacenamiento podría continuar tras la aparición de una transición diferente. Como respaldo de los transductores de nivel de fluido, se pueden utilizar sensores de presión y temperatura para redundancia.

- 15 Para la transición, la bomba hidráulica 12 sería controlada por el subsistema 7 de control para invertir la dirección de flujo del fluido hidráulico 13 a través de la bomba hidráulica 12. Además, como se ha descrito anteriormente, el árbol de la bomba hidráulica 12 continuaría rotando en la misma dirección debido a su configuración descentrada y durante este cambio de dirección de flujo el volante 18 alisaría el momento angular del árbol de la bomba hidráulica 12. Sin embargo, los estados de las válvulas 112, 114, 122, 124 se invertirían cuidadosamente.

- 20 Sin embargo, antes de la inversión, aquellas de las válvulas de gas 112, 114, 122, 124 que estén abiertas en el momento de la transición a la carrera de potencia subsiguiente serían cerradas por el subsistema 7 de control. Habiéndose cerrado todas estas válvulas de gas previamente abiertas, se abriría entonces la SLPcV 124. Puesto que en este punto no habría gas en el interior del segundo recipiente de compresión/expansión 30 en ese momento (debido a que el fluido hidráulico 13 estaba a un nivel máximo dentro de ese recipiente), poco o ningún gas fluiría, pero se permitiría que la presión se equilibrara entre el líquido hidráulico 13 y el gas en la cámara de almacenamiento de gas a baja presión 120.

- 25 Cuando el generador/motor 10 suministra potencia a la bomba hidráulica 12 reacomplada pero invertida, la bomba hidráulica mueve el fluido hidráulico 13 desde el segundo recipiente de compresión/expansión 30 al primer recipiente de compresión/expansión 20, comprimiendo de este modo el gas en su interior. Cuando la presión de gas en el primer recipiente de compresión/expansión 20 alcanza generalmente el equilibrio con la presión de gas en la cámara de almacenamiento de gas de alta presión 110, según se determina por el sistema 7 de control que responde a
30 señales de los transductores de presión como se ha descrito anteriormente, se abre la FHPcV 112.

- 35 Cuando el nivel del líquido hidráulico 13 vuelve a estar efectivamente en su mínimo en el segundo recipiente de compresión/expansión 30 y, en consecuencia, el nivel del líquido hidráulico 13 en el primer recipiente de compresión/expansión 20 está efectivamente lleno, entonces el ciclo se invierte de nuevo. Durante esta inversión para efectuar otra carrera de almacenamiento, se hace que la bomba hidráulica 12 sea nuevamente seleccionada por el subsistema 7 de control para cambiar la dirección de flujo del fluido hidráulico 13, de manera que el flujo procedente de la lumbrera 14 de bomba hacia la lumbrera 16 de bomba cambie a un flujo desde la lumbrera 16 de bomba a la lumbrera 14 de bomba. De nuevo, el volante 18 mantiene la rotación del generador/motor 10 y la bomba hidráulica 12. El subsistema 7 de control cierra también cada una de las FHPcV 112, la SHPcV 114, la FLPcV 122 y la SLPcV 124.

- 40 En este punto, el subsistema 7 de control abre la FLPcV 122 para poner el primer recipiente de compresión/expansión 20 en comunicación de fluido con la cámara de almacenamiento de gas de baja presión 120 y se inicia un flujo de fluido hidráulico 13 desde la lumbrera 14 de bomba a la lumbrera 16 de bomba. Cuando se ha conseguido suficiente compresión para que la presión esté casi en equilibrio entre el segundo recipiente de compresión/expansión 30 y la cámara de almacenamiento de gas de alta presión 110, la SHPcV 114 se abre para
45 poner la cámara de almacenamiento de gas de alta presión 110 en comunicación de fluido con el segundo recipiente de compresión/expansión 30.

- 50 En el caso de que se fuera a iniciar un ciclo de recuperación en este punto, entonces se abriría la FHPcV 112 para poner el primer recipiente de compresión/expansión 20 en comunicación de fluido con la cámara de almacenamiento de gas de alta presión 110, y la SLPcV 124 se abriría para poner el segundo recipiente de compresión/expansión 30 en comunicación de fluido con la cámara de almacenamiento de gas de baja presión 120.

- 55 Se pueden emplear diversas estrategias para recuperar la energía (expansión y descarga de gas presurizado), una de las cuales es dejar abierta la FHPcV 112 justo hasta que la proporción del fluido hidráulico 13 en el primer recipiente de compresión/expansión 20 iguale la relación de la presión de gas en la cámara de almacenamiento de gas de baja presión 120 con la presión de gas en la cámara de almacenamiento de gas de alta presión 110. Independientemente del momento exacto elegido para ciclar la válvula de gas de alta presión (o las válvulas de alta y baja presión) la siguiente "carrera" de la recuperación comenzaría cuando el nivel de líquido en el primer recipiente de compresión/expansión 20 haya alcanzado su mínimo y cuando el nivel de líquido en el segundo recipiente de compresión/expansión 30 haya alcanzado su máximo. En ese punto, todas las válvulas de gas estarían cerradas.

Sin embargo, la siguiente carrera comenzaría con una orden a la bomba hidráulica 12 para invertir el flujo de fluido de manera que la carrera siguiente comenzaría con un flujo de fluido desde la lumbrera 16 de bomba hasta la lumbrera 14 de bomba, actuando la bomba hidráulica 12 como un motor y actuando el generador/motor eléctrico 10 como un generador. La SLPcV 124 se abriría para permitir así la comunicación de fluido entre la cámara de almacenamiento de gas de baja presión 120 y el segundo recipiente de compresión/expansión 30. Asimismo, la SHPcV 114 se abriría de manera que el diferencial de las presiones del gas continuaría impulsando el fluido, pero en esta carrera el accionamiento sería desde la lumbrera 16 de bomba hasta la lumbrera 14 de bomba. El momento de cierre de la válvula, que conecta la cámara de almacenamiento de gas de alta presión 110 al segundo recipiente de compresión/expansión 30, se correspondería con la proporción de niveles de fluido hidráulico que igualan la proporción de presiones de gas, como se ha descrito anteriormente de manera similar.

La figura 7 es un diagrama esquemático de una realización alternativa en la que las válvulas entre el subsistema de almacenamiento de gas y los recipientes de compresión/expansión pueden de hecho estar "doblados" de manera que la sincronización inflexible de la apertura y cierre de las válvulas no sea tan crítica. En esta realización alternativa, una válvula unidireccional sólo permitirá que el gas escape del recipiente bajo compresión cuando la presión en el recipiente de compresión sea igual a o exceda ligeramente la de la cámara de gas a alta presión. De hecho, el "doblado" de las válvulas de gas es necesario si las válvulas controladas electrónicamente son unidireccionales por diseño. Si las válvulas se "doblan" entonces una inversión entre almacenamiento y recuperación de energía también requiere una inversión de qué par de las válvulas se selecciona electrónicamente.

El procedimiento de almacenamiento/recuperación anterior puede aplicarse con éxito si el líquido hidráulico es un líquido iónico (o un líquido hidráulico que no absorbe manera similar el gas de modo que no pueda ocurrir el fenómeno de la cavitación), o si las diferencias de presión entre las cámaras de almacenamiento de gas de baja y alta presión se mantienen en una proporción pequeña, tal como 3 o 5.

Un problema con la restricción de las relaciones de presión es que la densidad de energía que se puede lograr está restringida a un pequeño porcentaje de lo que podría ser posible dados los tamaños de las cámaras. Un problema con el uso de líquidos iónicos es que son bastante caros, del orden de aproximadamente 500 veces más caros que el aceite mineral.

Con el fin de abordar el problema de los líquidos iónicos caros, podría emplearse un líquido menos costoso tal como KRYTOX - un aceite de bomba de vacío fluorado con una densidad de 2,1 formulado para ser no reactivo con oxígeno - para la mayor parte del líquido, pero también para hacer flotar una pequeña capa protectora de verdadero líquido iónico (con una densidad más alta, tal como 1,4) en la parte superior del KRYTOX para proteger la interfaz gas/líquido. Sin embargo, los niveles de líquido tendrían que controlarse de tal manera que el líquido iónico permaneciera enteramente dentro de los recipientes de compresión/expansión 20, 30 y no fuera drenado dentro de la bomba hidráulica 12. Como resultado, se controlarían las carreras para ser más cortas.

Si se eligiera aceite mineral, los regímenes de presión tendrían entonces que estar restringidos a proporciones pequeñas como 3 o 5, y el gas en los recipientes de compresión/expansión 20, 30 tendría entonces que elegirse cuidadosamente para asegurar que no tuvieran lugar mezclas reactivas o explosivas. Por ejemplo, puede elegirse nitrógeno. Por otro lado, si se utilizara líquido iónico (como EMIM TFSI) o KRYTOX con una capa de tapa iónica, entonces el gas dentro de los recipientes de expansión de compresión 20, 30 podría ser aire.

Si se usa aire en los recipientes de expansión/compresión 20, 30 y las presiones operativas o máximas se eligen de tal manera que la cámara de almacenamiento de gas de alta presión 110 se mantenga hasta 5000 psi o más, es posible entonces utilizar un sistema de depósito "único" con dos piezas auxiliares de hardware: un tornillo u otro compresor mecánico para "precargar" o llenar una cámara de almacenamiento de gas de baja presión antes de la compresión final de baja relación con pistones líquidos, y un motor de aire para descargar el exceso de aire expandido de vuelta a la presión atmosférica. La cámara de almacenamiento de gas de baja presión se mantendría como un depósito de trabajo a una presión de entre 300 psi y 1000 psi, por ejemplo. Esto permitiría que los compresores convencionales (pero ineficientes) estuvieran correctamente dimensionados para reunir los grandes volúmenes de aire de baja presión (menos de 1000 psi) usado para la baja relación final, pero con una alta compresión de energía. Se muestra en la figura 8 una realización alternativa que tiene esta configuración. Con esta configuración, el 80 por ciento de la acción de almacenamiento/recuperación de energía se produciría al comprimir el aire en el depósito intermedio (presión baja) hasta su presión final de 5000 psi. Dado que las eficiencias son altas con el uso de un compresor de pistón líquido casi isotérmico descrito anteriormente, se puede esperar que las eficiencias de ese proceso sean superiores al 80 por ciento. Se espera que las eficiencias previstas de la compresión convencional en el depósito intermedio o de la expansión a través de un motor neumático sean del orden de un 30 por ciento (comparables con el almacenamiento de energía de aire comprimido convencional o CAES), pero las pérdidas altas se limitarían al 20 por ciento de la energía disponible en la expansión/compresión de "baja presión" entre 1 atmósfera y 60 atmósferas, de manera que la pérdida total se limita a un 30 por ciento (eficiencia total de aproximadamente un 70 por ciento).

De esta pérdida del 30 por ciento, el 14 por ciento proviene de la porción de baja presión del proceso (70 por ciento del 20 por ciento), y el restante 16 por ciento (que representa el 20 por ciento del 80 por ciento) del ciclo de alta

presión. Esto aún permite eficiencias globales de almacenamiento/recuperación de energía muy altas, requiriéndose sólo un gran depósito requerido como el lugar de almacenamiento de la energía.

5 Tal depósito único grande se puede implementar convenientemente como un conjunto de tubos de acero, o preferiblemente como estructuras compuestas de fibra de carbono. Cuando sea adecuado, puede ser aún más eficaz como un depósito geológico (ya sea una cúpula de sal, o incluso un pozo de petróleo agotado) que tiene una capacidad lo suficientemente grande para almacenar cantidades significativas de energía potencial en forma de gas presurizado. Los depósitos geológicos ofrecen la posibilidad de almacenar cientos de megavatios-hora y, por lo tanto, amortiguar instalaciones eólicas o de energía solar importantes. Las estructuras compuestas de fibra de carbono o los tubos de acero son actualmente menos económicos, pero pueden resultar efectivos para proporcionar almacenamiento de energía en lugares remotos o en vehículos portátiles.

10 El uso de pistones líquidos para la compresión de gases es un área muy activa del desarrollo técnico actual. Se describe en el presente documento un enfoque para aislar o restringir la absorción de gases por el líquido hidráulico o para efectuar la reducción de la solubilidad del gas dentro del líquido hidráulico y de aparatos particulares.

15 La publicación de solicitud de patente de Estados Unidos número 2007/0258828 A1 (Adler y otros) revela la importancia de evitar la absorción de gas dentro de un compresor de pistón líquido y una solución que consiste en el uso de líquidos que no absorben gases. Los líquidos particulares propuestos son líquidos iónicos. Sin embargo, los líquidos iónicos con una solubilidad de gas inferior a 10^{-4} mol/l bar disponibles, tales como líquidos iónicos basados en TFSI (trifluorometanosulfonimida) que incluyen [EMIN/1] [TFS1] o [BMIM] [TFS1] son muy costosos.

20 La patente de Estados Unidos número 5.021.125 (Phillip y otros) discute medios para tratar la absorción de gas en líquidos hidráulicos asociados con los acumuladores sin pistón muy grandes que podrían usarse en fábricas de pulpa al permitir la separación gravimétrica de líquido rico en gas por medio de flujos laminares a través de tubos verticales largos. Esto requiere estructuras físicas muy grandes y, a pesar del gran coste, es sólo marginalmente efectivo.

