

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 673 976**

51 Int. Cl.:

**F17C 7/04**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **06.09.2012 PCT/GB2012/052189**

87 Fecha y número de publicación internacional: **14.03.2013 WO13034908**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.09.2012 E 12775277 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.05.2018 EP 2753861**

54 Título: **Método y aparato para almacenamiento de energía**

30 Prioridad:

**06.09.2011 GB 201115336**

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

**26.06.2018**

73 Titular/es:

**HIGHVIEW ENTERPRISES LIMITED (100.0%)  
Suite A, 6 Honduras Street  
London, EC1Y 0TH, GB**

72 Inventor/es:

**MORGAN, ROBERT;  
NELMES, STUART;  
CASTELLUCCI, NICOLA y  
BRETT, STEPHEN GARETH**

74 Agente/Representante:

**IZQUIERDO BLANCO, María Alicia**

**ES 2 673 976 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).

## Método y aparato para almacenamiento de energía

### Descripción

#### 5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a sistemas de almacenamiento de energía criogénicos y, en particular, a métodos para capturar energía térmica, tal como energía fría, y reutilizar dicha energía capturada.

#### 10 Antecedentes de la invención

Las redes (o redes) de transmisión y distribución de electricidad deben equilibrar la generación de electricidad con la demanda de los consumidores. Esto normalmente se logra modulando el lado de la generación (lado de la oferta) encendiendo y apagando las estaciones de energía, y haciendo funcionar algunas a carga reducida. Como la mayoría de las centrales térmicas y nucleares existentes son más eficientes cuando funcionan continuamente a plena carga, existe una penalización de eficiencia al equilibrar el lado de la oferta de esta manera. La introducción esperada de una importante capacidad de generación renovable intermitente, tales como turbinas eólicas y colectores solares, en las redes complicará aún más el equilibrio de las redes, creando incertidumbre en la disponibilidad de partes de la flota de generación. Un medio de almacenamiento de energía durante los períodos de baja demanda para su uso posterior durante los períodos de alta demanda, o durante el bajo rendimiento de los generadores intermitentes, sería de gran beneficio para equilibrar la red y proporcionar seguridad del suministro.

Los dispositivos de almacenamiento de energía tienen tres fases de operación: carga, almacenamiento y descarga. Los dispositivos de almacenamiento de energía generan potencia (descarga) de forma altamente intermitente cuando hay una escasez de capacidad de generación en la red de transmisión y distribución. Esto puede señalizarse al operador del dispositivo de almacenamiento mediante un alto precio para la electricidad en el mercado local de energía o mediante solicitud de la organización responsable del funcionamiento de la red para capacidad adicional. En algunos países, tal como el Reino Unido, el operador de red establece contratos para el suministro de reservas de respaldo a la red con operadores de centrales eléctricas con capacidad de inicio rápido. Dichos contratos pueden cubrir meses o incluso años, pero generalmente el tiempo que el proveedor de energía estará operando (generación de energía) es muy corto. Esto se ilustra en la figura 1, lo que muestra un perfil de operaciones típico para un dispositivo de almacenamiento. Además, un dispositivo de almacenamiento puede proporcionar un servicio adicional para proporcionar carga adicional en momentos de exceso de suministro de energía a la red a partir de generadores renovables intermitentes. La velocidad del viento suele ser alta durante la noche cuando la demanda es baja. El operador de red debe organizar la demanda adicional en la red para utilizar el exceso de suministro, a través de señales de bajo precio de energía o contratos específicos con los consumidores o restringir el suministro de energía desde otras estaciones o parques eólicos. En algunos casos, especialmente en mercados en los que los generadores eólicos están subvencionados, el operador de red tendrá que pagar a los operadores de los parques eólicos para que "apaguen" el parque eólico. Un dispositivo de almacenamiento ofrece al operador de red una carga adicional útil que puede usarse para equilibrar la red en tiempos de exceso de suministro.

Se han desarrollado varias tecnologías de almacenamiento, que incluyen bombeo hidráulico, almacenamiento de energía de aire comprimido (CAES) y baterías. El bombeo hidráulico es la tecnología de almacenamiento de energía más establecida. Almacena energía potencial hidráulica bombeando agua desde un depósito inferior a un depósito elevado (la fase de carga), utilizando electricidad a bajo coste durante los períodos de baja demanda. El agua se mantiene en el depósito hasta un período de alta demanda (la fase de almacenamiento). En el momento de la demanda máxima y el precio máximo, el agua se libera a través de una turbina que genera electricidad (la fase de descarga). El bombeo hidráulico proporciona una alta eficiencia y un coste de operación relativamente bajo para almacenar electricidad. El requisito de dos grandes depósitos a diferentes elevaciones y el alto contenido de ingeniería civil asociado pueden ocasionar que los costes instalados sean muy altos y limita el número de sitios adecuados disponibles, muchos de los cuales ya han sido explotados.

El CAES usa la energía potencial del aire comprimido para almacenar electricidad. La electricidad de bajo coste se utiliza para comprimir el aire que luego se almacena en un gran recipiente de almacenamiento (generalmente una caverna subterránea). Durante la fase de descarga, el aire se libera del recipiente de almacenamiento, se calienta y luego se expande a través de una turbina que impulsa un generador para producir electricidad. Teóricamente, el CAES proporciona una solución de eficiencia relativamente alta y bajos costes de capital para el almacenamiento de energía eléctrica. Sin embargo, CAES está restringido por el requisito de un gran recipiente de almacenamiento para el aire almacenado.

Las baterías almacenan electricidad como energía potencial química y pueden responder rápidamente a los cambios de carga, mejorando la estabilidad del sistema. No están geográficamente restringidos en la forma en que se bombea la energía hidroeléctrica y CAES, sin embargo, tienen un coste relativamente alto y su eficiencia disminuye con el tiempo, lo que limita su vida útil.

65

Para que un dispositivo de almacenamiento sea comercialmente viable, los siguientes factores son importantes: costes de capital por MW (potencia nominal), MWH (capacidad de energía), eficiencia del ciclo de ida y vuelta y tiempo de vida con respecto al número de ciclos de carga y descarga que se pueden esperar de la inversión inicial. Para extensas aplicaciones de escala de servicios también es importante que el dispositivo de almacenamiento sea geográficamente móvil.

Cada una de las tecnologías descritas anteriormente tiene ventajas y desventajas frente a los criterios anteriores. Otra tecnología de almacenamiento que ofrece una serie de ventajas es el almacenamiento de energía utilizando un criógeno, tal como el aire líquido o el almacenamiento de energía criogénica. En la fase de carga, la electricidad de bajo coste en períodos de demanda baja o suministro excesivo desde los generadores renovables intermitentes se utiliza para licuar aire, que luego se almacena como un fluido criogénico en un tanque de almacenamiento y posteriormente se libera para accionar una turbina y producir electricidad durante la fase de descarga o recuperación de energía. La tecnología se basa en el potencial de energía del diferencial de temperatura entre el aire en su fase líquida y la fase gaseosa a temperatura ambiente. Las ventajas de almacenar energía en el aire líquido son que el aire líquido es denso en energía en comparación con el aire comprimido y se almacena a baja presión; por lo tanto, el almacenamiento es considerablemente más barato; tales sistemas no están limitados geográficamente, ya que los tanques de almacenamiento son relativamente pequeños y están ubicados con facilidad, y los costes generales de capital son bajos.

Los documentos WO2007-096656A1 y GB1100569.1 desvelan dispositivos de almacenamiento de energía criogénica (CPSD) que utilizan un fluido criogénico, tal como aire líquido o nitrógeno líquido, como medio de almacenamiento para almacenar energía como energía potencial térmica para proporcionar servicios de almacenamiento de energía y soporte de red a las redes de transmisión y distribución de electricidad. El sistema de energía criogénica (CES) descrito en el documento WO2007-096656A1 es un primer tipo de dispositivo de almacenamiento de energía criogénico (CPSD) y es un dispositivo de almacenamiento totalmente integrado que solo requiere electricidad y, opcionalmente, calor como entrada. El conjunto criogénico descrito en el documento GB1100569.1 es un segundo tipo de dispositivo de almacenamiento de energía criogénica (CPSD) y es un dispositivo simplificado de generación/almacenamiento de energía que utiliza fluido criogénico fabricado por una planta industrial de licuefacción de gas a distancia desde el conjunto criogénico, que se envía al sitio conjunto criogénico por tubería o tanque.

La diferencia clave entre el CES y el conjunto criogénico es que el ciclo de CES integrado permite la captura de la energía fría utilizada para evaporar y calentar el criógeno durante la fase de recuperación de energía (descarga), que se almacena y luego se utiliza durante la fase de carga para mejorar la producción de aire líquido, un concepto conocido como recuperación en frío. Los inventores han descubierto que al capturar y reciclar esta energía fría, la eficacia de ida y vuelta del CES puede ser el doble que la del conjunto criogénico.

La presente invención aborda la implementación práctica de reciclado en frío dentro de la CES, de modo que la cantidad de frío recuperado y reciclado, y por lo tanto la eficacia de ida y vuelta del ciclo global, se maximice de una manera práctica y económica. Varias publicaciones describen dispositivos CES similares. Estas incluyen:

1. Documento US 6.920.759 B2
2. E.M. Smith y col.; "Storage of Electrical Energy Using Supercritical Liquid Air" and Discussion thereof; Proc Instn Mech Engrs Vol 191 27/77, pág. 289–298, D57–D65; 1977

Estas dos publicaciones describen ciclos similares, que se muestran esquemáticamente en la figura 2. El líquido criogénico se almacena en un tanque de almacenamiento 100. Durante la fase de recuperación de energía del ciclo, el líquido criogénico se bombea primero a alta presión usando una bomba 105. A continuación, el líquido criogénico se evapora y la energía térmica fría se almacena en un regenerador, o acumulador térmico 102. Después, se recupera energía del flujo gaseoso resultante a través de una turbina 106. Durante la fase de relicuefacción del ciclo, el tanque de almacenamiento de líquido 100 se reabastece; el gas caliente a alta presión se hace circular a través del regenerador en frío y se expande a través de una válvula de expansión 101 para fabricar el líquido que se almacena en el tanque de almacenamiento 100.

Los presentes inventores han observado que en los procesos de CES descritos en el estado actual de la técnica, la transferencia de energía térmica al almacenamiento térmico desde un líquido criogénico durante la recuperación de energía, o flujo gaseoso durante la licuefacción, se realiza a presión alta. Esto tiene la ventaja de una alta eficiencia térmica potencial, especialmente si el calor se transfiere directamente del fluido de trabajo al acumulador térmico. En el pasado se han propuesto dos conceptos de diseño de almacenamiento a alta presión:

1. Contacto directo del fluido de trabajo con los medios de almacenamiento (según lo descrito en E.M Smith et al (*ibid.*));
2. Contacto indirecto del fluido de trabajo con los medios de almacenamiento (como se describe en el documento US 6.920.759 B2).