25 La solicitud PCT número PCT/US2010/035795 (Abom y otros) propone una solución consistente en insertar dentro de las estructuras de columna de compresión una sombrilla como "tapas" para atrapar burbujas de gas. La estructura requerida es compleja y su eficacia no está probada.

30 La solicitud de patente de Estados Unidos número de serie 12/813.781 y la solicitud PCT número PCT/CA2008/002178 (ambas de Kenway y otros) revela el uso de dos dispositivos, el primero de una lanzadera de pistón de aislamiento (con válvulas de conmutación apropiadas) donde un pistón metálico macizo separa el líquido y el gas (en un dispositivo que se asemeja a un intensificador hidráulico). El primero no se refiere directamente a un compresor de pistón líquido, sino que se refiere a acumuladores "sin pistón". El segundo es del uso de líquidos de baja absorción como el fluido de compresor EXXCOLUB, o el uso de una capa flotante de "aceite ligero impermeable al gas" que flota sobre el fluido hidráulico.

35 La patente de Estados Unidos número 7.802.426 (Bollinger) enseña que, aunque se puede usar un líquido para "accionar" un pistón en un compresor, esa separación debe mantenerse entre el líquido y el gas por medio de un pistón macizo. Este enfoque evita muchas de las ventajas termodinámicas que se derivan de tener el líquido en contacto directo con el gas.

40 Se busca minimizar la absorción de gas en fluidos hidráulicos (o los líquidos solubles en gas deben aislarse de los gases de alta presión) debido al fenómeno de la cavitación en sistemas hidráulicos. En la publicación titulada "Desgaste por cavitación en sistemas hidráulicos" (<http://www.machinerylubrication.com/Read/380/cavitation-wear-hydraulic>), E.C. Fitch enseña:

45 "El fenómeno de la cavitación consiste en la interrupción de la continuidad en el líquido en el que hay una considerable reducción local de la presión. La formación de burbujas dentro de líquidos (cavitación) comienza incluso en presencia de presiones positivas que son iguales o cercanas a la presión de vapor saturado del fluido a la temperatura dada. ...El mecanismo de cavitación se puede describir como sigue: cualquier líquido contendrá burbujas gaseosas o vaporosas, que sirven como núcleos de la cavitación. Cuando la presión se reduce hasta cierto nivel, las burbujas se convierten en depósito de vapor o de aguas disueltas. El resultado inmediato de esta condición es que las burbujas aumentan rápidamente en tamaño. ...Se cree que la reducción de la estabilidad volumétrica en la mayoría de los líquidos se asocia con el contenido de diversas mezclas, tales como partículas sólidas y burbujas de gas-vapor no húmedas, en particular las que se encuentran a un nivel submicroscópico, que sirven como núcleos de cavitación. Un aspecto crítico del proceso de desgaste por cavitación es la destrucción de la superficie y el desplazamiento del material causado por movimientos relativos altos entre una superficie y el fluido expuesto. Como resultado de tales movimientos, la presión local del fluido se reduce ...Cuando la presión vuelve a la normal (que es más alta que la presión de vapor del fluido), se producen implosiones que hacen que la cavidad o las burbujas de vapor se colapsen. Este colapso de las burbujas genera ondas de choque que producen fuertes fuerzas de impacto en las superficies metálicas adyacentes y causan endurecimiento de trabajo, fatiga y fosas de cavitación. Por lo tanto, la cavitación es el nombre dado a un mecanismo en el cual las burbujas de vapor (o cavidades) en un fluido crecen y se colapsan debido a las fluctuaciones de presión locales."

La cita anterior de la publicación E.C. Fitch no enfatiza los efectos de temperatura dado que considera tanto los gases como los vapores absorbidos del líquido hidráulico. En el caso de los vapores, los cambios de presión en el líquido hidráulico global que surgen de los flujos superficiales locales pueden causar un cambio de fase y un colapso completo de la "burbuja". En el caso de gases absorbidos, el mecanismo puede ser significativamente diferente con relación a cambios drásticos de temperatura localmente en la burbuja, o incluso la explosión de una burbuja como resultado de la combustión local (si la burbuja contiene aire, oxígeno o un gas reactivo). Dado que algunos diseños de compresor/expansor de pistón líquido dependen de bombas hidráulicas, o de motores o válvulas para controlar y mover el líquido hidráulico, es una consideración importante la minimización de la absorción de gas y el aumento del aislamiento entre gas y líquidos hidráulicos en los que el gas es soluble.

En este documento se consideran realizaciones de pistones líquidos.

El uso de un proceso de dos líquidos tamponado emplea un líquido para el pistón líquido y un segundo líquido para el funcionamiento de la bomba hidráulica 12. El primer líquido puede ser, por ejemplo, refrigerante a base de etilenglicol/agua/inhibidor para la compresión de gases reactivos, ya que este líquido no se congela o hierve fácilmente, y es también no inflamable y, por lo tanto, no produce una mezcla explosiva en combinación con el aire. El segundo líquido puede ser, por ejemplo, aceite hidráulico. Los dos líquidos están separados por un pistón aislador (de material macizo), de modo que el líquido del pistón líquido nunca atraviesa componentes que puedan producir cavitación.

Se muestra en la figura 16 un sistema de dos líquidos que emplea un tampón. Tal aparato está configurado preferiblemente de modo que el líquido más pesado esté siempre "debajo" del líquido más ligero. Como tal, incluso si los dos líquidos se fugan más allá de sus juntas, su orden básica se mantiene. Dado que el "líquido de compresión" 203 se utiliza para el intercambio de calor, éste pasa hacia abajo a través de la tubería 205 que se eleva detrás del cilindro de aislamiento 204 y a través 206 de una envuelta de alta presión externa y de un intercambiador de calor tubular 207 en su camino desde la cámara de compresión/expansión 211. El líquido 203 de la cámara de pistón intermedio es el mismo que el líquido 210 y es este líquido el que atraviesa de la malla interna de intercambio de calor dentro de la cámara de compresión/expansión. El líquido 201 es el aceite hidráulico más ligero (menos denso) que realmente fluye dentro y fuera de los motores y válvulas de las bombas hidráulicas convencionales. No tiene contacto con el gas y está tamponado por el pistón macizo 202.

En la figura 17 se muestra un sistema de dos líquidos sin tampón. Este sistema emplea un líquido primario que es un líquido denso y no reactivo como unos fluidos de bomba de vacío DuPont KRYTOX, aceites de la serie Dupont KRYTOX NRT, o aceites halocarbonados con una densidad de aproximadamente 1,9 g/cc. El líquido tampón es un líquido con una solubilidad gaseosa extremadamente baja tal como un líquido iónico GEMIM] [BTA], [BMIM] [BTA] o [BMMIM] [BTA], por ejemplo, que tiene una densidad de aproximadamente 1,5 g/cc. Dado que el líquido tampón flota sobre el líquido primario y dado que sólo el líquido primario atravesará la bomba (o pasará fuera de la cámara de compresión/expansión), la tapa tampón permanecerá flotando. Además, puesto que el líquido iónico tiene una baja viscosidad, éste pasará fácilmente a través de estructuras internas de intercambio de calor dentro de la cámara de compresión/expansión del pistón líquido.

El sistema de dos líquidos sin tampón es significativamente más sencillo ya que hace innecesario tener un cilindro intermedio. Como se discutió anteriormente, los niveles de fluido deben controlarse de manera que el KRYTOX o el aceite halocarbonado nunca sea drenado del recipiente de compresión/expansión. Esto se debe a que en este momento no está claro que la separación de densidad gravimétrica, que mantiene el tampón de aislamiento flotante, será recuperable si el líquido iónico más ligero se distribuye a través de las cavidades de las válvulas hidráulicas, bombas y motores en la parte hidráulica convencional del sistema.

Se muestra en la figura 18 un sistema que emplea un pistón macizo para aislar las lumbreras primera y segunda 14, 16 de la bomba hidráulica. Esta realización es muy similar al sistema de "dos líquidos" tamponado mostrado en la figura 16. Sin embargo, en la realización ilustrada en la figura 18, los dos pistones de aislamiento son reemplazados por una única estructura que acepta las lumbreras primera y segunda 14, 16 de la bomba de una bomba/motor hidráulico convencional (por ejemplo, un desplazamiento variable del pistón axial descentrado de la bomba/motor como el Linde HPW280) y conecta las lumbreras 14, 16 de la bomba a las dos cámaras anulares centrales de una estructura que se asemeja a un intensificador hidráulico. La finalidad de esto es doble: en primer lugar, aislar el líquido hidráulico que atraviesa la bomba de motor desde el líquido que actúa como el pistón líquido y, en segundo lugar, para anular cualquier "presión de compensación" o presión de carga. Muchos componentes hidráulicos requieren presión de carga. Si un motor o bomba hidráulicos requiere presión de carga, entonces la presión en las lumbreras 14, 16 de bomba no puede caer por debajo de la presión de carga. Puesto que las presiones en un aparato de compresión/expansión que implican pistones líquidos pueden caer por debajo de un nivel de presión arbitrario para la carga (por ejemplo, 300 PSI) es necesario un aislador como el descrito anteriormente. Si las lumbreras 14, 16 de bomba están ambas conectadas al centro de dos cámaras anulares de una estructura de intensificador y los dos volúmenes cilíndricos que comprenden las cámaras extremas del intensificador están conectados cada uno a las cámaras de compresión/expansión del pistón líquido reales, y el volumen de cada uno de los cilindros extremos en el intensificador es aproximadamente el mismo que el volumen de cada una de las cámaras de compresión/expansión, entonces se aislarán los dos líquidos (para minimizar la absorción de gases) y la

presión de carga se anulará de manera que sólo la presión diferencial entre las lumbreras 14 y 16 de bomba accione el líquido de compresión/expansión y el proceso de compresión/expansión.

5 En una realización alternativa, un grupo de estructuras de intensificador paralelas puede estar conectado en paralelo con cada uno de un volumen menor que el volumen de la cámara de compresión/expansión, pero cuyo agregado excede el volumen de la cámara de compresión/expansión. Si para el ejemplo se usaron 4 estructuras de intensificador, cada una con una relación de intensificación de 1, entonces podría elegirse cada una para que tuviera un volumen ligeramente superior a un cuarto (1/4) del volumen de la cámara de compresión/expansión.

10 Alternativamente, dentro del grupo mediante una conexión de canalización apropiada, puede alternarse la dirección de movimiento de los pistones macizos, de manera que la aceleración de los pistones produce fuerzas y momentos totales reducidos sobre la estructura y los soportes mecánicos.

Alternativamente, se puede incorporar una relación de intensificación real en el intensificador de manera que se pueda usar un sistema hidráulico de presión más alta con gases de presión más baja, o viceversa (por ejemplo, intensificación 5:1 para aceite a 5000 PSI para comprimir/expandir gas a 1000 PSI).

15 Para el sistema anteriormente descrito en el que la energía puede entregarse o extraerse del generador/motor 10, se proporciona una circuitería de acondicionamiento de potencia eléctrica. Es decir, para que la potencia eléctrica sea suministrada bajo control al generador/motor 10 (es decir, el impulsor primario eléctrico) se conecta una circuitería, que contiene elementos de excitación de frecuencia variable (VFD), entre la fuente de la potencia eléctrica (red o rejilla de potencia) y el propio generador/motor. Se entenderá que los VFD son, en general, bien conocidos.

20 Por ejemplo, la síntesis de formas de onda de corriente alterna (CA) se discute en la patente norteamericana número 3.947.736 (Byers y otros), se discute en la patente norteamericana número 4.286.203 (Ehret) el control de un deslizamiento dentro de motores de inducción de corriente alterna (CA) mediante el uso de estas formas de onda de impulso sintéticas, se discute en la patente norteamericana número 3.971.972 (Stitch) el uso de la modulación de ancho de impulso (PWM) para conmutar las unidades básicas de corriente y tensión al motor, se discute en la patente norteamericana número 4.128.793 (Stitch) el uso de rectificadores controlados por silicio (SCRs) o Tiristores
25 como un elemento de conmutación más efectivo, y se discute en la patente norteamericana número 4.618.810 (Hagerman y otros) la consideración de usar todas las tres fases (en configuraciones tanto directas como invertidas) para proporcionar una fuente controlable de tensión y corriente para la síntesis completa por PWM.

30 Además, la patente norteamericana número 4.364.037 de Becke y otros discutió el transistor bipolar de puerta aislada (IGBT) que simplificó los dispositivos requeridos para conmutar energía. Bose y otros discuten además los principios necesarios para utilizar estos dispositivos en el control suave de máquinas eléctricas.

Aunque el impulsor primario que es parte de la realización descrita no es un motor de inducción, sigue siendo importante un control estrecho. El control de un generador síncrono operado como un motor síncrono requiere modificaciones de las estrategias que gobiernan el uso convencional de VFDs normalmente utilizados para controlar motores de inducción de corriente alterna.