- El primer concepto tiene la ventaja de un rendimiento térmico de alto potencial en el sentido EN que los fluidos de calentamiento o enfriamiento están en contacto directo con los medios de almacenamiento, típicamente varillas de acero según lo descrito por Smith y col., o un lecho compacto de partículas de roca. Los presentes inventores creen que los sistemas de CES comerciales necesitarán estar a escala de utilidad, de un mínimo de 10 MW y, preferentemente, 100 MW o superior. El acumulador térmico será, por lo tanto, grande, con una dimensión lineal de 10 m o más. Las dificultades prácticas de fabricar un recipiente de contención de presión de bajo coste capaz de resistir presiones de al menos 100 bar o más típicamente 150 bar son, en opinión de los inventores, prohibitivas. Por esta razón, los inventores creen que este enfoque no es viable.
- Con el segundo concepto, el problema de la contención de la presión se resuelve en gran medida porque solo los tubos que contienen el fluido de transferencia de calor están a alta presión. Un diseño típico se muestra esquemáticamente en la figura 3. El fluido de transferencia de calor está contenido en tubos de alta presión 202 y la energía térmica se transfiere a través de los tubos por conducción a los medios de almacenamiento 203 que típicamente serían agua, virutas de roca u hormigón. Es posible un recipiente de contención 204 de bajo coste, ya que el recipiente solo necesita proporcionar soporte mecánico para los medios de almacenamiento y funcionará a baja presión. En la opinión de los presentes inventores, este diseño tiene varios problemas. En primer lugar, el diseño será complejo, requiriendo muchas juntas soldadas de alta presión para producir un componente costoso. En segundo lugar, la resistencia térmica entre los tubos de alta presión y los medios de almacenamiento podría dar como resultado gradientes de temperatura normales a la trayectoria del flujo y un rendimiento térmico deficiente.
- Los equipos están clasificados como equipos presurizados por las autoridades autorizadas cuando funcionan a una presión manométrica superior a 4 bar. El equipo que funciona a una presión inferior a 4 bar se clasifica como presurizado, pero puede ser de tipo aprobado y no requiere el examen de una autoridad autorizada. Con una presión inferior a 0,5 bar, los equipos no se clasifican como equipos a presión.
- Por lo tanto, la presente invención aborda el problema de cómo recuperar de manera efectiva la energía térmica fría del proceso de recuperación de energía, almacenar la energía térmica fría recuperada y utilizar de manera efectiva la energía térmica fría recuperada para reducir el coste energético de la fabricación de más criógeno para almacenamiento posterior y reutilizar en el proceso de recuperación de energía, mejorando la eficiencia general (ida y vuelta) del sistema de almacenamiento de energía.
- La presente invención también aborda el problema de cómo recuperar de manera efectiva la energía térmica del proceso de licuefacción, almacenar la energía térmica recuperada y utilizar de manera efectiva la energía térmica recuperada para aumentar el rendimiento del proceso de recuperación de energía, mejorando de nuevo la eficiencia general (ida y vuelta) del sistema de almacenamiento de energía.
- El documento US 2009/282840 desvela sistemas para almacenar energía y usar la energía almacenada para generar energía eléctrica o impulsar una hélice. En particular, se describe un método para almacenar energía que comprende: proporcionar una entrada gaseosa, producir un criógeno a partir de la entrada gaseosa; almacenar el criógeno; expandiendo el criógeno; usar el criógeno expandido para impulsar una turbina y recuperar energía fría de la expansión del criógeno.
- El documento EP 2236822 desvela un método bajo demanda para regular y suavizar la salida eléctrica de un convertidor de energía y un dispositivo para llevar a cabo este método. El método y el dispositivo proporcionan la regulación de una potencia de salida eléctrica de un generador impulsado por el viento o el agua o la energía solar de acuerdo a las necesidades. El dispositivo comprende una unidad de licuefacción con un tanque criogénico, que está acoplado a un convertidor de energía. Una unidad de gasificación en el tanque suministra gas a una turbina para impulsar un generador que proporciona electricidad. Se proporciona un recipiente de dosificación y al menos dos evaporadores entre la unidad de licuación y la turbina.
- El documento FR2489411 describe un sistema de almacenamiento de energía fuera de máximos que tiene unidades de licuefacción y vaporización de aire para permitir que la energía se almacene como aire líquido a bajo volumen. Un motor principal acciona un compresor de aire cuando su energía no es necesaria para la producción de potencia directa. El aire comprimido pasa a través de un licuefactor que incluye intercambiadores de calor y un motor de expansión. El aire líquido se almacena en un depósito con válvulas de entrada y salida controladas. Cuando se debe extraer energía del depósito, el aire líquido entra en una bomba que aumenta su presión y la entrega a un intercambiador de calor en el que se vaporiza. El aire de alta presión resultante impulsa una serie de turbinas con recalentadores entre ellas. Las turbinas están acopladas a un generador u otra carga.
- El documento US 2003/101728 desvela un sistema de generación de energía eléctrica de turbina de gas y almacenamiento de energía que incluye un tanque de almacenamiento de aire líquido para almacenar aire líquido, una instalación de vaporización para vaporizar el aire líquido almacenado en el tanque de almacenamiento de aire líquido, una cámara de combustión para generar un gas quemado por combustión del aire vaporizado por la instalación de vaporización y un combustible, una turbina de gas impulsada por el gas combustionado generado en la cámara de combustión, y un generador de turbina de gas conectado a la turbina de gas para generar energía eléctrica.

El documento FR 2916101 desvela una instalación para almacenar energía eléctrica que comprende: primer y segundo cerramientos que contienen un gas y materiales refractarios porosos capaces de transferir calor por contacto entre dichos materiales refractarios y medios de expansión para el gas que circula en las tuberías entre cada uno de los extremos de un cerramiento conectado a uno extremo del material poroso y un gas que fluye a través de dichos cerramientos.

### **Sumario de la invención**

En un aspecto, la presente invención proporciona un sistema de almacenamiento de energía criogénica que comprende:

un tanque de almacenamiento criogénico para almacenar un criógeno;  
una bomba en comunicación fluida con el tanque de almacenamiento criogénico, en la que la bomba es para comprimir el criógeno del tanque de almacenamiento;  
un primer acumulador térmico que tiene una primera ruta a su través para transportar un primer fluido de transferencia de calor;  
un primer intercambiador de calor que tiene:

una segunda ruta a su través para transportar el primer fluido de transferencia de calor a la primera ruta, y  
una tercera ruta a su través para transportar el criógeno comprimido,  
en el que el primer fluido de transferencia de calor es para capturar energía térmica fría del criógeno para calentar el criógeno, y para transportar dicha energía térmica fría capturada al primer acumulador térmico;

un sistema de recuperación de energía que incluye una o más turbinas de expansión para expandir el criógeno calentado para generar energía; y  
un licuefactor colocalizado que incluye:

un segundo intercambiador de calor que tiene:

una cuarta ruta a su través para transportar el primer fluido de transferencia de calor desde la primera ruta, y  
una quinta ruta a su través para transportar un primer fluido de trabajo para capturar la energía térmica fría del primer fluido de transferencia de calor y convertir el primer fluido de trabajo en un nuevo criógeno;  
y  
una sexta ruta para transportar el nuevo criógeno al tanque de almacenamiento criogénico.

Preferentemente, el primer fluido de transferencia de calor tiene una presión manométrica de menos de 4 bar. Preferentemente, el primer fluido de transferencia de calor tiene una presión manométrica de menos de 1 bar. Más preferentemente, el primer fluido de transferencia de calor tiene una presión manométrica de menos de 0,5 bar.

El primer fluido de transferencia de calor puede incluir el gas de escape de la etapa de turbina final de la una o más turbinas de expansión en el sistema de recuperación de energía. En este caso, el criógeno se convierte en el primer fluido de trabajo cuando se agota desde el sistema de recuperación de energía.

El sistema de almacenamiento de energía criogénica puede comprender además:

un segundo acumulador térmico que tiene una séptima ruta a su través para transportar un segundo fluido de transferencia de calor;  
un tercer intercambiador de calor que tiene:

Una octava ruta a su través para transportar el segundo fluido de transferencia de calor a la séptima ruta, y  
una novena ruta a su través para transportar el criógeno calentado,  
donde el segundo fluido de transferencia de calor es para capturar más energía térmica fría desde el criógeno calentado para calentar más el criógeno, y para transportar la energía térmica fría capturada adicional al segundo acumulador térmico; y

un cuarto intercambiador de calor que tiene:

una décima ruta a su través para transportar el segundo fluido de transferencia de calor desde la séptima ruta, y  
una undécima ruta a su través para transportar un segundo fluido de trabajo para capturar energía térmica fría desde el segundo fluido de transferencia de calor.

El sistema de almacenamiento de energía criogénica puede comprender además una ruta de escape de almacenamiento térmico para transportar al menos una porción de una corriente de escape desde el primer acumulador térmico a la segunda ruta.

El criógeno puede calentarse mediante el primer fluido de transferencia de calor desde la fase líquida a la fase gaseosa. Como alternativa, si el criógeno es un fluido supercrítico, el criógeno puede calentarse sin un cambio de fase.

5 El licuefactor es un dispositivo de refrigeración para el enfriamiento de un fluido de trabajo gaseoso a su estado líquido. El fluido de trabajo comprende, preferentemente, aire, y el criógeno comprende, preferentemente, aire líquido.

10 El segundo fluido de transferencia de calor puede tener una presión manométrica de menos de 4 bar preferentemente de menos de 1 bar y, más preferentemente, de menos de 0,5 bar.

La bomba puede usarse para comprimir el criógeno a una presión manométrica de más de 30 bar.

15 El segundo fluido de transferencia de calor puede ser gaseoso o líquido. El segundo fluido de transferencia de calor puede comprender metanol, etanol o propanol.

20 El segundo intercambiador de calor y el cuarto intercambiador de calor pueden ser el mismo intercambiador de calor. El segundo fluido de trabajo puede ser el mismo que el primer fluido de trabajo. La undécima ruta puede ser para convertir el segundo fluido de trabajo en un nuevo criógeno y para transportar el nuevo criógeno al tanque de almacenamiento criogénico.

25 El licuefactor comprende una planta de licuefacción criogénica que puede incluir una turbina de expansión y el sistema puede incluir, además, una duodécima ruta para transportar gases de escape a una presión manométrica de menos de 4 bar desde la turbina de expansión dentro de la planta de licuefacción hasta la primera ruta a través del primer acumulador térmico.

30 La planta de licuefacción puede incluir además uno o más compresores de gas y el sistema puede incluir además una decimotercera ruta para transportar gas comprimido desde el uno o más compresores de gas dentro de la planta de licuefacción a la turbina de expansión dentro de la planta de licuefacción. El uno o más compresores de gas comprenden un compresor de gas principal adaptado para comprimir el gas ambiental a una presión de al menos 5 bar y un compresor de gas de reciclado adaptado para comprimir adicionalmente el gas a una presión de al menos 25 bar.

35 El cuarto intercambiador de calor puede comprender un prerrefrigerador para la turbina de expansión dentro de la planta de licuefacción. Como alternativa, el cuarto intercambiador de calor puede comprender un prerrefrigerador para el uno o más compresores de gas dentro de la planta de licuefacción.

40 Como alternativa, el cuarto intercambiador de calor puede comprender uno o más refrigeradores intermedios para capturar la energía térmica desde una corriente de salida de un respectivo uno o más compresores de gas dentro de la planta de licuefacción.

45 El tercer intercambiador de calor puede comprender uno o más intercambiadores de calor para capturar energía térmica fría desde una corriente de salida de una o más turbinas de expansión respectivas dentro del sistema de recuperación de energía.

Como alternativa, el tercer intercambiador de calor puede comprender uno o más sobrecalentadores para sobrecalentar una corriente de entrada de una o más turbinas de expansión respectivas dentro del sistema de recuperación de energía.

50 El segundo intercambiador de calor puede comprender un elemento de una caja fría dentro de la planta de licuefacción. La duodécima ruta puede pasar a través de la caja fría dentro de la planta de licuefacción. Una caja fría es, generalmente, un conjunto de intercambiadores de calor, tubos y vasos de presión contenidos en el interior de una estructura metálica llena de material de aislamiento de alta temperatura, tal como perlita.

55 El primer fluido de transferencia de calor puede ser un fluido gaseoso. El primer fluido de transferencia de calor puede ser aire seco, nitrógeno seco u otro gas adecuado o fluido refrigerante, tal como metano, metanol, propanol o propano.

60 La turbina de expansión dentro de la planta de licuefacción puede comprender una primera turbina de expansión caliente o una segunda turbina de expansión en frío. La primera turbina de expansión caliente funciona, típicamente, a una temperatura de entrada de entre la temperatura ambiente y -100 °C, que se expande a una temperatura de salida de entre -100 °C y -200 °C. La segunda turbina de expansión caliente funciona, típicamente, a una temperatura de entrada que es similar a la temperatura de salida de la turbina caliente, o la misma, que se expande a una temperatura cercana a la temperatura de condensación del fluido de trabajo. Las turbinas de expansión en caliente y en frío pueden ser turbinas cargadas por compresores, a menudo denominados compresores/expansores,

65

que proporcionan una refrigeración eficiente del fluido del proceso a través de la expansión casi adiabática del fluido y la recuperación del trabajo de expansión a través de una etapa de compresión coaxial.

5 El criógeno puede comprender aire líquido.

La primera, segunda y cuarta rutas pueden formarse como un sistema de circuito cerrado.

La séptima, octava y décima rutas pueden formarse como un sistema de circuito cerrado.

10 El sistema puede comprender además un compresor de aire para hacer circular el primer fluido de transferencia de calor.

El sistema puede comprender además un compresor de aire o compresor de gas o bomba de fluido para hacer circular el segundo fluido de transferencia de calor.

15 El cuarto intercambiador de calor puede comprender un módulo de refrigeración y el segundo fluido de trabajo puede comprender un refrigerante dentro del módulo de refrigeración, donde el refrigerante es para enfriar el fluido de trabajo en el segundo intercambiador de calor.

20 El primer y/o el segundo acumulador térmico pueden tener un diseño de geometría variable.

El primer acumulador térmico puede comprender un vaso de contención que contiene un medio de almacenamiento, y la primera ruta puede ser tal que el primer fluido de transferencia de calor esté en contacto directo con el medio de almacenamiento.

25 El segundo acumulador térmico puede comprender un vaso de contención que contiene un medio de almacenamiento, y la séptima ruta puede ser tal que el segundo fluido de transferencia de calor esté en contacto directo con el medio de almacenamiento.

30 Los sistemas de la presente invención son tales que la energía térmica fría puede recuperarse de manera efectiva desde el proceso de recuperación de energía de un sistema de almacenamiento de energía criogénica, almacenada en contacto directo con un acumulador térmico de presión muy baja y utilizado de forma eficaz. La energía térmica fría recuperada se puede utilizar en el proceso de licuefacción para reducir el consumo de energía del licuefactor y, por lo tanto, proporcionar un dispositivo de almacenamiento de energía eficiente y de bajo coste.

35 Además, los inventores han identificado los siguientes factores que deberían considerarse a la hora de desarrollar un sistema de acuerdo con la presente invención:

- 40 - manejar el acumulador térmico a presiones muy bajas para minimizar el coste del almacenamiento;  
 - usar fluidos de transferencia de calor, o una combinación de fluidos de transferencia de calor, que pueden funcionar entre temperaturas criogénicas (típicamente -180 °C), y temperaturas ambientales (típicamente 10 °C) sin un cambio de fase de líquido a sólido o de gas a líquido. Un cambio de fase en los medios de transferencia de calor podría complicar significativamente los circuitos de transferencia de calor y el diseño del acumulador térmico;  
 45 - minimizar componentes adicionales, tales como bombas, compresores e intercambiadores de calor, para minimizar los costes del capital de la planta; y  
 - no usar fluidos de transferencia de calor gaseosos, ya que estos tienen un impacto perjudicial sobre el consumo de energía parásita de la planta y, por lo tanto, la eficiencia.

50 A lo largo de la memoria descriptiva, los siguientes términos se definen de este modo:

Presión muy baja	Presión manométrica de 0 a 4 bar, preferentemente menos de 1 bar de presión manométrica, más preferentemente menos de 0,5 bar de presión manométrica
Presión baja	Presión manométrica de 4 a 10 bar
Presión media	Presión manométrica de 10 a 30 bar
Presión alta	Presión manométrica de 30 a 100 bar
Presión muy alta	Presión manométrica >100 bar

55 En la práctica, la "presión muy baja" se encuentra entre la ambiental y ligeramente mayor que la ambiental, de modo que el vaso de contención del acumulador térmico no se clasifica como equipo presurizado. Con una presión inferior a 4 bar, el acumulador térmico respectivo se clasificaría como un recipiente de presión, pero puede ser de un tipo aprobado. Por lo tanto, cada acumulador térmico individual fabricado no requeriría el examen de una autoridad autorizada, tal como un organismo notificado. En la Unión Europea, un acumulador térmico de este tipo se clasificaría como un recipiente de presión de categoría III que puede aprobarse mediante un examen del diseño y la

aplicación de normas de calidad aprobadas durante el proceso de fabricación. Con una presión inferior a 0,5 bar manométrica, el primer acumulador térmico no se clasificaría como equipo a presión, y la práctica de ingeniería sólida debería aplicarse al proceso de diseño y fabricación.

- 5 La presente invención también proporciona métodos correspondientes de almacenamiento de energía como se menciona en las reivindicaciones, a las que también se aplican las declaraciones anteriores.

**Breve descripción de los dibujos**

- 10 A continuación se describirán realizaciones de la presente invención con referencia a las figuras, en las que:

- la figura 1 muestra el régimen de generación típico de un dispositivo de almacenamiento de energía;  
 la figura 2 muestra un sistema de almacenamiento de energía criogénica (CES) típico del estado de la técnica como se desvela en el documento US 6.920.759 B2 y E.M. Smith 1977 (*ibid*);  
 15 la figura 3 muestra un regenerador de alta presión típico del estado de la técnica como se desvela en el documento US 6.920.759 B2;  
 la figura 4 muestra un esquema de un sistema de almacenamiento de energía criogénica de acuerdo con una primera realización de la presente invención;  
 la figura 5 muestra una segunda realización de la presente invención;  
 20 la figura 6 muestra la reducción en la energía requerida para licuar un kg de aire para diferentes cantidades de reciclado en frío;  
 la figura 7 muestra una tercera realización de la presente invención;  
 la figura 8 muestra una cuarta realización de la presente invención;  
 las figuras 9 a 11 muestran las realizaciones quinta, sexta y séptima preferentes de la presente invención;  
 25 la figura 12 muestra una octava realización de la presente invención;  
 la figura 13 muestra una novena realización de la presente invención; y  
 la figura 14 muestra una décima realización de la presente invención;

**Descripción detallada de la invención**

- 30 La Figura 4 muestra un esquema de una primera realización simplificada de la presente invención. El sistema de la figura 4 es similar al mostrado en la figura 2, excepto que el regenerador mostrado en la figura 2, en el que los gases de proceso fluyen directamente a través del regenerador, se reemplaza en la figura 4 por un acumulador térmico con un circuito de transferencia de calor intermedio a presión muy baja.

- 35 Durante la fase de recuperación de energía (descarga) del ciclo, el fluido criogénico se transfiere primero desde el tanque de almacenamiento 100 a la bomba 105, donde el fluido se comprime a alta presión, de al menos 30 bar, más preferentemente de al menos 50 bar y, más típicamente, de 100 a 200 bar. La energía térmica fría se transfiere a través de un intercambiador de calor, denominado evaporador 302, a un fluido de transferencia de calor que circula entre el evaporador y el acumulador térmico 301 a través de un circuito de transferencia de calor de muy baja presión 104. El circuito de transferencia de calor típicamente consiste en conectar tuberías, una bomba de circulación e instrumentos asociados y válvulas de control. El fluido de transferencia de calor puede ser aire seco, nitrógeno seco u otro gas adecuado o fluido refrigerante, tal como metano, metanol, propanol o propano.

- 45 Durante la fase de almacenamiento del ciclo, ambos circuitos de transferencia de calor se pueden cerrar para aislar el acumulador térmico del entorno y minimizar las pérdidas de calor. De manera similar, el tanque de almacenamiento criogénico se puede aislar del medio ambiente en la medida en que cualquier gas de ebullición se pueda ventilar desde el fluido criogénico de forma segura, pero la fuga de calor en el tanque se puede minimizar.

- 50 Durante la licuefacción (fase de carga) del ciclo, el aire ambiental se comprime primero en un compresor 104 a al menos 10 bar y, más típicamente, de 40 a 60 bar. Típicamente, las impurezas tales como CO<sub>2</sub>, contaminantes de agua e hidrocarburos se eliminan del gas a alta presión. A continuación, se transfiere la energía térmica fría desde el acumulador térmico al gas a alta presión a través de un circuito de transferencia de calor de muy baja presión 104 a un intercambiador de calor, denominado refrigerador 303. A continuación, el gas ahora frío se expande a través de una válvula 101 para producir aire líquido que se almacena en el tanque de almacenamiento criogénico 100. Típicamente, la composición del aire frío tras la válvula de expansión es una mezcla de aire líquido y gaseoso. El aire gaseoso a menudo se devuelve al refrigerador para proporcionar un enfriamiento adicional del aire a alta presión antes de la expansión.

- 60 Se describen realizaciones adicionales con mayor detalle en el presente documento.

- La segunda realización de la presente invención se muestra en la figura 5. Considerando primero la parte de descarga (recuperación de energía) del ciclo, el fluido criogénico, que podría ser aire líquido, nitrógeno líquido o un fluido similar a baja temperatura se transfiere primero desde el tanque almacenamiento criogénico 409 a la bomba criogénica 410. Esto se logra habitualmente mediante una alimentación por gravedad desde el tanque de almacenamiento, pero puede estar asistido por una bomba de refuerzo de baja presión intermedia. El fluido

criogénico es comprimido mediante la bomba criogénica 410 a alta presión de al menos 50 bar y, más habitualmente, de 100 a 200 bar. La energía térmica se agrega al fluido criogénico desde un fluido de transferencia de calor en el evaporador 413 para elevar la temperatura del fluido criogénico a típicamente de 0 a 20 °C. Durante el proceso de calentamiento, el fluido criogénico sufrirá un cambio de fase de líquido a gas si el proceso se realiza por debajo de la presión crítica o, más típicamente, se expandirá en estado supercrítico si el proceso se realiza por encima de la presión crítica para el fluido de trabajo criogénico. La energía térmica se transfiere al evaporador 413 para proporcionar el calentamiento del fluido criogénico a través de un circuito de circulación de muy baja presión que conecta el evaporador 413 al acumulador térmico 411 conocido como acumulador en frío de alta temperatura. Se hace circular un fluido de transferencia de calor a través del acumulador frío 411 de alta temperatura y el evaporador 413, a través de la bomba de circulación 419 y la válvula de control 412. El fluido de transferencia de calor en esta realización típicamente será un gas, tal como aire seco o nitrógeno seco, ya que hay pocos líquidos disponibles que permanecen en estado líquido en el intervalo de temperatura de -180 °C a 10 °C, en el que el proceso funcionará normalmente. A continuación, el fluido criogénico ahora calentado se calentará adicionalmente en un sobrecalentador 414, utilizando energía térmica del entorno ambiental o, más típicamente, calor residual de baja temperatura desde un proceso de colocalización, tal como agua condensada de una central térmica. A continuación, el fluido criogénico calentado se expande a través de una turbina de alta presión 415 y, después, a través de una turbina de baja presión 417. El gas generalmente se recalienta entre los pasos de la turbina usando un intercambiador de calor denominado recalentador 416 usando calor residual ambiental o de baja temperatura. Se pueden agregar etapas adicionales de la turbina con recalentadores entre etapas para mejorar la eficiencia del proceso, siendo el número de etapas preferido de tres o cuatro.

Al finalizar el proceso de recuperación de energía, se aíslan el acumulador en frío 411 de alta temperatura en y el tanque de almacenamiento criogénico para minimizar las pérdidas térmicas durante la fase de almacenamiento del ciclo. Normalmente se incluye una válvula de alivio en el tanque de almacenamiento para permitir la ventilación segura del gas de ebullición del líquido criogénico almacenado.

Durante la fase de licuefacción (carga) del ciclo, se utiliza el siguiente proceso, que es una variante de dos expansores del ciclo de Claude y habitualmente se usa en las plantas modernas de licuefacción de aire. El ciclo de Claude es un ciclo de refrigeración en el que parte del enfriamiento por refrigeración se proporciona a través de la expansión de un gas a través de un motor de expansión adiabático, tal como una turbina. En la variante de dos expansores utilizada en el presente documento, el gas del proceso, que podría ser aire ambiental, nitrógeno o un gas similar, se comprime primero hasta típicamente de 5 a 10 bar en el compresor de aire principal 401. Las impurezas, tales como CO<sub>2</sub>, el agua e hidrocarburos que pueden congelarse en las partes frías de la planta se eliminan en el purificador de aire 402, típicamente un adsorbedor regenerativo. El aire a alta presión se comprime adicionalmente en un compresor de aire reciclado 403 a típicamente de 25 a 70 bar. Después del compresor de aire de reciclado 403, el flujo se divide en dos corrientes. La primera corriente se comprime adicionalmente mediante las etapas del compresor de, primero, un expansor turbo en caliente 405 y, después, un expansor turbo en frío 404 a, típicamente, de 40 a 60 bar. Preferentemente, el gas se comprime por encima del punto crítico del gas, o 39,2 bar para el aire. A continuación, esta corriente entra en un intercambiador de calor de paso múltiple, o, más habitualmente, una serie de intercambiadores de calor de paso múltiple normalmente denominado caja fría 406. Generalmente, una caja fría se proporciona como una caja aislada (normalmente de metal) llena con materiales de aislamiento de alto rendimiento, tal como perlita. Los procesos de intercambio de calor a baja temperatura se producen dentro de la caja fría a través de componentes tales como los intercambiadores de calor de paso múltiple, el separador de fases y las etapas de turbina de las turbinas en calientes y en frío. El gas se enfría en la caja fría 406 y se divide adicionalmente. Una corriente se expande en la etapa de expansión del expansor turbo en frío 404 a la presión de liberación del producto, típicamente de 1 a 6 bar. Al expandir el gas, el gas se enfría sustancialmente, preferentemente hasta el punto en que las gotitas de líquido están comenzando a formarse. Los vapores parcialmente húmedos del expansor turbo 404 frío se introducen después en un separador de fases 407. La segunda corriente en la caja fría se enfría adicionalmente en la caja fría 406 y después se expande en una válvula de expansión 408, a menudo denominada válvula de Joules Thompson (JT). El gas frío se condensa sustancialmente en líquido durante el proceso de expansión y entra en el separador de fases 407. El producto líquido se separa de la fase de vapor en el separador de fases 407 y se almacena en el tanque de almacenamiento criogénico 409 para su uso posterior. La fase de vapor se devuelve a la caja fría 406 que proporciona refrigeración para la corriente de gas a alta presión.

La segunda corriente se separa después de que el compresor de aire reciclado 403 se enfría primero en la caja fría 406 y luego se expande en el expansor turbo caliente 405 para reducir la presión y la temperatura del gas. Esta corriente de gas ahora fría se introduce luego en la caja fría 406 para proporcionar refrigeración.

En esta realización de la presente invención, se proporciona refrigeración adicional del gas del proceso reciclando la energía fría recuperada durante la fase de recuperación de energía del ciclo y almacenada en el acumulador de frío de alta temperatura 411. Esto se logra haciendo circular el fluido de transferencia de calor a través del acumulador de frío de alta temperatura 411 usando la bomba de circulación 419, de manera que el fluido de transferencia de calor se enfría hasta cerca de la temperatura de condensación del gas de proceso. El fluido de transferencia de calor se introduce cerca del fondo del intercambiador de calor de la caja fría 406 donde se calienta mediante el gas de proceso y proporciona refrigeración del gas de proceso.

Los presentes inventores han descubierto que la recuperación, el almacenamiento y el reciclado eficaces de la energía fría liberada durante el proceso de recuperación de energía pueden más que reducir a la mitad la energía requerida para volver a licuar el gas del proceso. Esto se ilustra en la figura 6 que muestra la reducción en la energía (en kWh) requerida para licuar un kg de aire (el fluido del proceso preferido) para diferentes cantidades de reciclado en frío, expresado en kJ/kg de fluido de trabajo. Los licuefactores modernos suelen funcionar con un requisito de trabajo específico de 0,43 kWh por kg de aire líquido producido. Los cálculos de los inventores han indicado que el trabajo específico para licuar el gas de proceso se puede reducir a menos de 0,2kWhr/kg si se puede recuperar más del 72 % de la energía fría liberada durante el proceso de recuperación de energía.