35 Cuando se utiliza como motor síncrono, se emplean tanto un filtrado más extremo contra armónicos como un control de realimentación que reconoce la aceleración lenta requerida para un motor síncrono con el fin de "arrancar" el generador. La corriente de excitación tiene que aplicarse típicamente como una forma de onda de CA de una frecuencia de entre 40 y 240Hz para utilizar los devanados de excitador como "transformador" cuando el generador se arranca desde una velocidad angular de cero. En este estado de cero rpm todavía es posible inducir un campo magnético significativo en el rotor mediante el uso del devanado de estator del excitador como el primario de un transformador y el devanado del rotor de excitador como el secundario que recibe la corriente transformada y la rectifica antes de que la corriente fluya hacia los devanados del rotor principal del generador que se utiliza como un motor.
40

45 El rotor se transforma así en el equivalente de un imán permanente multipolar cuyo par rotacional se genera por la aplicación de un campo magnético rotatorio a las bobinas de estator del generador. Dado que los campos magnéticos y las intensidades de corriente del estator son aún altos incluso cuando el rotor está estático o arrancando, los campos generados por el "VFD" pueden aplicarse solamente como impulsos de media fase sencillos separados ampliamente cuando el motor comienza a girar. Si se aplican convencional y continuamente, el generador (que actúa como un motor síncrono) puede fallar al arrancar para girar o bien oscilar hacia una posición más o
50 menos bloqueada.

55 El filtrado post-IGBT debe ser tanto alto en inductancia como afinado, de modo que las formas de onda tiendan a ser lisas. El uso de rectificadores de fase controlada o IGBTs en el puente de diodo se puede utilizar para lograr un mayor nivel de alisado. El afinado de salida puede ser altamente elevado (Q alta) con respecto a la frecuencia de red local, ya que el circuito inversor se utilizará para entregar potencia "limpia" de vuelta a la red cuando el sistema esté en modo de recuperación.

El giro inicial del generador como motor sólo debe iniciarse cuando la bomba hidráulica "descentrada" 12 está en una posición "neutra", por lo que ésta no ofrece de manera eficaz un par de arranque resistivo (o cuando la bomba hidráulica 12 actúa realmente como motor por lo que genera un par "negativo" y hace girar el generador/motor 10).

5 De hecho, dado que este aparato es en general reversible, el diferencial de presión de gas puede utilizarse inicialmente en un modo "expansor" para generar el par de arranque en el árbol de la bomba "descentrada" para ayudar a comenzar a girar el árbol de generador cuando el generador llega a acelerar como un motor.

10 Típicamente, las velocidades operativas estarán entre 500 y 2000 rpm (por ejemplo, 1800 rpm para un generador de 4 polos de 60 Hz) como es apropiado para generadores multipolares de 50 y 60 Hz. Los problemas de arranque que deben superarse por los medios especiales descritos anteriormente se refieren a la obtención de los primeros cientos de RPM de velocidad de rotación en el árbol mediante los cuales se acoplan el generador/motor 10 y la bomba hidráulica 12.

A continuación, se describirá brevemente la dependencia temporal de la salida de potencia, la velocidad angular y otras características de esta invención.

15 En cada carrera de expansión, el momento en el que el gas de alta presión se introduce inicialmente en un recipiente de compresión/expansión para expansión, es el momento en el que está disponible la máxima cantidad de potencia en esa carrera de expansión. Durante el curso de esa carrera de expansión, la potencia disponible disminuye. La figura 9 es un gráfico que muestra la variación de la salida/entrada de potencia de un generador/motor a lo largo del tiempo. A medida que finaliza cada carrera, la potencia cae - reiniciándose en su valor pico cuando el flujo se invierte y comienza una nueva carrera. Un ciclo inverso describe el almacenamiento de energía en el ciclo de compresión. Es igualmente importante regular el ciclo de potencia en compresión; los mecanismos de regulación son los mismos, pero utilizados a la inversa.

20 Debido al uso de una bomba hidráulica 12 "descentrada" como elemento rotacional que acopla el flujo de líquido con la energía mecánica, la dirección de rotación de la bomba no necesita cambiar cuando se invierten los ciclos. De este modo, el momento angular de la bomba hidráulica 12 y el generador/motor eléctrico del sistema 5 mantienen una velocidad de rotación que varía con la ganancia y la pérdida de energía a través de los ciclos de compresión/expansión.

30 La figura 10 es un gráfico que muestra la variación de la velocidad angular de rotación y la variación de la salida/entrada de potencia del generador/motor a lo largo del tiempo. Puesto que el magnetismo dentro del rotor del generador/motor 10 puede controlarse usando la corriente del excitador, es posible regular la velocidad a la cual la potencia entra y sale. La modulación de la corriente del excitador alcanza un pico cuando la velocidad de rotación alcanza su mínimo y se hunde cuando la velocidad de rotación alcanza su máximo. Esto permite alisar las variaciones de potencia dentro de la carrera y el ciclo.

35 La figura 11 es un gráfico que muestra la modulación de la corriente de excitador del generador/motor con la variación de la velocidad angular en el tiempo para alisar las variaciones de salida/entrada de potencia. La modulación de esta corriente de excitador (o la modulación de una portadora de frecuencia más alta (40-200Hz) que describe la corriente de excitador) proporciona una regulación significativa de la salida de potencia como se muestra esquemáticamente en la figura 12, que es un gráfico que muestra la variación resultante de la entrada/salida de potencia del generador/motor a lo largo del tiempo como resultado de la variación de la corriente del excitador.

40 Esta regulación de la salida (o entrada) de potencia se consigue en coordinación con cambios de control aplicados al volumen de la bomba hidráulica 12 "descentrada". La figura 13 muestra cómo se sincronizan estos ciclos de control.

45 Este cambio y la inversión de volumen en la bomba "descentrada" es también una parte integral de la presente invención. Sin embargo, seguirán existiendo fluctuaciones en la frecuencia de rotación puesto que el momento angular del sistema (que en esta realización incluye un volante 18) es en sí mismo parte del sistema 5 de almacenamiento/recuperación de energía que proporciona energía a corto plazo para llenar los vacíos cuando el ciclo de compresión/expansión no ofrece la posibilidad de un almacenamiento o recuperación significativos de energía.

Se anticipa que los tiempos de los ciclos de compresión/expansión para el sistema 5, que se ha de emplear en usos comunes, son del orden de 30 a 60 segundos.

50 Aunque el volante 18 está destinado a proporcionar o absorber energía con una constante temporal del orden de algunos segundos para ayudar a alisar el ciclo, la frecuencia de rotación variable requiere el uso de dispositivos similares a VFDs para permitir una conexión eficiente a la red o rejilla de potencia. Esto se debe a que la velocidad de rotación debe variar algo con respecto a las velocidades del motor sincronizadas dictadas por la frecuencia de la rejilla (típicamente 50 o 60 Hz). Los componentes electrónicos que realizan esta función permiten la rectificación aislada de la potencia trifásica entrante, la síntesis mediante el filtrado de las formas de onda de salida procedentes de los IGBTs de PWM en una potencia de salida trifásica con una frecuencia diferente y la conmutación cuidadosa de esa potencia de manera que pueda ser entregada desde la red eléctrica al impulsor principal (o

en la dirección opuesta viniendo desde el generador hacia la red con una síntesis de frecuencia cuando se genera eléctricamente potencia).

5 Según esta realización, tales circuitos se emplean para conseguir la excitación de frecuencia variable cuando el motor/generador 10 está siendo utilizado como un motor y la reutilización de los mismos elementos de circuito para servir como un inversor que vuelve a muestrear la potencia producida cuando el motor/generador 10 está siendo utilizado como generador (generando a frecuencias que deben diferir de la red ya que son necesarias variaciones de velocidad angular para alisar la salida de potencia).

10 En efecto, en el modo de recuperación, los elementos VFD producen salida eléctrica para entrega a la red o rejilla eléctrica que está emparejada tanto en frecuencia como en fase con la potencia de la red. Se unen unas resistencias de "de sangrado" a los tres devanados del estator cuando el generador se conmuta entre la función de motor y la de generador. Aunque no se muestra, se puede usar un contactor separado para desconectar la de sangrado de modo que se limita la pérdida de eficiencia durante la operación continua.

Los contactores, diodos, resistencias, inductores, condensadores de filtro e IGBTs mostrados esquemáticamente en la figura 14 ilustran una realización de este doble uso del control de potencia de síntesis de frecuencia PWM.

15 En el modo de almacenamiento, los contactores S1 y S3 estarían cerrados. En el modo de recuperación S2 y S4 estarían cerrados. La secuencia debe ser "interrumpir antes de hacer" para que el par S1/S3 nunca se cierre simultáneamente con el par S2/S4.

20 En esta realización, las resistencias de sangrado aseguran que exista una trayectoria de "escape" para la energía residual, puesto que el generador/motor 10 girará típica y continuamente con independencia del modo en el que esté el sistema 5. Cuando todos los contactores están abiertos, también es necesario que la corriente de excitador sea minimizada para evitar transitorios en exceso. Esta coordinación de los modos de la corriente de excitador, del volumen de la bomba, de la dirección de la bomba, de las válvulas de gas, de los niveles de líquido y de los IGBTs es gestionada globalmente por el subsistema 7 de control.

25 Los conductores de puerta de los IGBTs están conectados típicamente a un microordenador local programado para implementar las estrategias apropiadas de arranque/parada y ejecución de PWM, y son controlados y secuenciados por el subsistema 7 de control.

30 Estas estrategias de PWM diferirán típicamente de las encontradas en un VFD convencional ya que la mayor parte de la aplicación estará dentro de rangos de frecuencia próximos a (pero difiriendo ligeramente de manera continua de) la frecuencia de la red eléctrica. Además, es posible "sintonizar" la salida del generador (o motor) eligiendo una frecuencia de excitador de CA que "lata" con la frecuencia de la red y las frecuencias de rotación. El control del inversor de VFD debe ejercer el control del excitador para producir el alisamiento máximo en la forma de onda salida final, como se muestra en la figura 15. Se pretende que el arranque y la parada del sistema 5 sean eventos raros, pero se requiere una síntesis eficiente y limpia de potencia para la condición de funcionamiento normal.

35 Relacionado con el sistema 5 anteriormente descrito para el almacenamiento y recuperación de energía se encuentra el concepto particular de uso de tal sistema 5 en fuentes de alimentación ininterrumpible y similares.

La interrupción de la alimentación en ciertos sistemas puede tener consecuencias graves. Por ejemplo, en un molino durante el aserrado de leña, el fallo de alimentación puede ocasionar la pérdida de horas de funcionamiento, mientras que debe cortarse manualmente la leña a mitad de corte debido a la pérdida de alimentación. Aún pueden experimentarse más situaciones críticas resultantes de la pérdida de potencia en un reactor o en un hospital.

40 En las aplicaciones donde la interrupción debe ser "moderada" se emplean a menudo fuentes de alimentación ininterrumpible (UPS) de diversas configuraciones; un problema fundamental con la mayoría de los diseños de UPS radica en el mecanismo para conmutar entre la fuente de alimentación primaria (normalmente la red) y las fuentes de alimentación secundarias. El problema es especialmente agudo cuando están involucradas múltiples transiciones. Por ejemplo, en situaciones en las que la red (rejilla) es la fuente de energía primaria, y una "pasada" por la UPS proporciona de 15 segundos a 2 minutos de alimentación hasta que se inician y se estabilizan los generadores de respaldo diésel. En tales circunstancias, se requieren varias transiciones para recorrer toda la secuencia y finalmente recuperarse con la restauración de la alimentación a la red.

50 Los problemas que pueden surgir tienden a ser más severos en los sistemas de potencia en los que el nivel de potencia excede de 100KW y de tal manera deben "conmutarse" de forma segura grandes cantidades de potencia. Es altamente deseable desarrollar tanto procesos como aparatos que permitan una conmutación continua aún más general entre fuentes de potencia a altos niveles de potencia cuando se producen caídas o apagones en la fuente de potencia primaria de corriente alterna, que es típicamente la red eléctrica.

Los conceptos básicos de sistemas de alimentación de respaldo y fuentes de alimentación ininterrumpible son bien conocidos, y se muestran en la figura 19 los componentes principales de un sistema UPS de este tipo.

Los problemas que conducen a transiciones no continuas de fuentes de potencia de primaria a secundaria tienden a estar causados porque, cuando se usan conjuntamente con "electrónica de control" moderna, como los VFD, los pequeños "fallos" de transición tienden a disparar los controladores de motor, los ordenadores de VFD y otras funciones críticas. Aunque el UPS o los sistemas de alimentación de respaldo proporcionan "relleno" de alimentación, las transiciones son difíciles de gestionar y se disparan los controladores, las luces metálicas de vapor se apagan o los procesos se detienen en el breve parpadeo que tiene lugar cuando la potencia de respaldo "surte efecto".

El concepto de usar semiconductores de conmutación de alta potencia para controlar motores se enseña por Byers en la patente de Estados Unidos número 3.947.736. El control del deslizamiento dentro de los motores de inducción de CA mediante el uso de estas formas de onda de impulso sintéticas se describe por Ehret en la patente de Estados Unidos número 4.286.203. El uso de la modulación de anchura de impulso (PWM) para conmutar las unidades básicas de corriente y tensión en el motor se enseña por Stitich en la patente de Estados Unidos número 3.971.972. El uso de SCRs o Tiristores como elementos de conmutación más eficaces se enseña por Stitich en la Patente de Estados Unidos número 4.128.793, y la consideración de usar todas las tres fases en configuraciones tanto directas como invertidas para proporcionar una fuente controlable de tensión y corriente para una síntesis completa por PWM se enseña por Hagerman y otros en la patente de Estados Unidos número 4.618.810.