En una realización adicional de la presente invención mostrada en la figura 7, el ciclo se modifica para funcionar sin la bomba de circulación 419. Durante la recuperación de energía, el escape gaseoso de muy baja presión de la turbina de baja presión 417 se usa para evaporar y calentar el fluido de trabajo en el intercambiador de calor de evaporador 413. La corriente fría de baja presión resultante puede introducirse después directamente en el acumulador de frío de alta temperatura 411 para recuperar y almacenar la energía térmica fría. Durante la licuefacción, el proceso se modifica de manera que la salida de muy baja presión de la turbina caliente 405 se canaliza después del calentamiento en la caja fría 406 al acumulador de frío de alta temperatura. La corriente de gas caliente de muy baja presión se enfría en el acumulador de frío de alta temperatura 411 y la corriente de gas frío de muy baja presión resultante se introduce en la parte inferior de la caja fría 406 para permitir que la energía fría se recicle y se utilice para reducir el coste energético de la licuefacción. El flujo del acumulador de frío 411 está controlado por dos válvulas de control 412 que controlan la conexión a las partes de recuperación de energía y licuefacción del ciclo. Estas modificaciones en el diseño tienen la ventaja de reducir la complejidad y, por lo tanto, el coste del sistema en el sentido de que ya no se requiere la bomba de circulación 419. Habrá una pequeña penalización en cuanto a la eficiencia, ya que tanto la turbina caliente 405 como la turbina de baja presión 417 sufrirán una contrapresión más alta del acumulador de frío de alta temperatura 411. Sin embargo, si el acumulador de frío de alta temperatura 411 está optimizado para funcionar a una pérdida de baja presión en el intervalo de los caudales de los gases de escape dimensionando el área de flujo del acumulador, de manera que las velocidades y, por lo tanto, las pérdidas de presión en el acumulador sean bajas, la contrapresión será pequeña.

En una realización adicional mostrada en la figura 8, se agrega un acumulador frío adicional 701 al sistema. El componente 420 mostrado en la figura 8 se denomina Isla de Energía e incluye los componentes mostrados en la caja discontinua 420 en la figura 7. Los inventores han observado que en la realización de la figura 7, donde el escape de la turbina de baja presión 417 se usa para proporcionar el calentamiento por evaporación del fluido del proceso de trabajo durante la recuperación de energía, solo alrededor de dos tercios de la energía fría disponible se pueden recuperar para reciclar en frío. Esto se debe a que la entalpía liberada al calentar el criógeno a alta presión desde el estado líquido a la temperatura ambiente es mayor que la entalpía requerida para enfriar el aire desde la temperatura ambiente hasta la temperatura del líquido criogénico a alta presión, de la siguiente manera:

Entalpía liberada en el calentamiento del aire a 100 bar desde - 333 kJ/kg  
170 a 10 °C  
Entalpía requerida para enfriar el aire a 1 bar desde 10 °C a -170 182 kJ/kg  
°C

Los inventores se han dado cuenta de que añadiendo un acumulador de frío de temperatura media 701 adicional después del evaporador 413, es posible capturar la energía fría no capturada por el evaporador 413. La energía se captura usando un circuito cerrado unido térmicamente al circuito de recuperación de energía a través del intercambiador de calor principal 703. El fluido de trabajo a muy alta presión típicamente abandona el evaporador 413 a -90 a -120 °C. Como tal, se podrían usar gases, tales como aire o nitrógeno, como fluido de trabajo en el circuito cerrado del acumulador de frío de temperatura media o, como alternativa, se podrían usar refrigerantes líquidos tales como metanol o propanol como fluido de trabajo en un circuito cerrado del acumulador de frío de temperatura media. Dichos líquidos son adecuados para funcionar entre estas temperaturas y la temperatura ambiente. Se prefiere el uso de refrigerantes líquidos, ya que el coste de energía al bombear un líquido a través del acumulador de frío de temperatura media 701 y alrededor de las tuberías asociadas y los intercambiadores de calor de la caja fría 406 será considerablemente menor que para un gas. Además, el coste de capital de la bomba de circulación 702, las válvulas y las tuberías es menor para un circuito de transferencia de calor líquido en comparación con un circuito de transferencia de calor de gas. El fluido de trabajo, tal como un refrigerante líquido, se hace circular usando una bomba 702. Durante la recuperación de energía, la bomba de circulación 702 se usa para hacer circular el líquido refrigerante a través del intercambiador de calor principal 703, a través del acumulador de frío de temperatura media 701 y a través de los intercambiadores de calor de la caja fría 406. El líquido refrigerante se introduce en un punto en la caja fría 406 en equilibrio con la temperatura del acumulador de frío de temperatura media 701 para asegurar una eficiencia térmica óptima.

Los recuadros numerados hexagonales en la figura 8 muestran las posiciones en el sistema en las cuales las presiones manométricas y temperaturas son las siguientes:

60

	Presión manométrica	Temperatura
1	Presión baja	-196 °C a -177 °C
2	Presión muy alta	-185 °C a -170 °C
3	Presión muy alta	-120 °C a -90 °C
4	Presión muy alta	10 a 20 °C
5	Presión muy baja	-40 a 10 °C
6	Presión muy baja	-185 °C a -170 °C
7	Presión muy baja	-120 °C a -90 °C
8	Presión baja	10 a 40 °C
9	Presión media	10 a 40 °C
10	Presión alta	10 a 40 °C
11	Presión muy baja	10 a 30 °C
12	Presión muy baja	-185 °C a -170 °C
13	Presión baja	-190 a -170 °C
14	Presión alta	-190 a -170 °C
15	Presión baja	-194 a -175 °C

Las posiciones equivalentes en las figuras 5, 7 y 9 a 11 están a temperaturas y presiones equivalentes.

- 5 Una realización adicional se muestra en la figura 9. Esta realización es la misma que la de la figura 8 excepto que la energía térmica fría almacenada en el acumulador de frío de temperatura media 701 se usa para enfriar previamente la turbina caliente usando un refrigerador de turbina caliente 901, en lugar de usar para enfriar la caja fría 406. Esta realización tiene la ventaja de eliminar una corriente de flujo de la caja fría 406, simplificando de este modo el diseño. El refrigerador de la turbina caliente 901 puede ser una carcasa simple y un tubo, una aleta de placa o un intercambiador de calor similar.
- 10 En la figura 10 se muestra una realización adicional en la que la realización preferida se modifica ligeramente de manera que el escape de la turbina fría se utiliza para proporcionar el flujo de recuperación de frío al acumulador de frío de alta temperatura durante la fase de carga (licuefacción) del ciclo, en lugar del flujo de la turbina caliente. El flujo al acumulador de frío de alta temperatura puede tomarse desde escape de la turbina fría directamente o preferentemente (como se muestra en la figura 10) después del separador de fases. Esta realización es preferida cuando el líquido criogénico se almacena a temperatura ambiente o cerca de la presión ambiente y la presión del separador de fases (407) está a la presión ambiental o cerca de esta. Una realización adicional se muestra en la figura 11, en la que la turbina caliente se reemplaza por un módulo de refrigeración líquida 1101. El frío de calidad medio del acumulador de frío de temperatura media 701 se usa para enfriar el líquido de alta presión en el módulo de refrigeración 1101 antes de la refrigeración de la expansión para mejorar el rendimiento de refrigeración del circuito. Esta realización mejora la eficiencia general del proceso pero tiene un coste de capital más elevado. Como tal, esta realización es preferida en mercados y aplicaciones en las que la eficiencia es muy importante y un coste de capital más elevado es económicamente viable.
- 25 Una realización adicional se muestra en la figura 12, que es la misma que la realización de la figura 7, excepto que una proporción de una corriente de escape de la salida del acumulador térmico 411 se recircula para pasar a través del evaporador 413 por segunda vez. Aunque esta modificación se muestra en el contexto de la figura 7, podría usarse en cualquiera de las realizaciones mostradas en las figuras 8 a 11, o las que se desvelan a continuación.
- 30 La recirculación aumenta el caudal del fluido que pasa a través del evaporador 413 a un nivel suficiente para capturar toda la energía térmica fría desde la corriente fría a alta presión del criógeno. En consecuencia, la modificación niega el requisito del acumulador de frío de temperatura media, 701, mostrado en la figura 8.
- 35 Aumentando el caudal de la corriente de escape que pasa a través del evaporador 413 (que típicamente está a una presión de 1 bar), la entalpía requerida para enfriar la corriente de 10 °C a -170 °C, por ejemplo, se puede adaptar a la entalpía liberada al calentar el criógeno en la corriente de alta presión de -170 °C a 10 °C. Como se ha explicado anteriormente, esto permite que sustancialmente toda la energía fría sea capturada en el evaporador 413 por la corriente de baja presión.
- 40 El caudal de masa de aire recirculado está, típicamente, entre 0,5 y 1 veces el flujo de la corriente de escape, y más habitualmente, ~ 0,8 cuando la corriente de líquido se bombea a 100 bar.

Se utiliza una bomba de circulación 702 para equilibrar el sistema y asegurar que el caudal de la corriente de escape sea suficientemente alto al tiempo que no afecta a la contrapresión de la turbina.

5 Esta realización simplifica el sistema, eliminando el requisito del acumulador de frío de temperatura media, el intercambiador de calor principal 703 y cualquier medio de transferencia de energía secundario. Entre otras ventajas, esto reduce los costes de capital.

10 Se muestra una realización adicional en la figura 13. Esta realización es la misma que la mostrada en la figura 7, excepto que se ha añadido un acumulador térmico de baja temperatura 803 al sistema. El acumulador térmico de baja temperatura podría usarse con cualquiera de las realizaciones mencionadas anteriormente.

15 Se produce frío de baja temperatura, típicamente entre 0 °C y -20 °C, en la expansión de la corriente en la salida de cada etapa de la turbina. La energía térmica fría de baja temperatura es capturada por los intercambiadores 801 de baja temperatura. El intercambiador 801 de baja temperatura puede ser una simple cobertura y tubo, placa aleta o intercambiador de calor similar. En la realización de la figura 13, se muestran dos intercambiadores de baja temperatura 801, cada uno ubicado en la corriente de salida de una etapa de turbina. Sin embargo, se podrían usar más o menos intercambiadores 801 de baja temperatura. Por ejemplo, la isla de energía puede incluir cualquier número de etapas de turbina y se puede proporcionar un intercambiador de baja temperatura 801 para cada etapa de la turbina o solo para algunas de las etapas de la turbina.

20 Una bomba fría de baja temperatura 802 hace circular un fluido de transferencia de calor desde los intercambiadores de calor de baja temperatura 801 al acumulador térmico de baja temperatura 803 durante la fase de descarga del sistema de almacenamiento de energía. El fluido de transferencia de calor es, típicamente, una mezcla de agua con glicol, aunque podrían usarse otros fluidos, tales como el aire o gases refrigerantes.

25 Durante la fase de carga del sistema de almacenamiento de energía, una segunda bomba fría de baja temperatura 802 hace circular el fluido de transferencia de calor desde el acumulador térmico de baja temperatura 803 a los refrigeradores (805, 804) de los compresores de aire de reciclado y principal, por lo que se usa para preenfriar las corrientes de entrada al compresor. Los refrigeradores 805, 804 de los compresores de aire de reciclado y principal pueden ser simples cobertura y tubo, placa aleta o intercambiadores de calor similares.

30 Los inventores han descubierto que reduciendo la temperatura de la corriente de entrada del compresor, el gas se vuelve más denso y se reduce el trabajo necesario para comprimir el gas por unidad. Los inventores han observado que en la fase de carga, la mayor parte del trabajo necesario es realizado por el compresor de aire de reciclado 403 y el compresor de aire principal 401 al comprimir el gas, por lo que cualquier reducción en el trabajo necesario realizado por estos compresores tiene un efecto significativo en el trabajo realizado por el sistema.

35 Se apreciará que aunque la realización de la figura 13 muestra la energía térmica fría de baja temperatura que se usa para preenfriar el compresor de aire de reciclado 403 y el compresor de aire principal 401, podría usarse para preenfriar solo uno de estos compresores, o cualquier cantidad de compresores diferentes. Por ejemplo, podrían proporcionarse uno o más refrigeradores del compresor para los compresores de refuerzo 404, 405, accionados por las turbinas expansoras calientes y frías.

40 Una realización adicional se muestra en la figura 14. Esta realización es similar a la realización mostrada en la figura 13, pero en lugar de capturar energía térmica fría desde la unidad de energía y usarla para mejorar la eficiencia del licuefactor, la realización en la figura 14 funciona con eficacia a la inversa.

45 De nuevo, la realización de la figura 14 es la misma que la mostrada en la figura 7, excepto que se ha agregado un acumulador térmico caliente 1002 al sistema. El acumulador térmico caliente podría usarse con cualquiera de las realizaciones mencionadas anteriormente.

50 La energía térmica, típicamente de una temperatura de 60 °C a 90 °C, se produce en las corrientes de salida tanto en los compresores de reciclado como principales (1004, 1005). La energía térmica es capturada por los refrigeradores intermedios del compresor, almacenados en el acumulador térmico caliente 1002 y descargados para proporcionar sobrecalentamiento a cada una de las corrientes de entrada de la etapa de la turbina a través de los sobrecalentadores térmicos del compresor 1001.