Además, Becke y otros, en la patente de Estados Unidos número 4.364.037 enseñan el uso de IGBTs, que simplifican los dispositivos necesarios para conmutar la alimentación. Bose y otros, en la publicación titulada Sistemas de accionamiento de corriente alterna de velocidad ajustable, Nueva York: IEEE Press, ISBN 0-87942-146-0, enseñan además los principios de uso de estos dispositivos para el control suave de máquinas eléctricas.

La figura 20 es un diagrama esquemático de una etapa de rectificación para la fuente de alimentación ininterrumpible de la figura 19. Los rectificadores mostrados en la figura 20 son, de hecho, rectificadores controlados de silicio o SCRs. Estos permiten un muy buen control de la carga, pero en la mayoría de aplicaciones serán suficientes diodos de estado sólido sencillos.

La figura 21 es un diagrama esquemático de una etapa de rectificación alternativa para la fuente de alimentación ininterrumpible de la figura 19. El circuito de la figura 21 es más práctico para niveles de potencia más altos que permiten una carga controlada de un condensador que almacena la corriente continua y proporciona la rigidez convencional del bus de CC en los diseños conocidos originales.

La figura 22 es un diagrama esquemático de las etapas de rectificación de tensión; alisado e inversión de una variación de la fuente de alimentación ininterrumpible de la figura 19. Se proporciona un filtrado apropiado de modo que el circuito de carga produzca una CC lisa en el condensador (siendo el condensador el que define el centro nodal del bus de DC).

La figura 23 es un diagrama esquemático de la etapa de salida de la fuente de alimentación ininterrumpible de la figura 19 y proporciona la forma de onda CA resintetizada utilizando la técnica de modulación de ancho de impulso (PWM). Esto se muestra esquemáticamente en la figura 24, que aísla uno de los conjuntos de IGBTs.

Según esta realización de la invención, se utiliza un bus de CC rigidizado como el medio primario de interconexión entre una variedad de cargas (como una multiplicidad de motores de CA de alta potencia) y la red de CA, así como el sistema de almacenamiento eléctrico y generadores de respaldo. En particular, la excitación se controla en combinación con las características de conmutación natural de los puentes de diodo para permitir transiciones generalmente más continuas entre las fuentes de potencia de respaldo y primaria en el caso de una caída de tensión o apagón momentáneo de la fuente de potencia primaria. Tal control puede obtenerse mediante el control de la tensión y la corriente de excitador aplicadas a las bobinas de excitación de un generador de CA síncrono.

El concepto de controlar la excitación para proporcionar transiciones generalmente más continuas es aplicable al control del motor para funciones críticas (o potencia de respaldo para funciones críticas) puesto que la centralización de la interconexión al nivel de bus de CC permite entregar las funciones de excitación del impulso de frecuencia variable (VFD) con mayor economía a una serie de motores o cargas distribuidas en toda una fábrica o instalación grande con el beneficio simultáneo de proporcionar protección frente a baja tensión.

La "rigidización" del bus de CC y el control de la excitación dentro de múltiples generadores de CA (una función que en la técnica anterior ha sido gestionada localmente dentro de cada generador por un llamado circuito de regulación automático de tensión o AVR) para crear niveles de umbral, y la variación de estrategias tradicionales de PWM en las etapas de salida IGBT para crear "resiliencia" frente a pequeños cambios en los valores del bus de CC, puede hacer que el bus de CC sea adecuado como punto de conexión "en fábrica" o en una institución.

Según una realización, múltiples fuentes de potencia secundarias y una fuente de potencia primaria están conectadas en paralelo a un bus de CC, como se muestra en la figura 25, este bus es "más rígido" que el bus de CC dentro de un VFD o UPS normales porque tiene múltiples fuentes posibles de tensión de CC. También puede ser rigidizado por la adición de supercondensadores, como se sugiere en materiales EPRI, Sandia, NETL como almacenamiento de energía para recursos de energía distribuidos y otros sistemas de energía eléctrica (2003).

Además, el bus de CC puede ser rigidizado adicionalmente conectando baterías como fuentes de potencia secundarias.

5 Incluso sin las fuentes de CA paralelas, este tipo de bus de CC tiene ya la ventaja de que es relativamente estable, dependiendo principalmente del tiempo de descarga de los condensadores, los supercondensadores o las baterías en la carga.

En los sistemas de potencia grandes, las fuentes secundarias de potencia de CA trifásicas son usualmente también alternadores o generadores de CA, como se muestra en la figura 26.

10 Para interconectar múltiples fuentes de energía secundarias con una fuente primaria de esta manera, las tensiones de excitación se gestionan de modo que los generadores de alta potencia puedan permanecer en "espera" como reserva de "rotación" asíncrona con tiempo de conmutación de subciclo gracias a la conmutación de diodos compartida disponible como parte de la estructura de "bus de CC rígido".

15 La regulación automática de tensión (AVR) ha sido tradicionalmente una función analógica y, aunque existe el control digital de AVR, y el control digital común a veces se utiliza en grandes instalaciones de generación de potencia para la gestión de recursos síncronos, el "bus de CC rígido" proporciona una mejora. De hecho, la AVR tradicional se elimina y se sustituye por una corriente de excitador controlada por ordenador (mediante un convertidor digital a analógico, o D/A, conectado al ordenador de control o un módulo de salida analógico conectado a un PLC). La corriente de excitación del generador dentro del aparato se mantiene a un nivel que produce una salida rectificadora "justo por debajo" del nivel de tensión producido al rectificar la red. Dado que el árbol del aparato está girando siempre y sólo requiere liberación de presión de gas a través de las válvulas de solenoide, y el movimiento del "plato oscilante" dentro de la bomba descentrada para liberar esa potencia al árbol del generador, el control gentil de la corriente de excitación proporciona una manera suave de transición entre varias grandes fuentes de alta potencia que comparten el "bus de CC rígido".

20 Por ejemplo, los generadores que alimentan un "bus de CC rígido" no necesitan sincronizarse entre ellos. Esto implica que los volantes u otros dispositivos de recuperación de almacenamiento de energía (como el sistema 5 descrito anteriormente y las alternativas de los mismos) que producen su salida de CA a través de generadores o alternadores giratorios pueden mantenerse en estado de espera simplemente manteniendo su tensión de excitación a un nivel lo suficientemente bajo como para que las variaciones ordinarias en el "bus de CC rígido" no atraviesen el nivel de tensión rectificado pico de esa fuente de CA específica.

25 De este modo, si la fuente primaria se cae o se apaga, la potencia dentro de los alternadores de CA giratorios se extrae cuando el bus de CC cae por debajo del umbral de diodo para la fuente de potencia secundaria particular. Esto ofrece una transición generalmente continua a las fuentes secundarias y permite a los volantes o sistemas, tales como el sistema 5 y las alternativas descritas en el presente documento, que proporcionan de 15 segundos a 2 minutos de potencia, mantengan el nivel de tensión de CC y retardar la tasa de caída.

30 Si todas las cargas están unidas mediante bloques inversores IGBT controlados independientemente, como se muestra en la figura 27, se puede gestionar el control suave de cargas críticas en el caso de un fallo de la fuente de energía primaria.

35 Las cargas prioritarias pueden mantenerse durante el tiempo que sea necesario (tal vez indefinidamente si la carga está operando la alimentación de un teatro, o la bomba de refrigeración en un reactor nuclear). Las cargas no prioritarias pueden ser apagadas o secuenciadas suavemente ya que la alimentación de CA invertida que las excita se controla individualmente por bloques de salida IGBT.

40 Tales bloques de salida de semiconductor casi no tienen coste (en comparación con, por ejemplo, un VFD completamente implementado) y ofrecerían al menos un arranque suave de motores/cargas en todo momento. Sin embargo, estos bloques IGBT son útiles puesto que el algoritmo para el control del módulo de PWM puede modificarse para permitir una cierta "caída" en el bus de DC.

45 Tal caída es inevitable con el uso de la conmutación de diodo para proporcionar una transición continua de fuentes de potencia como se muestra en la figura 29. Esto puede aliviarse en parte levantando suavemente las tensiones de excitación en los alternadores secundarios de CA cuando cada uno de ellos "entra en juego" en la gestión de potencia. A medida que aumenta cada tensión de excitador, también aumentará la tensión de CA asociada con el alternador en particular, y esa fuente predominará en la conmutación de diodo que da acceso al "bus de DC rígido".

50 La figura 28 ilustra el mecanismo básico de conmutación de tensión.

55 La figura 30 ilustra un control centralizado para la gestión de potencia global. La variación de la estrategia de PWM (desde convencional) requerida para superar la caída se puede expresar simplemente con el concepto de que la tensión nominal fijada del "bus de CC rígido" se establece más alta de lo que normalmente se requeriría de modo que los anchos de impulso y la densidad de impulsos requeridos para lograr un funcionamiento ordinario sean más cortos e inferiores que los ordinarios. Cuando se fija la caída (hasta el 5 o 10% del límite requerido en este tipo de

proceso o aparato), los anchos y densidades de impulso se "degradan" a normal. Esto requiere una elección de IGBTs con una tensión ligeramente más alta, pero la prima de coste no debe ser significativa.

La estructura de "bus de CC rígido" también puede requerir el funcionamiento físico de cables de alta tensión de CC a lo largo de todas las fábricas o instalaciones que utilizan este proceso o este tipo de aparato.

- 5 Aunque se han descrito realizaciones, los expertos en la técnica apreciarán que pueden realizarse variaciones y modificaciones sin apartarse del propósito y del alcance del mismo según se define en las reivindicaciones adjuntas.

10 Por ejemplo, aunque las realizaciones se han descrito anteriormente empleando un subsistema de generador/motor unitario, en una realización alternativa, el subsistema de generador/motor puede comprender un generador que es un componente separado del motor. Como tal, el árbol al que está acoplada la bomba hidráulica 12 también estaría acoplado a dos componentes: un motor y un generador. Con tal configuración, el motor podría seleccionarse y/o ajustarse a los requisitos para recibir potencia externamente y accionar la bomba hidráulica, y el generador podría seleccionarse y/o ajustarse por separado a los requisitos de ser accionado por la bomba hidráulica y de generar electricidad.

15 El generador puede estar sobredimensionado, de modo que si, por ejemplo, se desea generar 100 kW, se selecciona un generador que es capaz de generar un múltiplo de la potencia deseada. Si bien el coste de la infraestructura del sistema aumentaría probablemente, se obtendrían eficiencias operacionales debido a que la pérdida de calor en un generador más grande que funciona dentro de un rango muy eficiente sería menor que la pérdida de calor en un generador más pequeño que quizás operase fuera de su rango más eficiente.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema (5) para almacenar y liberar energía, teniendo el sistema (5) un estado de almacenamiento y un estado de liberación y comprendiendo:

un subsistema (10) de generador/motor;

5 una bomba hidráulica (12) configurada para bombear fluido hidráulico (13) entre unas lumbreras primera y segunda (14, 16) de bomba en respuesta a una fuerza aplicada a la bomba hidráulica (12) por el subsistema (10) de generador/motor durante el estado de almacenamiento y configurada también para impartir una fuerza al subsistema (10) de generador/motor en respuesta a que el fluido hidráulico (13) sea forzado a fluir a través de la bomba hidráulica (12) durante el estado de liberación entre las lumbreras primera y segunda (14, 16) de bomba;

10 un primer recipiente de compresión/expansión (20) para intercambiar fluido hidráulico (13) con la bomba hidráulica (12) a través de la primera lumbrera (14) de bomba;

un segundo recipiente de compresión/expansión (30) para intercambiar fluido hidráulico (13) con la bomba hidráulica (12) a través de la segunda lumbrera (16) de bomba;

15 un subsistema (100) de almacenamiento de gas que comprende al menos una pluralidad de válvulas de gas (112, 114, 122, 124) y que está configurado para recibir y almacenar gas forzado a través del fluido hidráulico (13) desde los recipientes primero y segundo de compresión/expansión de gas (20, 30) durante el estado de almacenamiento, estando configurado el subsistema (100) de almacenamiento de gas para liberar gas durante el estado de liberación para impartir así fuerza al subsistema (10) de generador/motor a través del fluido hidráulico (13);

20 un intercambiador de calor interno (22, 32) dentro de cada uno de los recipientes primero y segundo de compresión/expansión (20, 30) para intercambiar calor entre el fluido hidráulico (13) y el gas de su interior, teniendo cada intercambiador de calor interno (22, 32) una masa térmica muy grande con relación a la masa de gas dentro de los recipientes primero y segundo de compresión/expansión (20, 30); y

un subsistema (7) de control configurado para controlar al menos la bomba hidráulica (12) y las válvulas de gas (112, 114, 122, 124) para conmutar de este modo entre el estado de almacenamiento y el estado de liberación.

25 2. El sistema (5) de almacenamiento/recuperación de energía de la reivindicación 1, en el que el subsistema (100) de almacenamiento de gas comprende:

una cámara de gas de alta presión (110) para intercambiar selectivamente gas con el primer o segundo recipiente de compresión/expansión (20, 30) en respuesta a estados de abierto/cerrado de válvulas de gas respectivas (112, 114, 122, 124); y

30 una cámara de gas de baja presión (120) para intercambiar selectivamente gas con el primer o segundo recipiente de compresión/expansión (20, 30) en respuesta a estados de abierto/cerrado de las respectivas válvulas de gas (112, 114, 122, 124).