55 En la realización de la figura 14, se muestran dos sobrecalentadores 801 térmicos del compresor, cada uno ubicado en la corriente de entrada de una etapa de turbina. Sin embargo, se podrían usar más o menos sobrecalentadores. Por ejemplo, la isla de energía puede incluir cualquier número de etapas de turbina y se puede proporcionar un sobrecalentador para cada etapa de la turbina o solo para algunas de las etapas de la turbina.

60 Además, se apreciará que aunque la realización de la figura 14 muestra los refrigeradores intermedios del compresor en cada uno de los compresores de aire de reciclado 403 y el compresor de aire principal 401, podría utilizarse un refrigerador intermedio en solo uno de estos compresores, o en cualquier cantidad de compresores diferentes.

65

Por ejemplo, podrían proporcionarse uno o más refrigeradores intermedios para los compresores de refuerzo 404, 405, accionados por las turbinas de expansión calientes y frías.

5 Una bomba de circulación 1003 hace circular un fluido de transferencia de calor desde los refrigeradores intermedios del compresor 1004, 1005 al acumulador térmico de calor 1002 durante la fase de carga del acumulador de energía. El fluido de transferencia de calor es, típicamente, una mezcla de agua con glicol, aunque podrían usarse otros fluidos, tales como el aire o gases refrigerantes. Los refrigeradores intermedios del compresor 1004, 1005 pueden ser una simple cobertura y un tubo, una placa aleta o un intercambiador de calor similar.

10 Durante la fase de descarga del sistema de almacenamiento de energía, una segunda bomba 1003 hace circular el fluido de transferencia de calor desde el acumulador térmico de calor 1002 a los sobrecalentadores de calor del compresor 1001, sobrecalentando súper la corriente de proceso de la turbina entre etapas.

15 Los inventores han descubierto que el uso de calor residual para sobrecalentar la corriente de la turbina es una forma eficaz de aumentar la salida de la Isla de Energía 420 sin coste operativo adicional. La captura del calor del compresor permite que el sistema de almacenamiento de energía funcione independientemente de las fuentes de calor residual externo para lograr mayores eficiencias.

20 Los inventores han descubierto que en la mayoría de las aplicaciones y mercados de almacenamiento de energía, la velocidad de la carga de los acumuladores térmicos y la velocidad de descarga de los acumuladores térmicos a menudo son sustancialmente diferentes. Esto se debe a que el momento en que los precios de la energía están en un máximo y el sistema está en modo de descarga son considerablemente más cortos que los tiempos en que los precios de la energía son bajos y el dispositivo puede estar en modo de carga. Es ventajoso utilizar tanto tiempo de carga disponible como sea posible, ya que se puede construir un sistema de carga más pequeño y más económico.

25 La consecuencia de este descubrimiento es que la velocidad del flujo de energía de entrada y salida de los acumuladores térmicos es sustancialmente diferente entre la carga y la descarga. Todas las realizaciones de la presente invención descritas anteriormente se benefician significativamente del uso de frío de alta temperatura y/o temperatura media de un diseño de geometría variable, como se describe en el documento GB1013578.8. En particular, el o cada acumulador térmico puede consistir en una primera masa térmica, una segunda masa térmica y una tercera masa térmica, en el que las relaciones de aspecto de al menos dos de las masas térmicas primera, segunda y tercera son diferentes entre sí, y una disposición de conductos y válvulas configuradas para dirigir un fluido de transferencia de calor para que pase a través de una combinación de una o más de las masas térmicas. Como alternativa, el o cada acumulador térmico puede comprender una primera masa térmica que comprende partículas sólidas, una segunda masa térmica que comprende partículas sólidas, una tercera masa térmica que comprende partículas sólidas, en el que el diámetro de las partículas en al menos dos de las masas térmicas primera, segunda y tercera son diferentes entre sí, y una disposición de conductos y válvulas configuradas para dirigir un fluido de transferencia de calor para que pase a través de una combinación de una o más de las masas térmicas.

30

35 Por supuesto, debe entenderse que la presente invención se ha descrito a modo de ejemplo y que se pueden realizar modificaciones de detalles permaneciendo dentro del alcance de la invención definida por las reivindicaciones siguientes.

45

50

55

60

65

**Reivindicaciones**

1. Un sistema de almacenamiento de energía criogénica que comprende:

5 un tanque de almacenamiento criogénico (100, 409) para almacenar un criógeno;  
 una bomba (105, 410) en comunicación fluida con el tanque de almacenamiento criogénico, donde la bomba  
 (105, 410) es para comprimir el criógeno del tanque de almacenamiento (100, 409);  
 un primer acumulador térmico (301, 411) que tiene una primera ruta a su través para transportar un primer fluido  
 de transferencia de calor;  
 10 un primer intercambiador de calor (302, 413) que tiene:

una segunda ruta a su través para transportar el primer fluido de transferencia de calor a la primera ruta, y  
 una tercera ruta a su través para transportar el criógeno comprimido,  
 15 en la que el primer fluido de transferencia de calor es para capturar energía térmica fría del criógeno para  
 calentar el criógeno, y para transportar dicha energía térmica fría capturada al primer acumulador térmico  
 (301, 411);

un sistema de recuperación de energía que incluye una o más turbinas de expansión (106, 415, 417) para  
 expandir el criógeno calentado para generar energía; y  
 20 un licuefactor colocalizado que incluye:

un segundo intercambiador de calor (303, 406) que tiene:  
 una cuarta ruta a su través para transportar el primer fluido de transferencia de calor desde la primera ruta, y  
 una quinta ruta a su través para transportar un primer fluido de trabajo para capturar la energía térmica fría  
 25 del primer fluido de transferencia de calor y convertir el primer fluido de trabajo en un nuevo criógeno; y  
 una sexta ruta para transportar el nuevo criógeno al tanque de almacenamiento criogénico (100, 409).

2. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 1, en el que la primera ruta, la segunda  
 30 ruta y la cuarta ruta están configuradas para transportar el primer fluido de transferencia de calor a una presión  
 manométrica de menos de 4 bar.

3. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 1, que comprende además un primer  
 fluido de transferencia de calor, en el que el primer fluido de transferencia de calor incluye el gas de escape desde la  
 35 etapa de turbina final de la una o más turbinas de expansión en el sistema de recuperación de energía.

4. El sistema de almacenamiento de energía criogénica como se ha descrito en cualquiera de las reivindicaciones  
 precedentes, que comprende además una ruta de escape de almacenamiento térmico para transportar al menos una  
 porción de una corriente de escape desde el primer acumulador térmico (301, 411) a la segunda ruta.

40 5. El sistema de almacenamiento de energía criogénica como se ha descrito en cualquiera de las reivindicaciones  
 precedentes y que además comprende:

un segundo acumulador térmico (701, 803, 1002) que tiene una séptima ruta a su través para transportar un  
 segundo fluido de transferencia de calor;  
 45 un tercer intercambiador de calor que tiene:

una octava ruta a su través para transportar el segundo fluido de transferencia de calor a la séptima ruta, y  
 una novena ruta a su través para transportar el criógeno calentado,  
 50 en la que el segundo fluido de transferencia de calor es para capturar más energía térmica fría desde el  
 criógeno calentado para calentar más el criógeno, y para transportar la energía térmica fría capturada  
 adicional al segundo acumulador térmico (701, 803, 1002); y  
 un cuarto intercambiador de calor que tiene:

una décima ruta a su través para transportar el segundo fluido de transferencia de calor desde la séptima  
 55 ruta, y  
 una undécima ruta a su través para transportar un segundo fluido de trabajo para capturar energía térmica  
 fría desde el segundo fluido de transferencia de calor.

6. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 5, en el que el segundo fluido de  
 60 transferencia de calor tiene una presión manométrica de menos de 4 bar.

7. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 5 o 6, en el que el segundo  
 intercambiador de calor y el cuarto intercambiador de calor son el mismo intercambiador de calor.

65 8. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que  
 el licuefactor comprende una planta de licuefacción criogénica que incluye una turbina de expansión y el sistema

incluye además, una duodécima ruta para transportar gases de escape a una presión manométrica de menos de 4 bar desde la turbina de expansión dentro de la planta de licuefacción hasta la primera ruta a través del primer acumulador térmico (301, 411).

- 5 9. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 8, en el que la planta de licuefacción criogénica incluye además uno o más compresores de gas, y el sistema incluye además una decimotercera ruta para transportar gas comprimido desde uno o más compresores de gas dentro de la planta de licuefacción a la turbina de expansión dentro la planta de licuefacción.
- 10 10. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 9, en el que uno o más compresores de gas comprenden un compresor de gas principal (401) adaptado para comprimir gas ambiental a una presión de al menos 5 bar y un compresor de gas de reciclado (403) adaptado para comprimir adicionalmente el gas a una presión de al menos 25 bar.
- 15 11. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, cuando depende de la reivindicación 5, en el que el cuarto intercambiador de calor comprende un prerrefrigerador para la turbina de expansión dentro de la planta de licuefacción.
- 20 12. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 8, cuando depende de la reivindicación 5, en el que el cuarto intercambiador de calor comprende un prerrefrigerador (901) para el uno o más compresores de gas dentro de la planta de licuefacción.
- 25 13. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 9 o la reivindicación 10, cuando depende de la reivindicación 5, en el que el cuarto intercambiador de calor comprende uno o más refrigeradores intermedios del compresor (1004,1005) para capturar energía térmica de una corriente de salida de uno o más compresores de gas respectivos dentro de la planta de licuefacción.
- 30 14. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 5 o cualquier reivindicación precedente que depende de la reivindicación 5, donde el tercer intercambiador de calor comprende uno o más intercambiadores de calor (801) para capturar energía térmica fría de una corriente de salida de una o más turbinas de expansión respectivas dentro del sistema de recuperación de energía.
- 35 15. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 5 o cualquiera de las reivindicaciones precedentes que depende de la reivindicación 5, en el que el tercer intercambiador de calor comprende uno o más sobrecalentadores (1001) para sobrecalentar una corriente de entrada de una o más turbinas de expansión respectivas dentro del sistema de recuperación de energía.
- 40 16. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el segundo intercambiador de calor comprende un elemento de una caja fría (406) dentro del licuefactor.
- 45 17. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 16, cuando depende de la reivindicación 8, en el que la duodécima ruta pasa a través de la caja fría (406) dentro de la planta de licuefacción.
- 50 18. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además un segundo fluido de transferencia de calor, en el que uno o ambos del primer fluido de transferencia de calor y el segundo fluido de transferencia de calor son:  
un fluido gaseoso, preferentemente aire seco, o nitrógeno seco; o  
un líquido, preferentemente metano, metanol, propanol, propano o mezcla de agua-glicol.
- 55 19. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 8, en el que la turbina de expansión dentro de la planta de licuefacción comprende una primera turbina de expansión caliente y/o una segunda turbina de expansión fría.
20. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además un criógeno, en el que el criógeno comprende aire líquido.
21. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 1 o 5, en el que las rutas primera, segunda y cuarta están formadas como un sistema de circuito cerrado.
- 60 22. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 5, 11 o 12, en el que las rutas séptima, octava y décima están formadas como un sistema de circuito cerrado.
- 65 23. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de cualquiera de las reivindicaciones precedentes y que comprende además un compresor de aire, un compresor de gas o una bomba de fluido (419) para hacer circular el primer fluido de transferencia de calor.

24. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 5, que comprende además un compresor de aire para hacer circular el segundo fluido de transferencia de calor.
- 5 25. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 5 o cualquiera de las reivindicaciones precedentes dependientes de la reivindicación 5, en el que el cuarto intercambiador de calor comprende un módulo de refrigeración y el segundo fluido de trabajo comprende un refrigerante dentro del módulo de refrigeración, en el que el refrigerante es para enfriar el fluido de trabajo en el segundo intercambiador de calor.
- 10 26. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el primero (301,411) y/o el segundo acumulador térmico (701,803,1002) tienen un diseño de geometría variable.
- 15 27. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el primer acumulador térmico (301,411) comprende un recipiente de contención que contiene un medio de almacenamiento, en el que la primera ruta es tal que el primer fluido de transferencia de calor está en contacto directo con el medio de almacenamiento.
- 20 28. El sistema de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 5 o cualquier reivindicación dependiente de la misma, en el que el segundo acumulador térmico (701, 803, 1002) comprende un recipiente de contención que contiene un medio de almacenamiento, en el que la séptima ruta es tal que el segundo fluido de transferencia de calor está en contacto directo con el medio de almacenamiento.
29. Un método para almacenar energía que comprende:
- 25 almacenar un criógeno en un tanque de almacenamiento criogénico (100, 409);  
 comprimir el criógeno desde el tanque de almacenamiento (100, 409) usando una bomba (105, 410) en comunicación fluida con el tanque de almacenamiento criogénico (100, 409);  
 transportar un primer fluido de transferencia de calor a través de una primera ruta en un primer acumulador térmico (301, 411),  
 30 Proporcionar un primer intercambiador de calor (302, 413) que tiene:
- una segunda ruta a su través, y  
 una tercera ruta a su través;
- 35 transportar el primer fluido de transferencia de calor a través de la segunda ruta hacia la primera ruta;  
 transportar el criógeno comprimido a través de la tercera ruta;  
 en la que el primer fluido de transferencia de calor es para capturar energía térmica fría del criógeno para calentar el criógeno, y para transportar la energía térmica fría capturada al primer acumulador térmico (301, 411);  
 Expandir el criógeno calentado usando una o más turbinas de expansión (106, 415, 417) en un sistema de  
 40 recuperación de energía para generar energía; y  
 proporcionar un licuefactor colocalizado que incluye:
- un segundo intercambiador de calor (303, 406) que tiene:
- 45 una cuarta ruta a su través, y  
 una quinta ruta a su través;
- transportar el primer fluido de transferencia de calor desde la primera ruta a través de la cuarta ruta,  
 transportar un primer fluido de trabajo a través de la quinta ruta para capturar la energía térmica fría del primer  
 50 fluido de transferencia de calor y convertir el primer fluido de trabajo en un nuevo criógeno; y  
 transportar el nuevo criógeno a través de una sexta ruta al tanque de almacenamiento criogénico (100, 409).
30. El método de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 29, en el que el primer fluido de transferencia de calor se transporta a una presión manométrica de menos de 4 bar.
- 55 31. El método de almacenamiento de energía criogénica de la reivindicación 29, en el que el primer fluido de transferencia de calor incluye el gas de escape desde la etapa de turbina final de la una o más turbinas de expansión (106, 415, 417) en el sistema de recuperación de energía.
- 60 32. El método de almacenamiento de energía de la reivindicación 29, que comprende además las etapas de:
- transportar un segundo fluido de transferencia de calor a través de una séptima ruta en un segundo acumulador  
 térmico (701, 803, 1002),  
 proporcionar un tercer intercambiador de calor que tiene:
- 65 una octava ruta a su través, y  
 una novena ruta a su través;

transportar el segundo fluido de transferencia de calor a través de la octava ruta hacia la séptima ruta;  
transportar el criógeno calentado a través de la novena ruta;  
en la que el segundo fluido de transferencia de calor es para capturar más energía térmica fría desde el criógeno  
calentado para calentar más el criógeno, y para transportar la energía térmica fría capturada adicional al segundo  
5 acumulador térmico (701, 803, 1002); y  
proporcionar un cuarto intercambiador de calor que tiene:

una décima ruta a su través, y  
una undécima ruta a su través;

10 transportar el segundo fluido de transferencia de calor desde la séptima ruta a través de la décima ruta; y  
transportar un segundo fluido de trabajo a través de la undécima ruta para capturar la energía térmica fría desde  
el segundo fluido de transferencia de calor.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

Figura 1

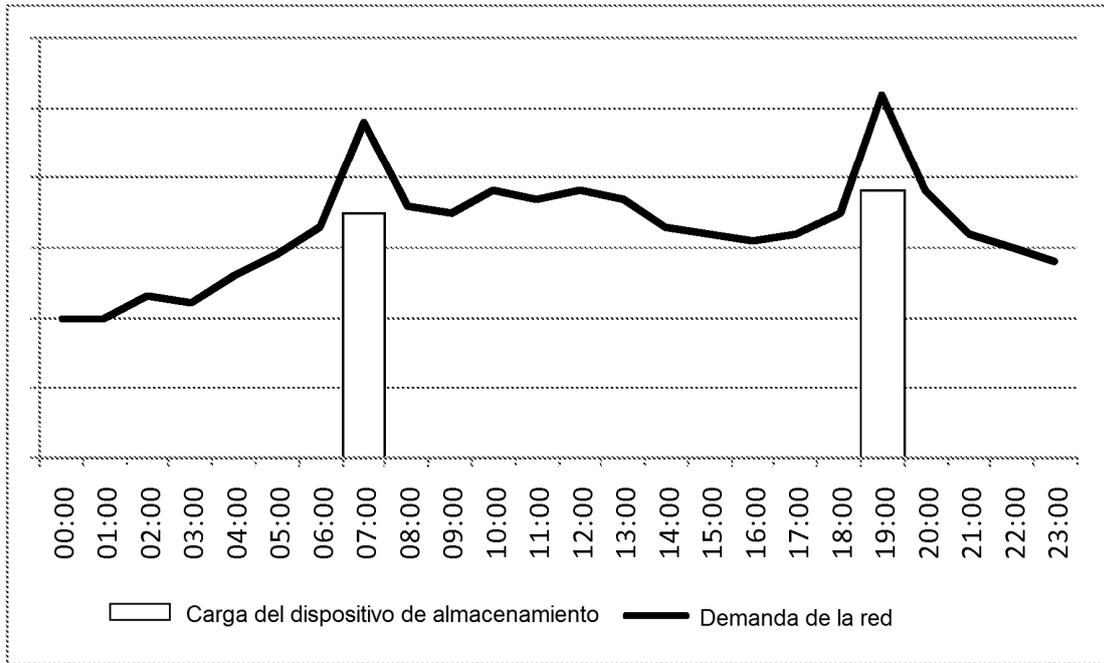


Figura 2

Estado de la técnica

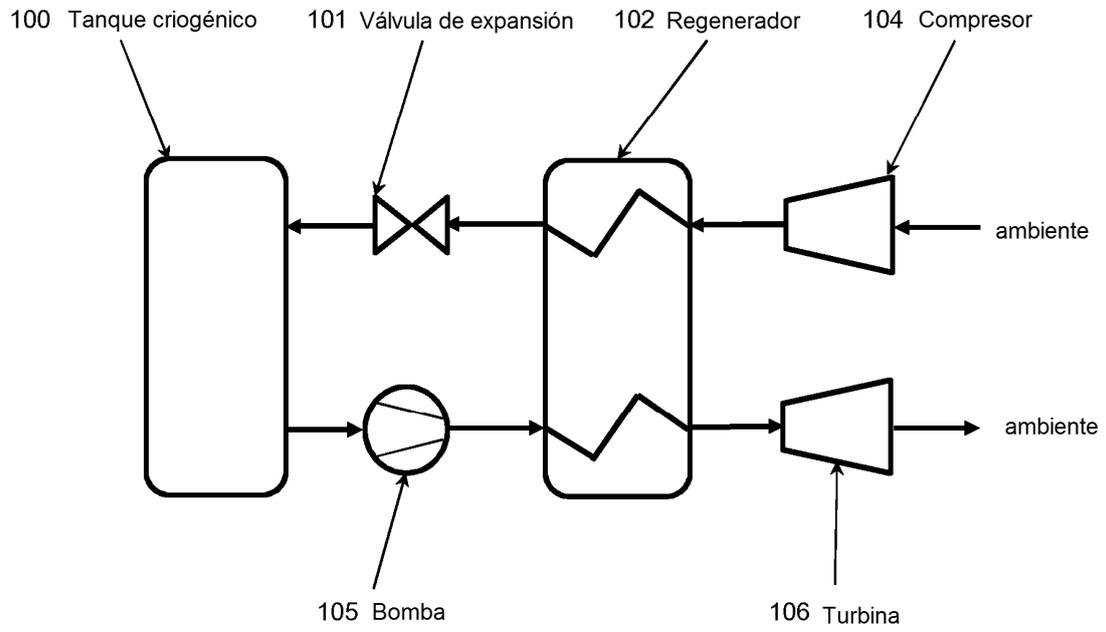


Figura 3

Técnica anterior

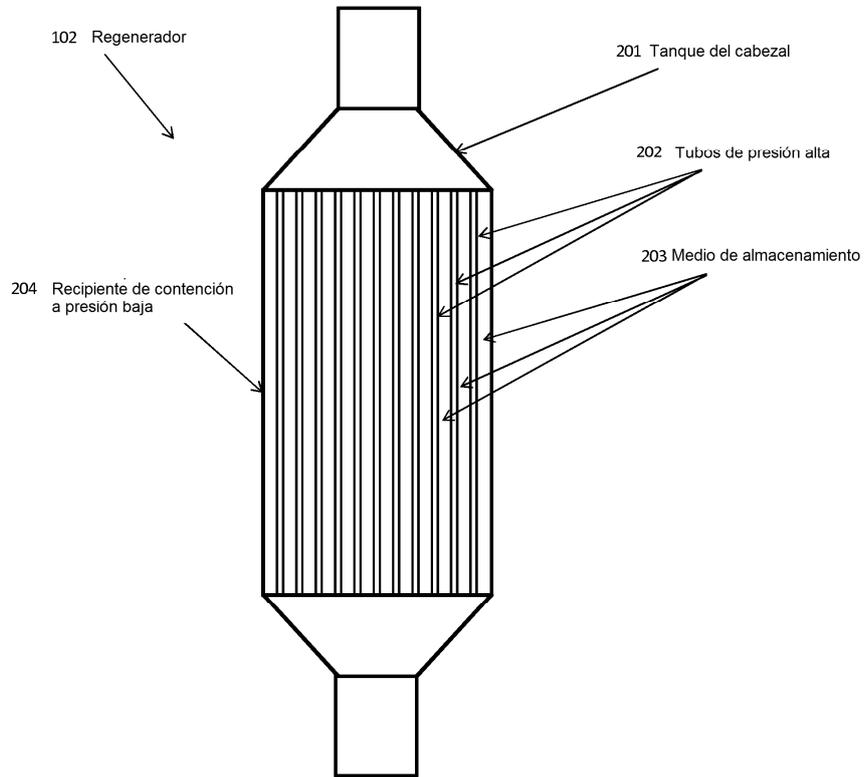
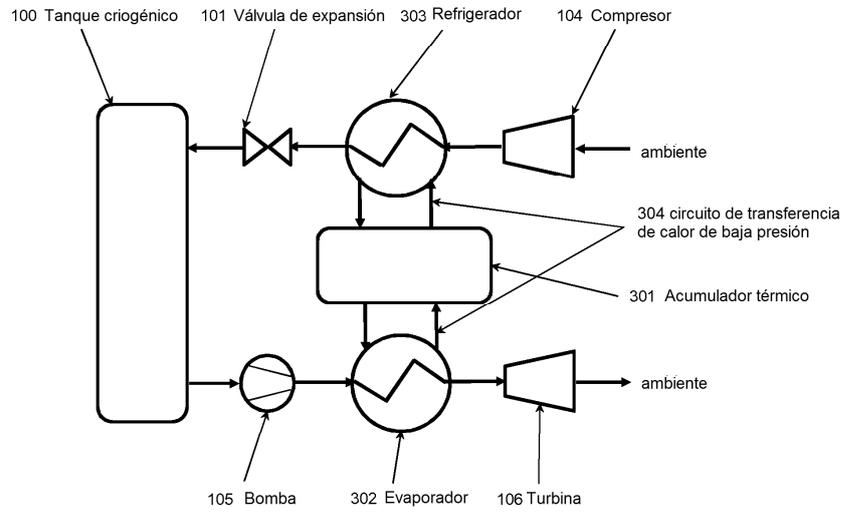