35 3. El sistema (5) de almacenamiento/recuperación de energía de la reivindicación 2, en el que dentro de cada intercambiador de calor interno (22, 32) la densidad de la malla o espuma metálica del intercambiador de calor se ha incrementado sustancialmente en una parte superior del cilindro donde el calor de compresión o expansión es mayor.

40 4. El sistema (5) de almacenamiento/recuperación de energía de la reivindicación 3, en el que la malla o el material de espuma metálica es sustancialmente más denso que el gas bajo compresión y tiene preferiblemente una densidad de agregado de 1g/cc aunque el factor de relleno es realmente menor del 25% del volumen disponible en la cámara de expansión/compresión (20, 30), y opcionalmente en el que cada intercambiador de calor interno (22, 32) llena menos del 25% del volumen interior del recipiente respectivo y opcionalmente en el que cada intercambiador de calor interno llena aproximadamente el 3 por ciento del volumen interior del recipiente respectivo.

45 5. El sistema (5) de almacenamiento/recuperación de energía de la reivindicación 3, en el que cada intercambiador de calor interno (22, 32) es una espuma metálica, y opcionalmente en el que sustancialmente todos los poros de la espuma metálica tienen un tamaño menor de aproximadamente 5 milímetros cúbicos.

6. El sistema (5) de almacenamiento/recuperación de energía de la reivindicación 3, que comprende además un intercambiador de calor externo (42, 52) en contacto con el fluido hidráulico (13) para intercambiar calor entre el fluido hidráulico (13) y el ambiente, u opcionalmente en el que cada intercambiador de calor interno (42, 52) es un tapón de metal sinterizado altamente poroso.

50 7. El sistema (5) de almacenamiento/recuperación de energía de la reivindicación 3, en el que cada intercambiador de calor interno (22, 32) es una bobina, y opcionalmente en el que cada intercambiador de calor interno (22, 32) comprende al menos uno de entre cobre y aluminio.

8. El sistema (5) de almacenamiento/recuperación de energía de la reivindicación 1, que comprende además un volante (18) asociado al subsistema (10) de generador/motor, u opcionalmente que comprende además un módulo de acondicionamiento de potencia (19) asociado con el subsistema (10) de generador/motor para acondicionar la potencia eléctrica del subsistema (10) de generador/motor durante el estado de liberación, u opcionalmente en el que la bomba hidráulica (12) está configurada para rotar en la misma dirección si el fluido hidráulico (13) está fluyendo desde la primera lumbrera (14) de bomba hacia la segunda lumbrera (16) de bomba o desde la segunda lumbrera (16) de bomba hacia la primera lumbrera (14) de bomba, u opcionalmente que comprende además transductores de presión para comunicar datos al subsistema (7) de control con respecto a la presión de gas dentro de cada uno de los recipientes primero y segundo de compresión/expansión (20, 30) y dentro del subsistema (100) de almacenamiento de gas, u opcionalmente en el que al menos uno de los recipientes primero y segundo de compresión/expansión (20, 30) aloja un transductor de nivel de líquido respectivo (24, 34) para comunicar datos al subsistema (7) de control con respecto al nivel de líquido hidráulico dentro del recipiente de compresión/expansión (20, 30).
9. El sistema (5) de almacenamiento/recuperación de energía de la reivindicación 1, en el que el fluido hidráulico (13) es un fluido no inflamable, no reactivo, u opcionalmente que comprende además, entre el gas y el fluido hidráulico (13) dentro de cada uno de los recipientes primero y segundo de compresión/expansión (20, 30), un segundo fluido que no es inflamable ni reactivo, y que tiene una densidad más baja y una impermeabilidad más alta que el fluido hidráulico (13).
10. El sistema (5) de almacenamiento/recuperación de energía de la reivindicación 9, en el que el segundo fluido es un refrigerante basado en etilenglicol/agua/inhibidor.
11. El sistema (5) de almacenamiento/recuperación de energía de la reivindicación 9, en el que el fluido hidráulico (13) y el segundo fluido están separados por un pistón aislador
12. El sistema (5) de almacenamiento/recuperación de energía de la reivindicación 9, en el que el fluido hidráulico (13) y el segundo fluido están directamente adyacentes entre ellos.
13. El sistema (5) de almacenamiento/recuperación de energía de una de las reivindicaciones 11 y 12, en el que los recipientes primero y segundo de compresión/expansión (20, 30) están configurados de tal manera que el más pesado del fluido hidráulico (13) y del segundo fluido está por debajo del más ligero del fluido hidráulico (13) y del segundo fluido.
14. El sistema (5) de almacenamiento/recuperación de energía de la reivindicación 12, en el que el fluido hidráulico (13) se selecciona del grupo que consiste en: aceites de halocarbonados con una densidad de aproximadamente 1,9 g/cc, u opcionalmente en el que el segundo fluido es un fluido iónico con una densidad de aproximadamente 1,5 g/cc.
15. El sistema (5) de almacenamiento/recuperación de energía de la reivindicación 1, en el que el subsistema (10) de generador/motor comprende un generador/motor unitario, u opcionalmente en el que el subsistema (10) de generador/motor comprende tanto un generador como un motor, cada uno de los cuales está conectado mecánicamente a la bomba hidráulica (12).

Fig. 1

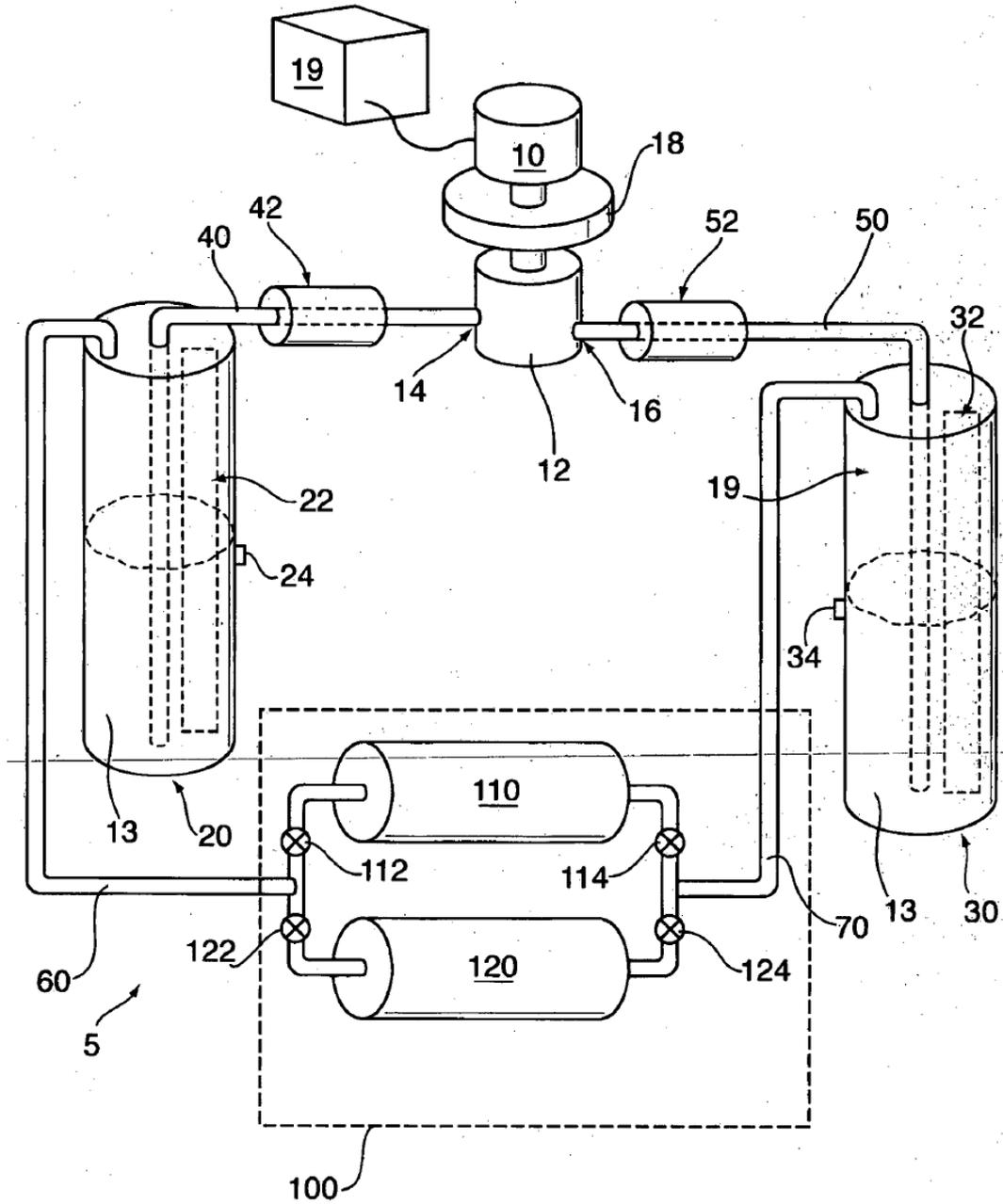
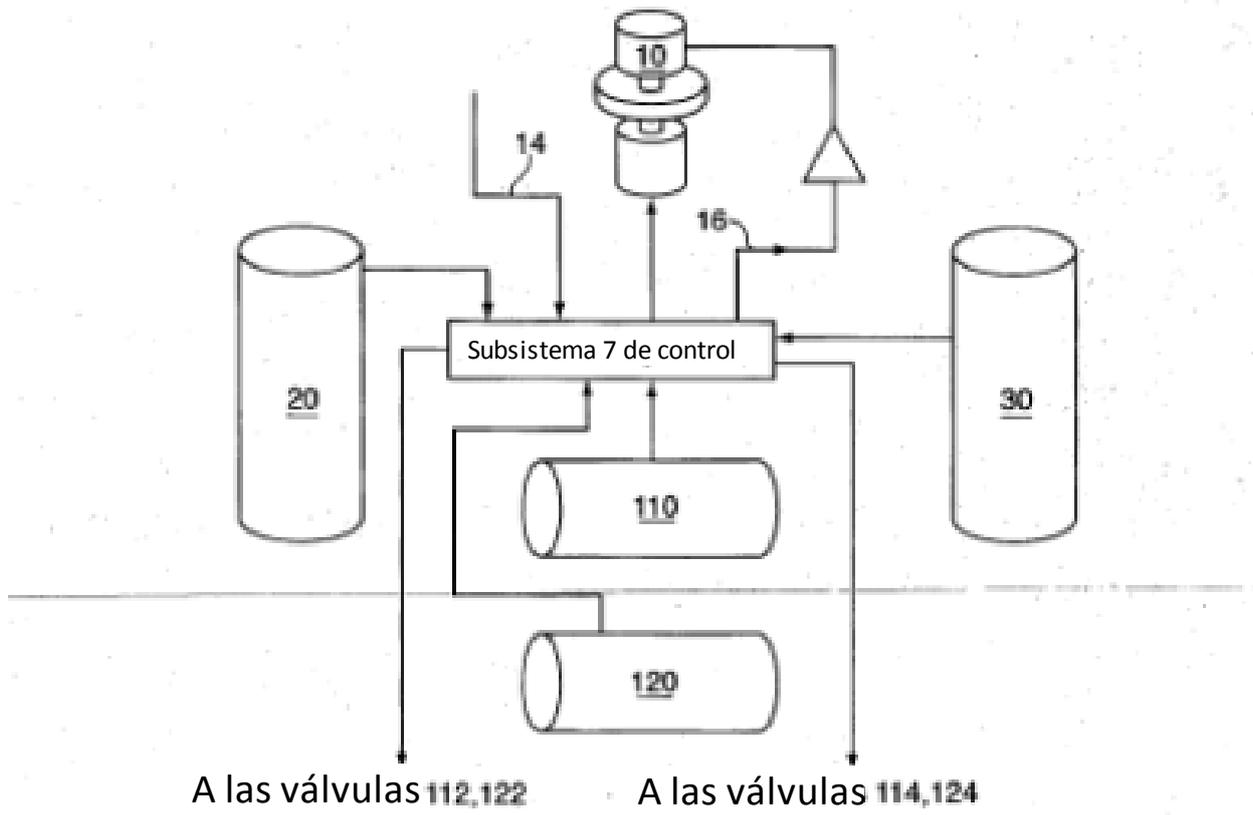


Fig. 2



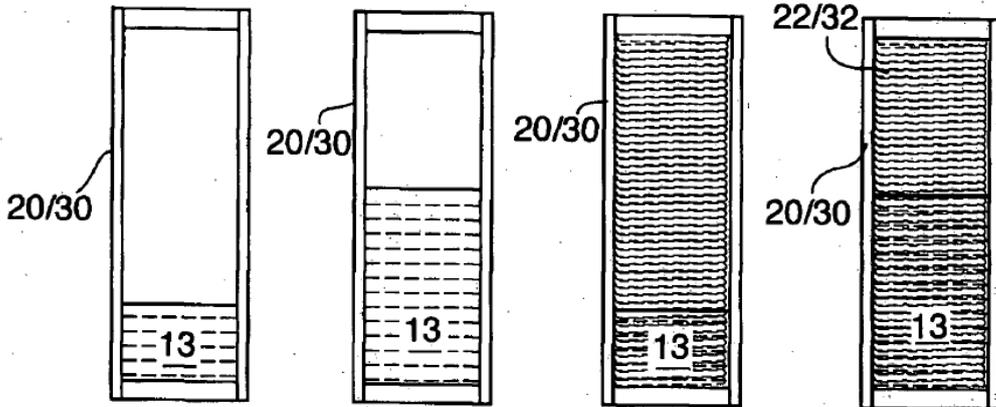


Fig. 3A

Fig. 3B

Fig. 3C

Fig. 3D

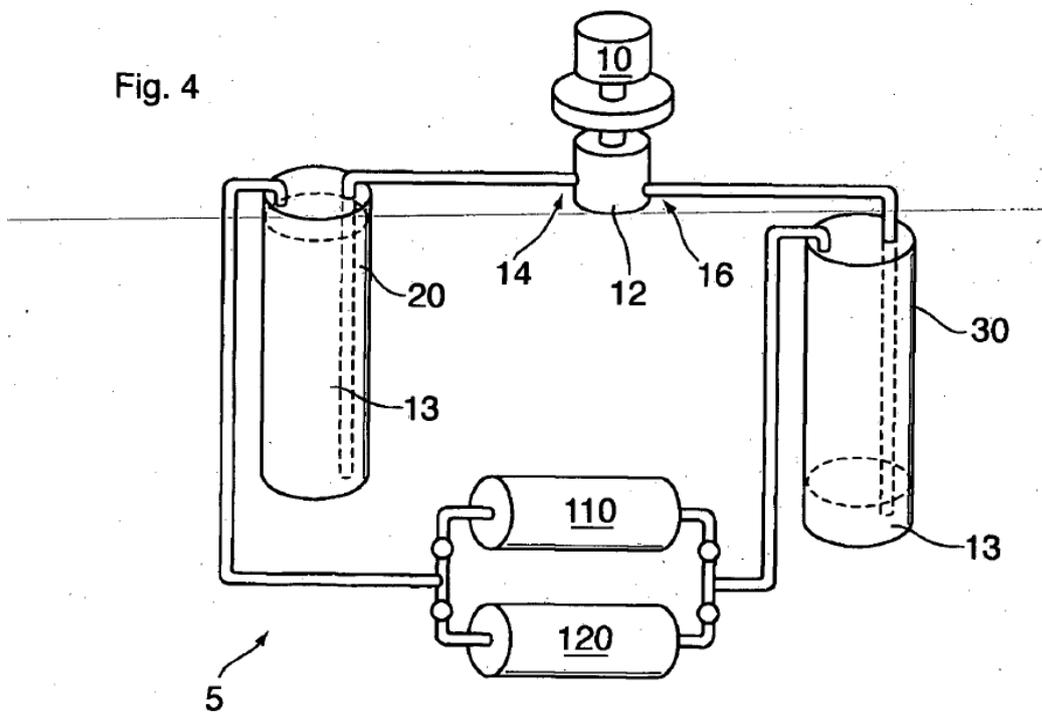


Fig. 4

Fig. 5

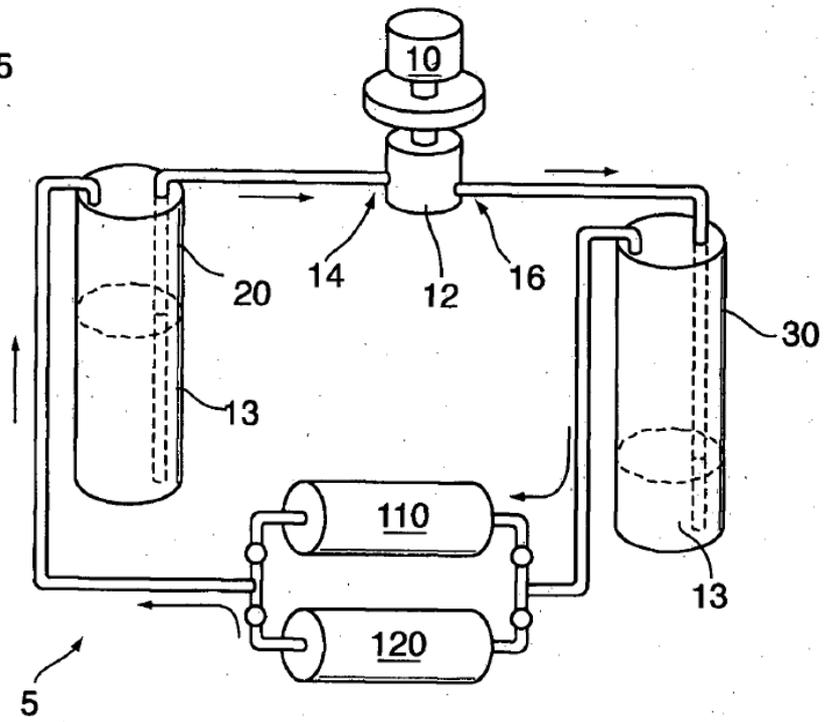


Fig. 6

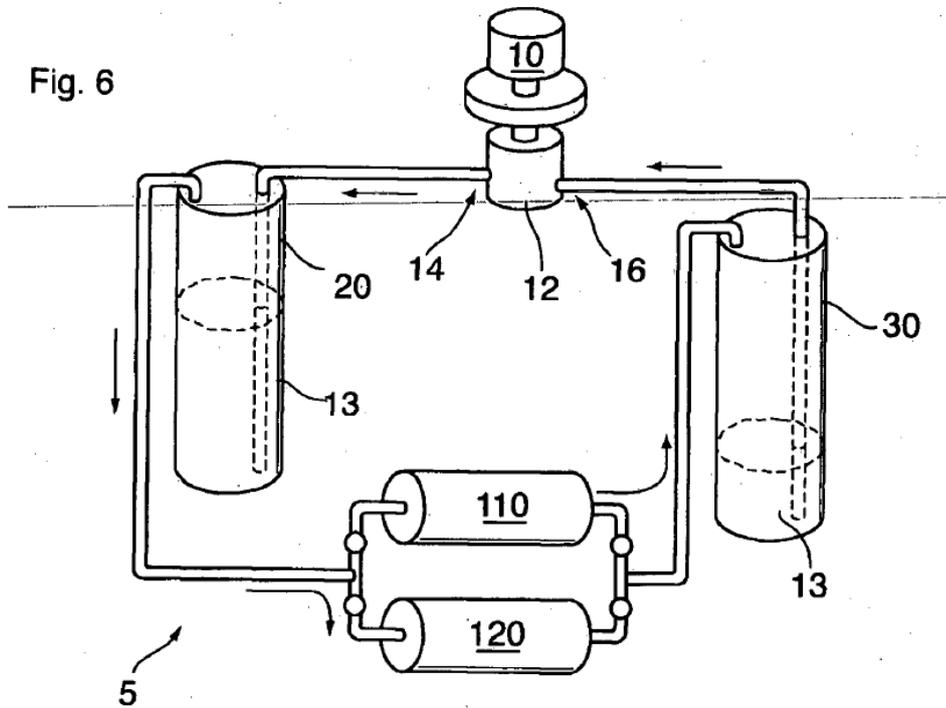


Fig. 7

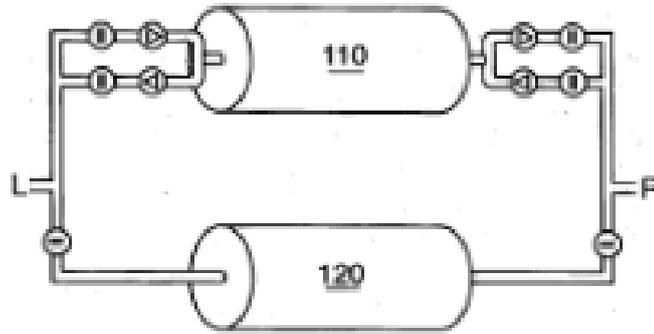


Fig. 8

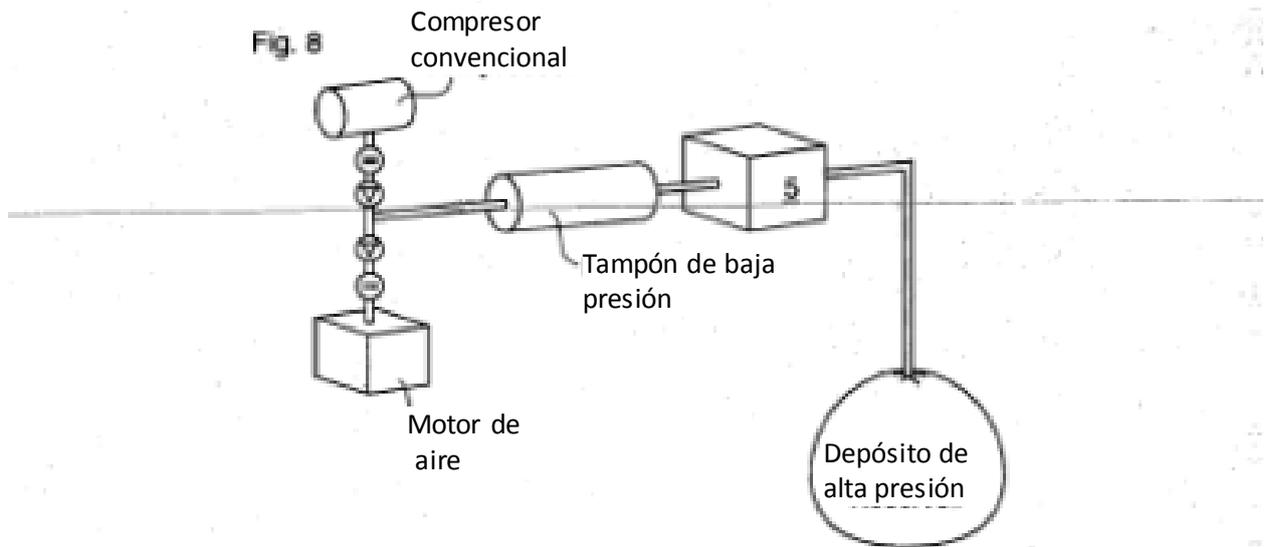


Fig. 9

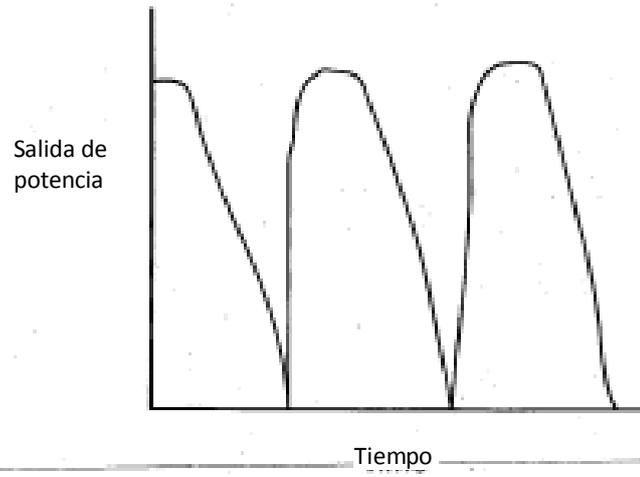


Fig. 10

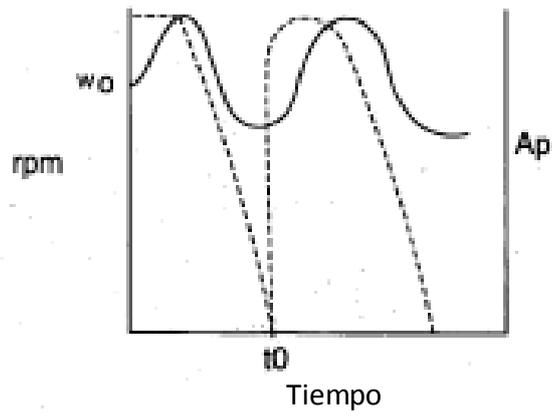


Fig. 11