Figura 4



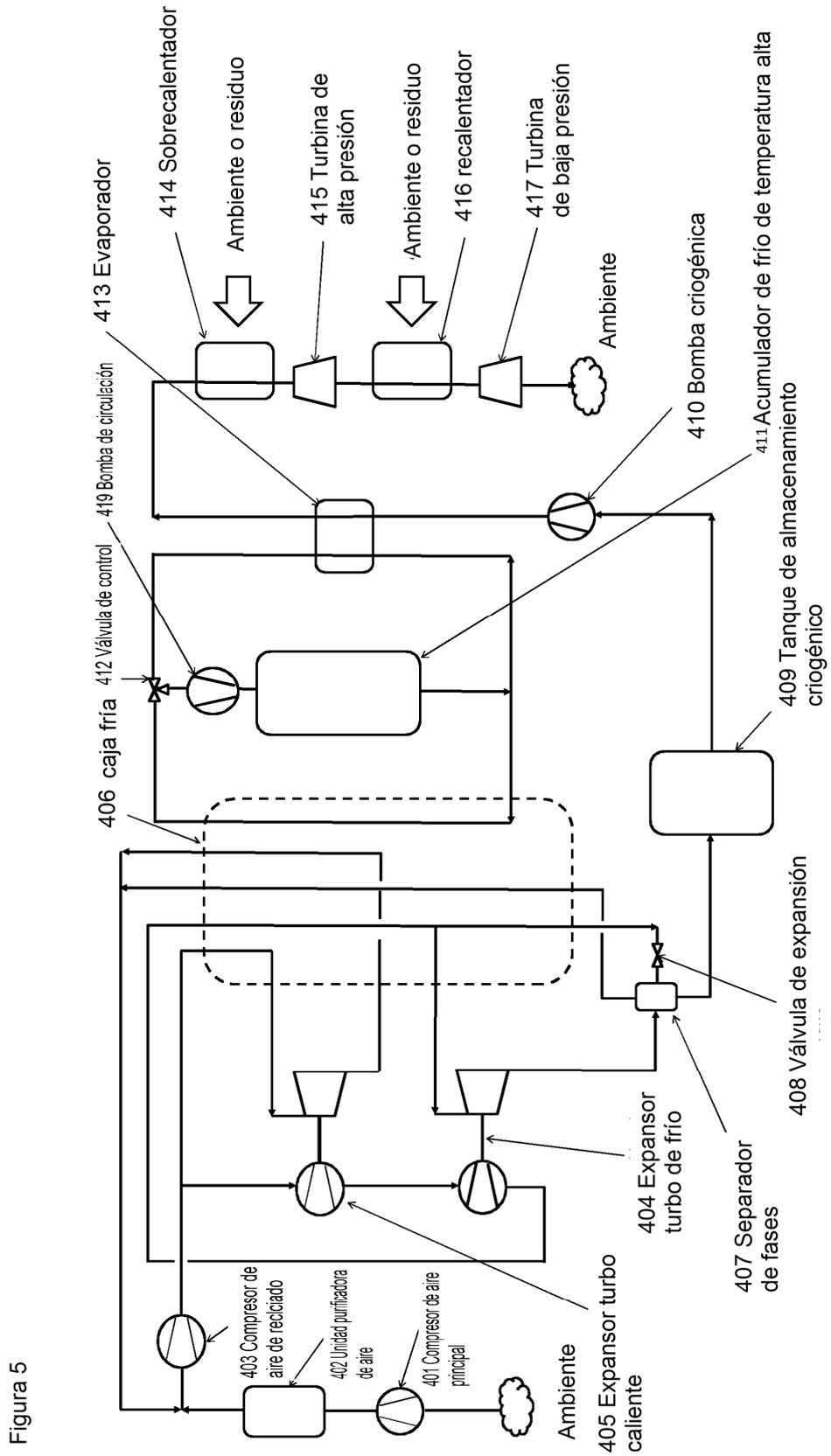


Figura 6

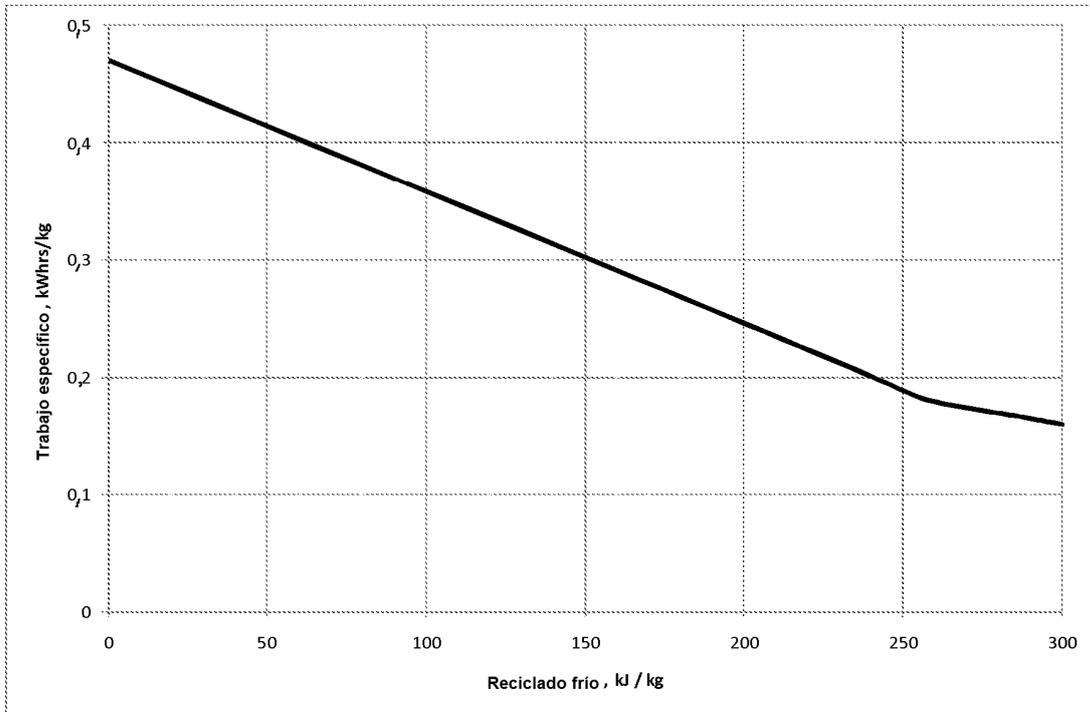


Figura 7

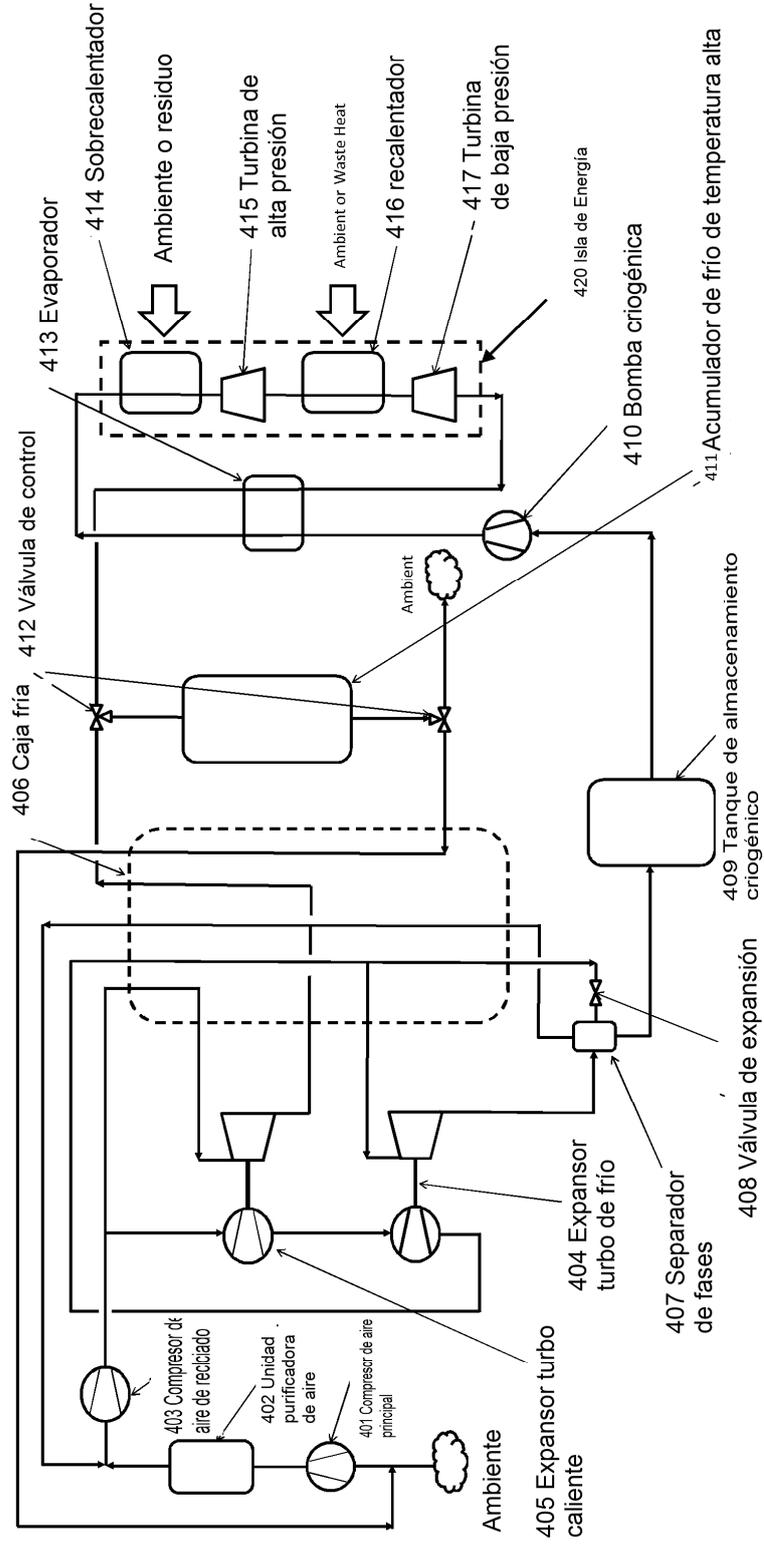
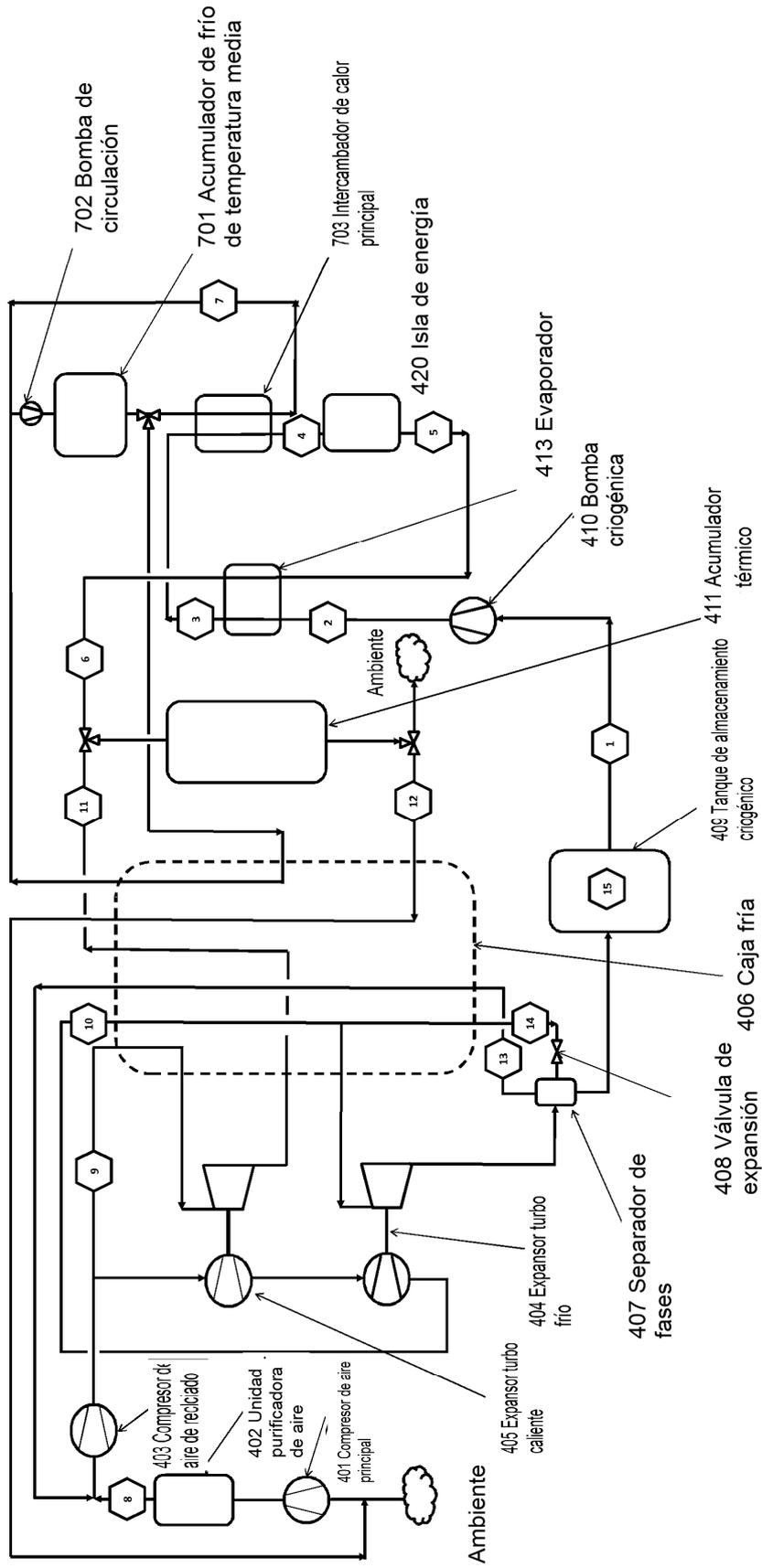