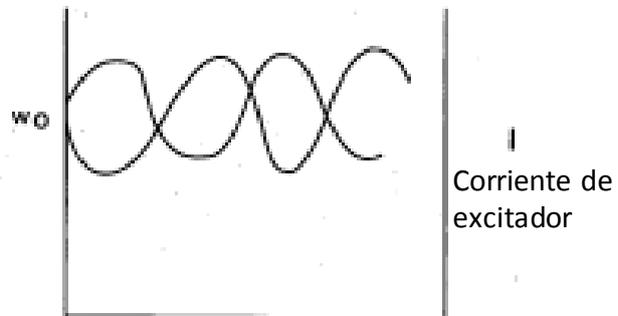


Fig. 12

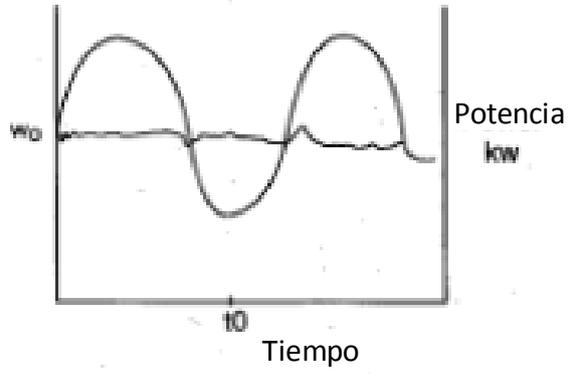


Fig. 13

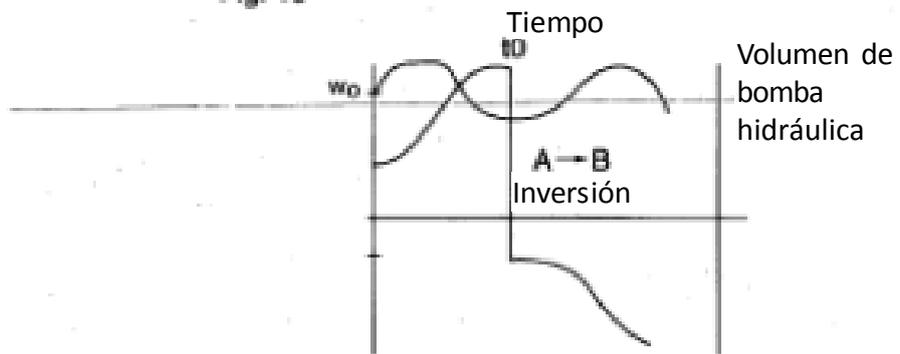


Fig.14

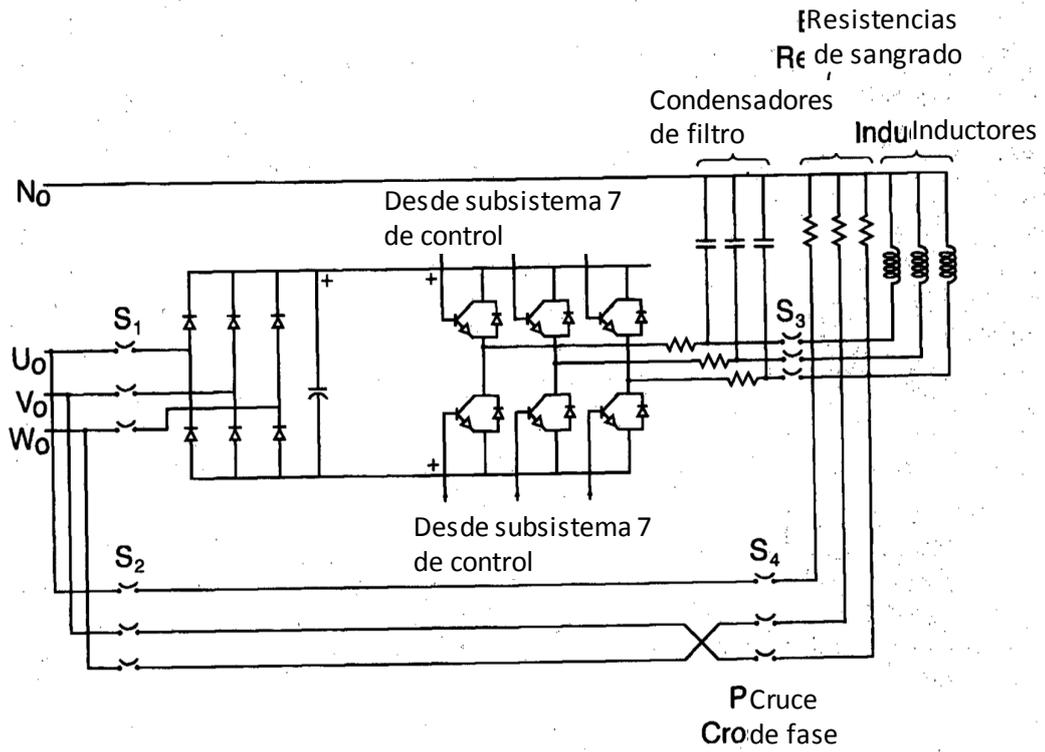


Fig.15

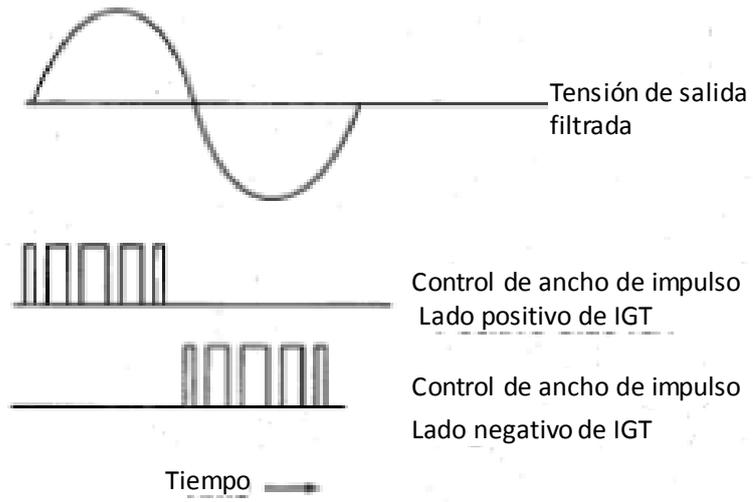


Fig.16

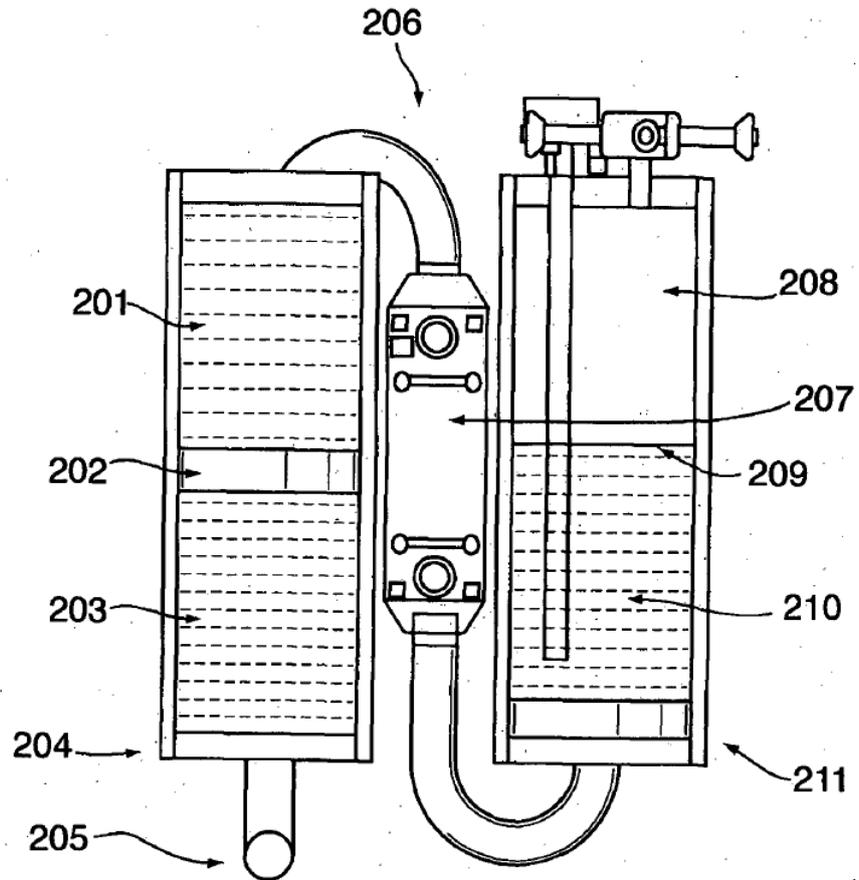


Fig.17

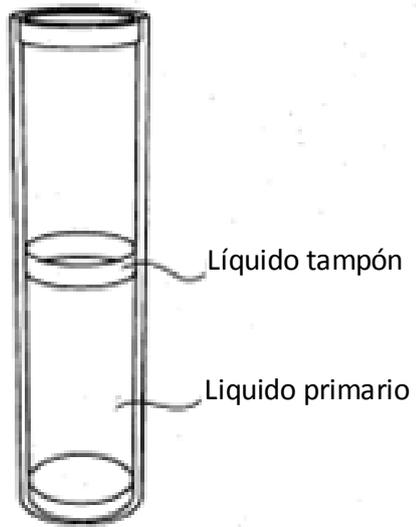


Fig.18

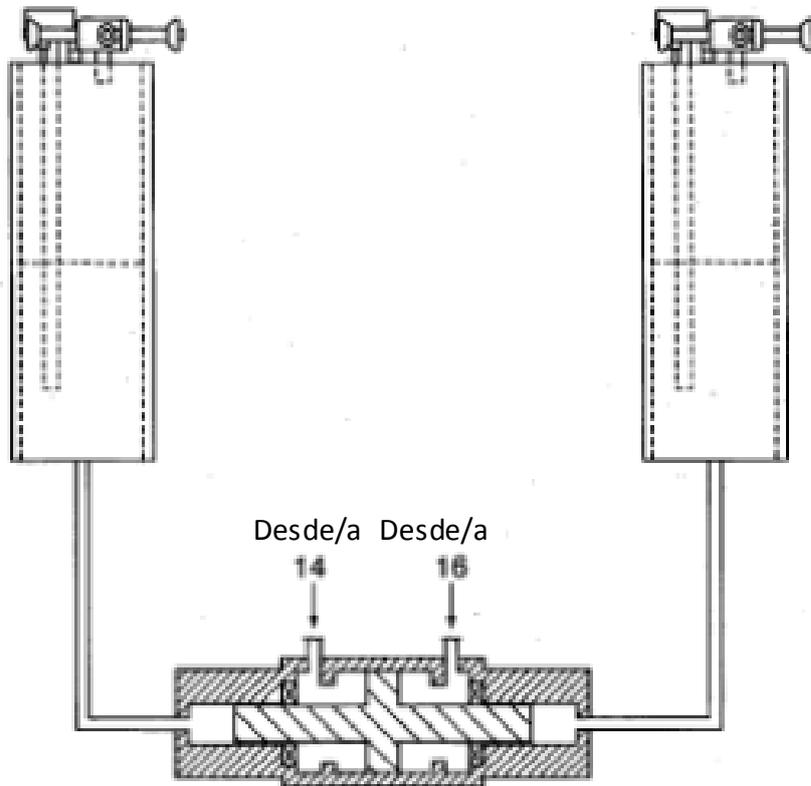


Fig.19

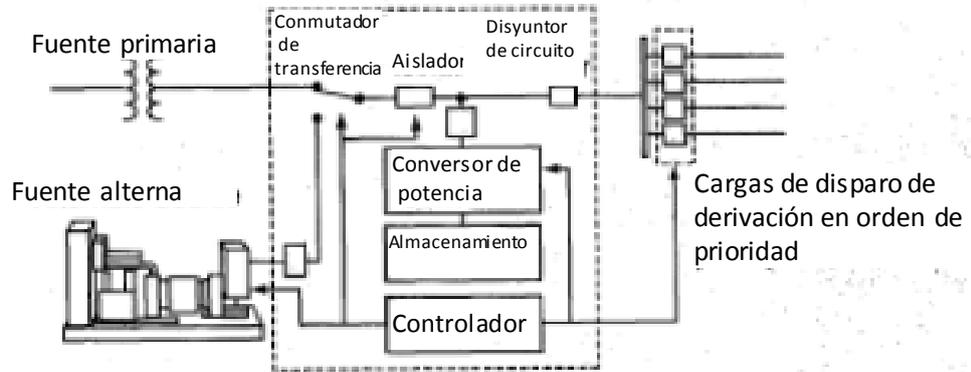


Fig.20

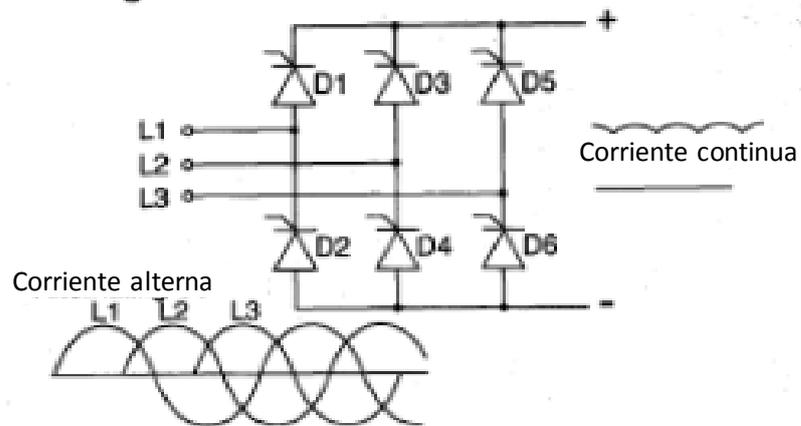


Fig.21

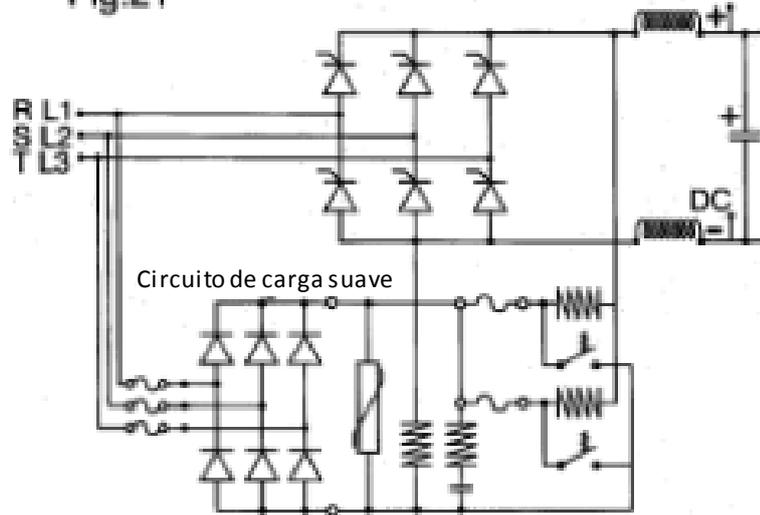


Fig.22

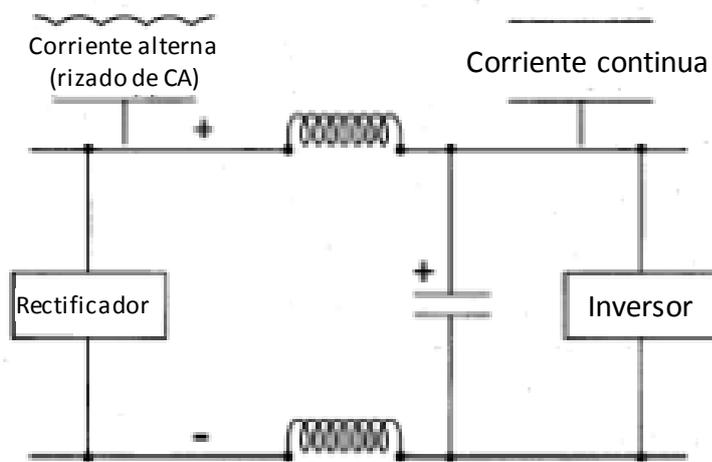


Fig.23

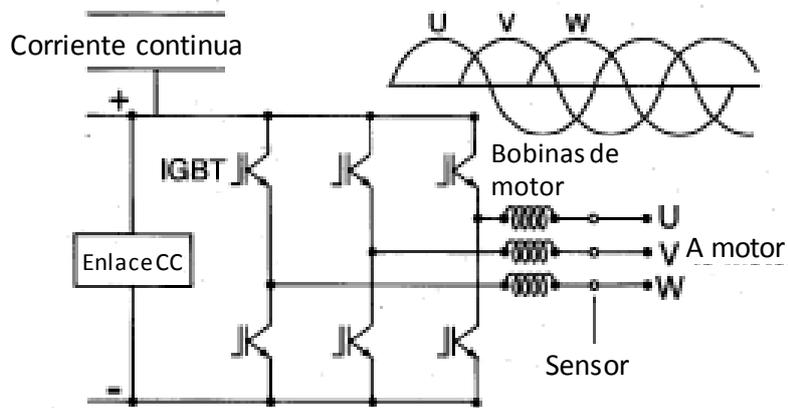


Fig.24

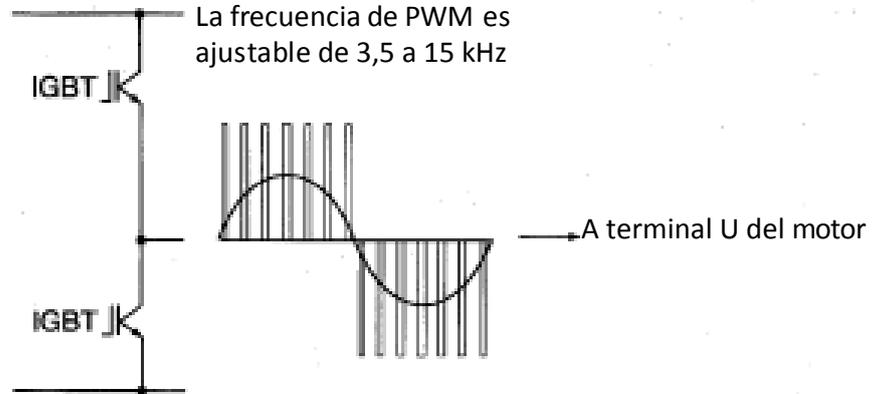


Fig.25

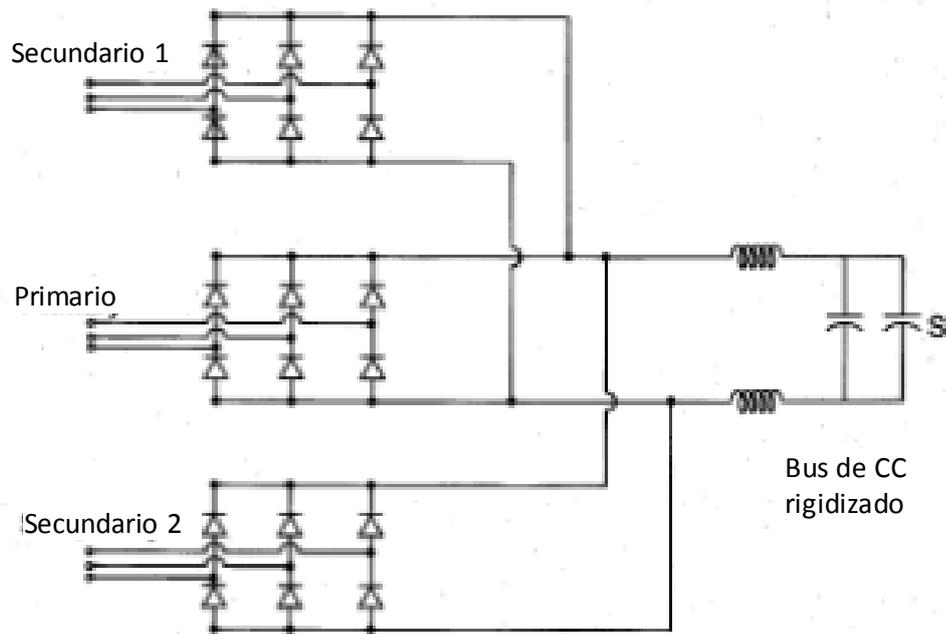


Fig.26

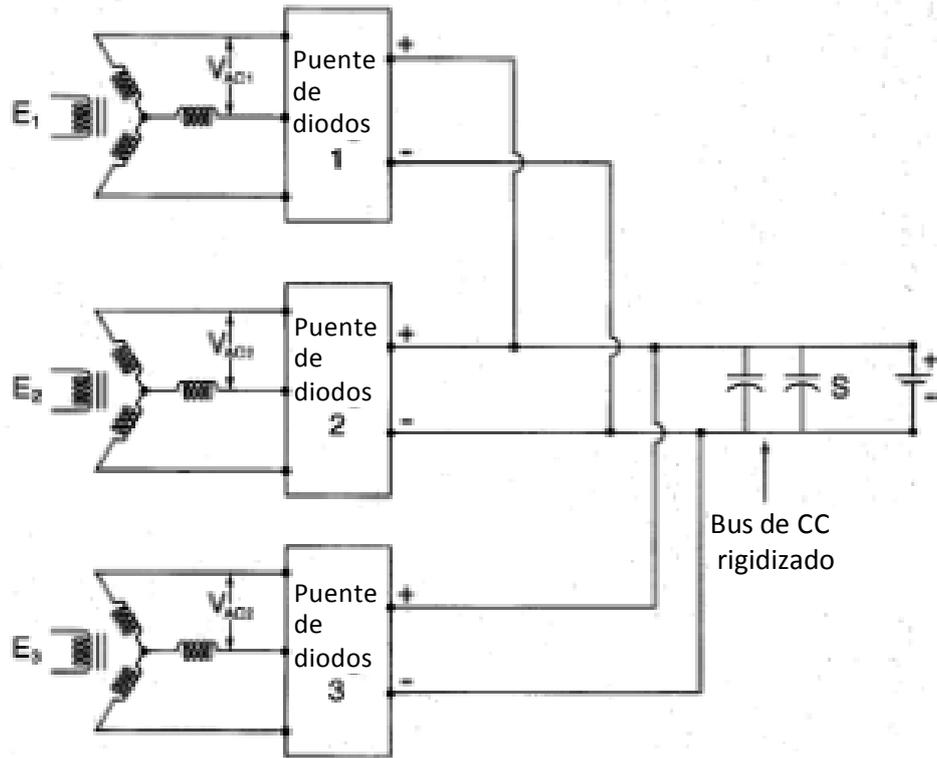


Fig.27

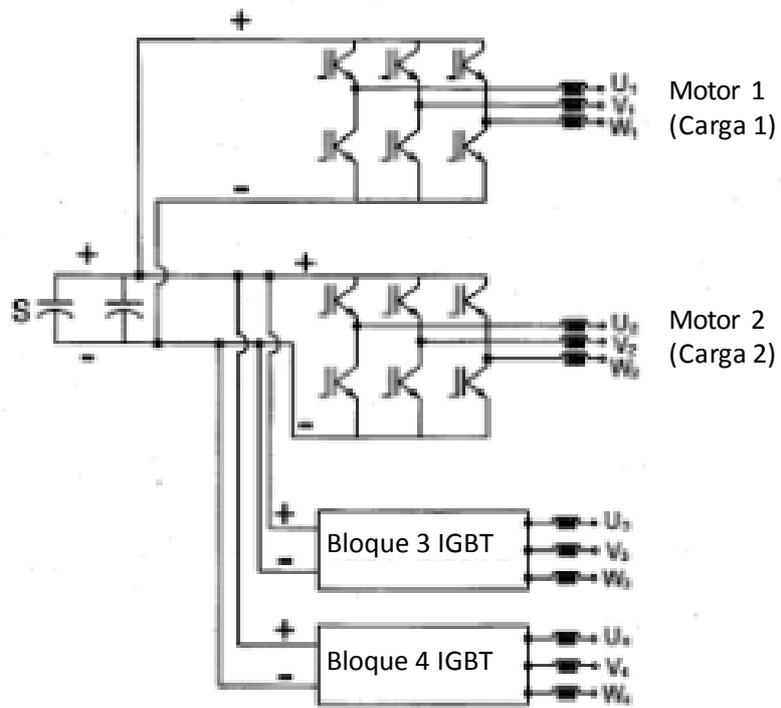


Fig.28

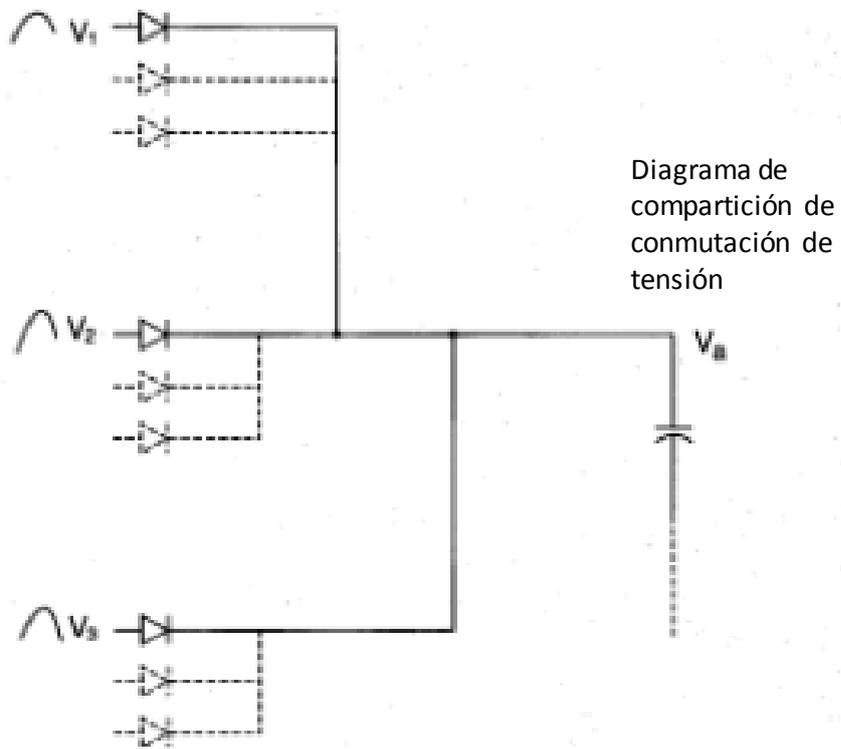


Fig.29

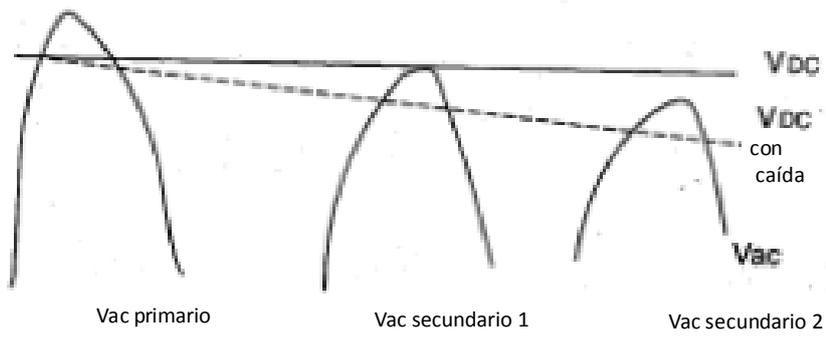


Fig.30