Figura 8



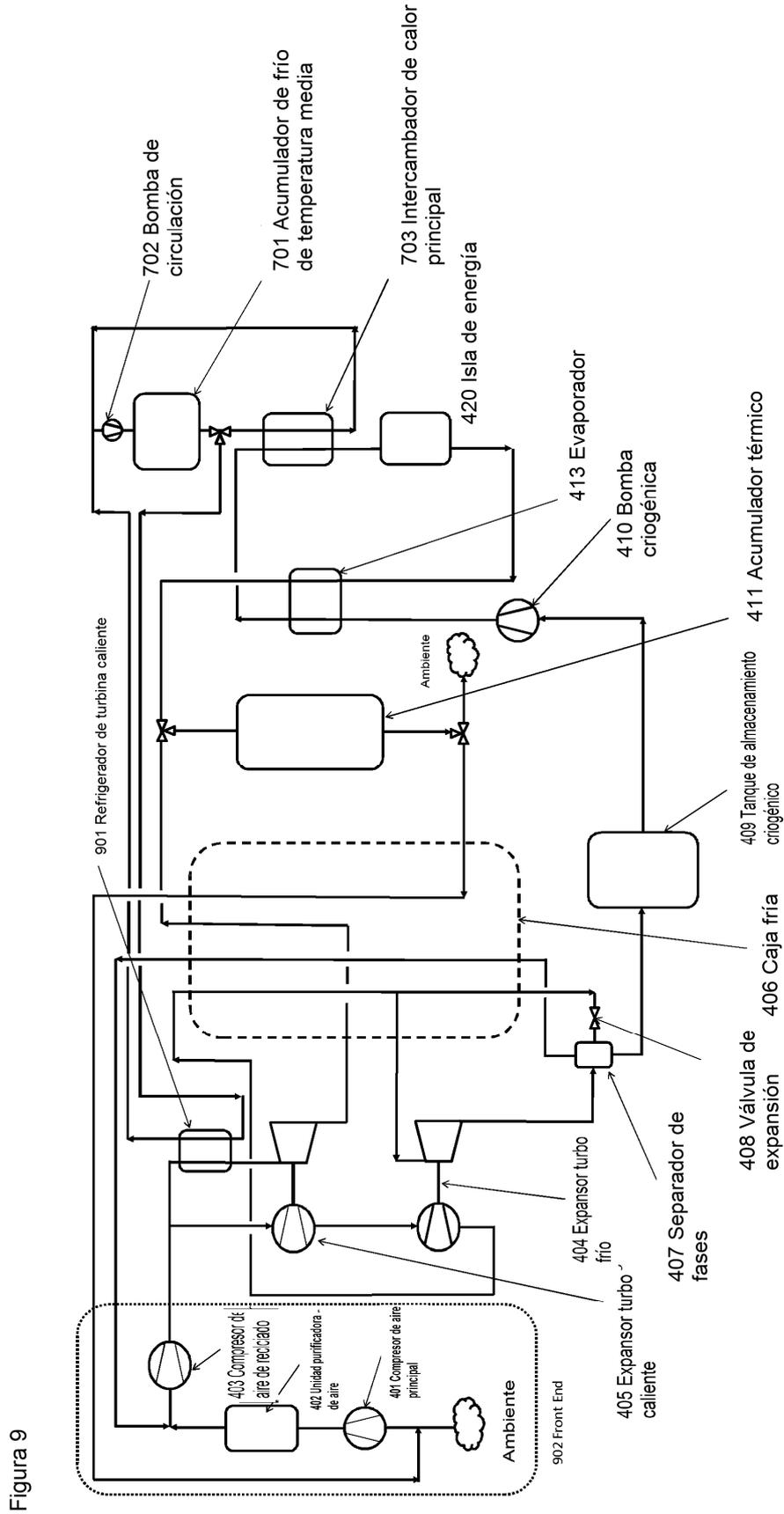
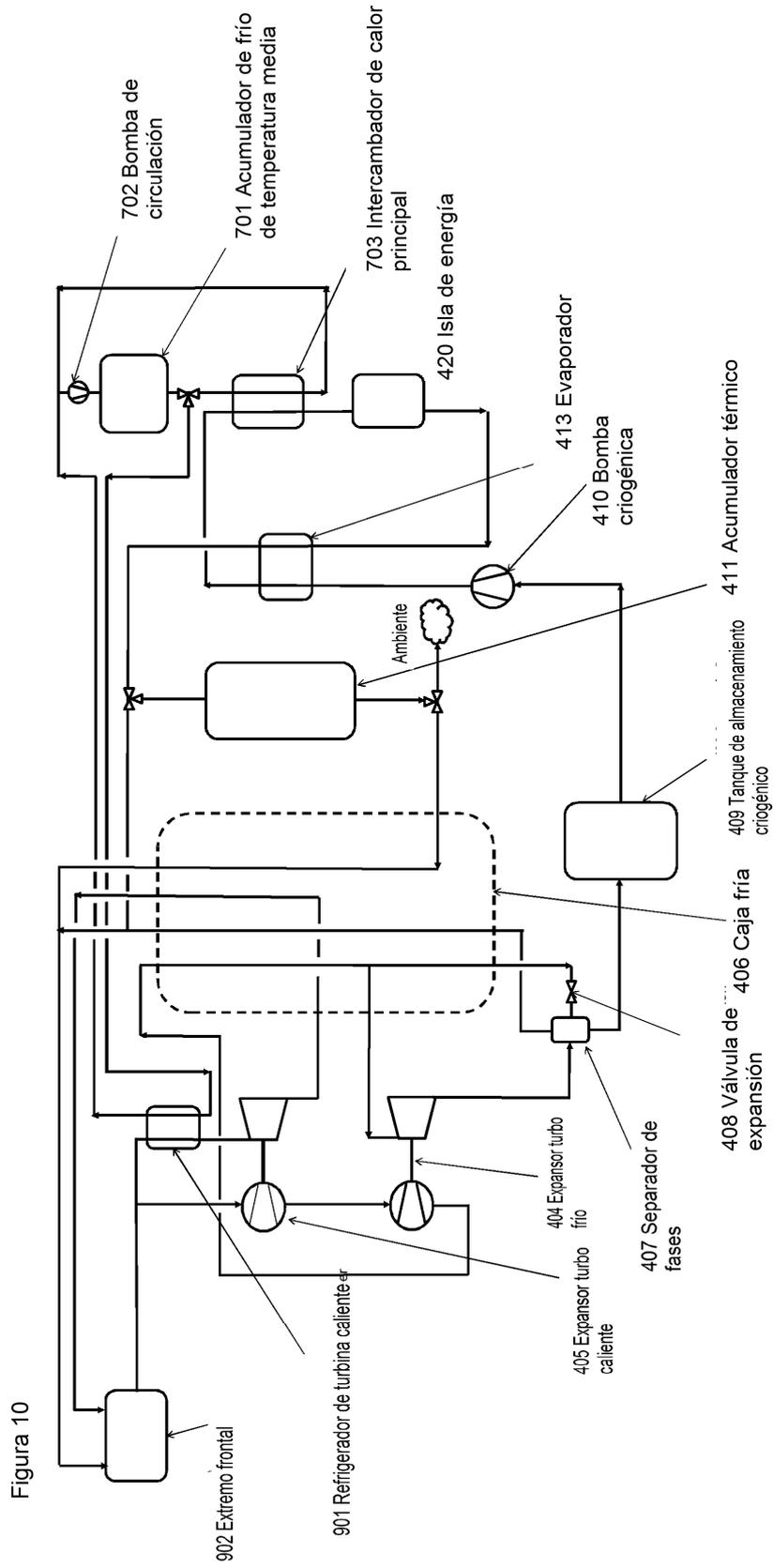


Figura 9



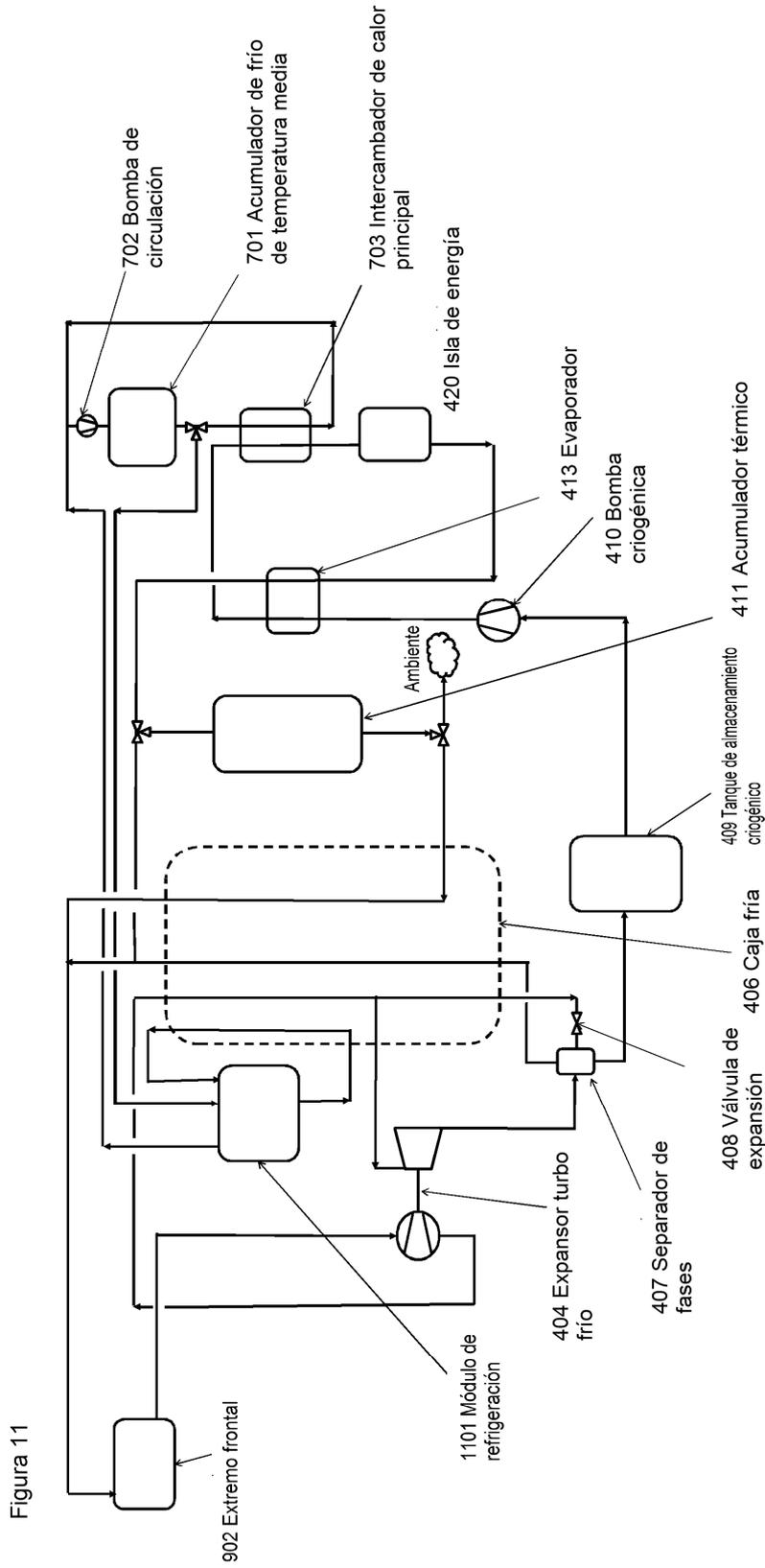


Figura 12

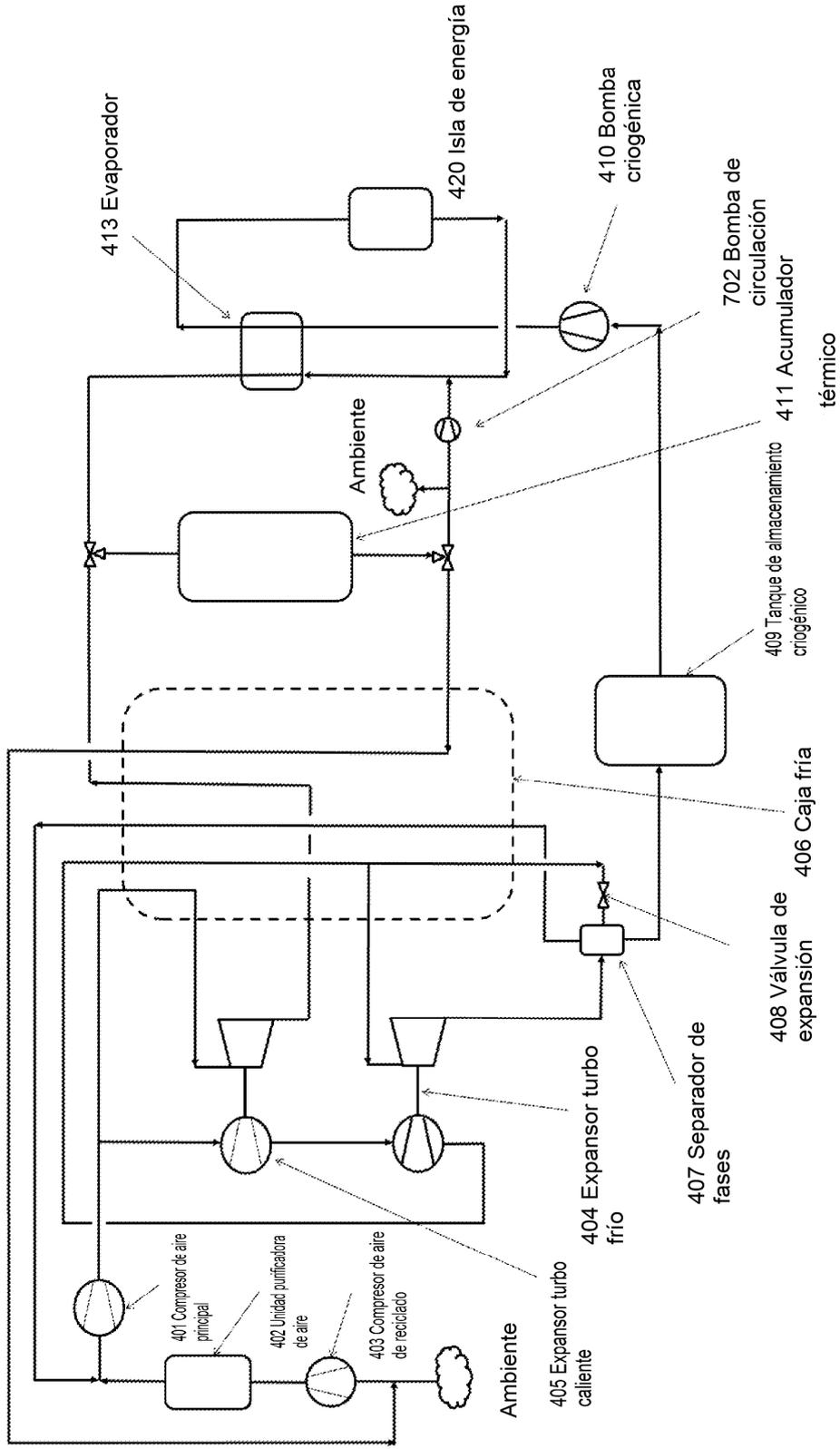


Figura 13

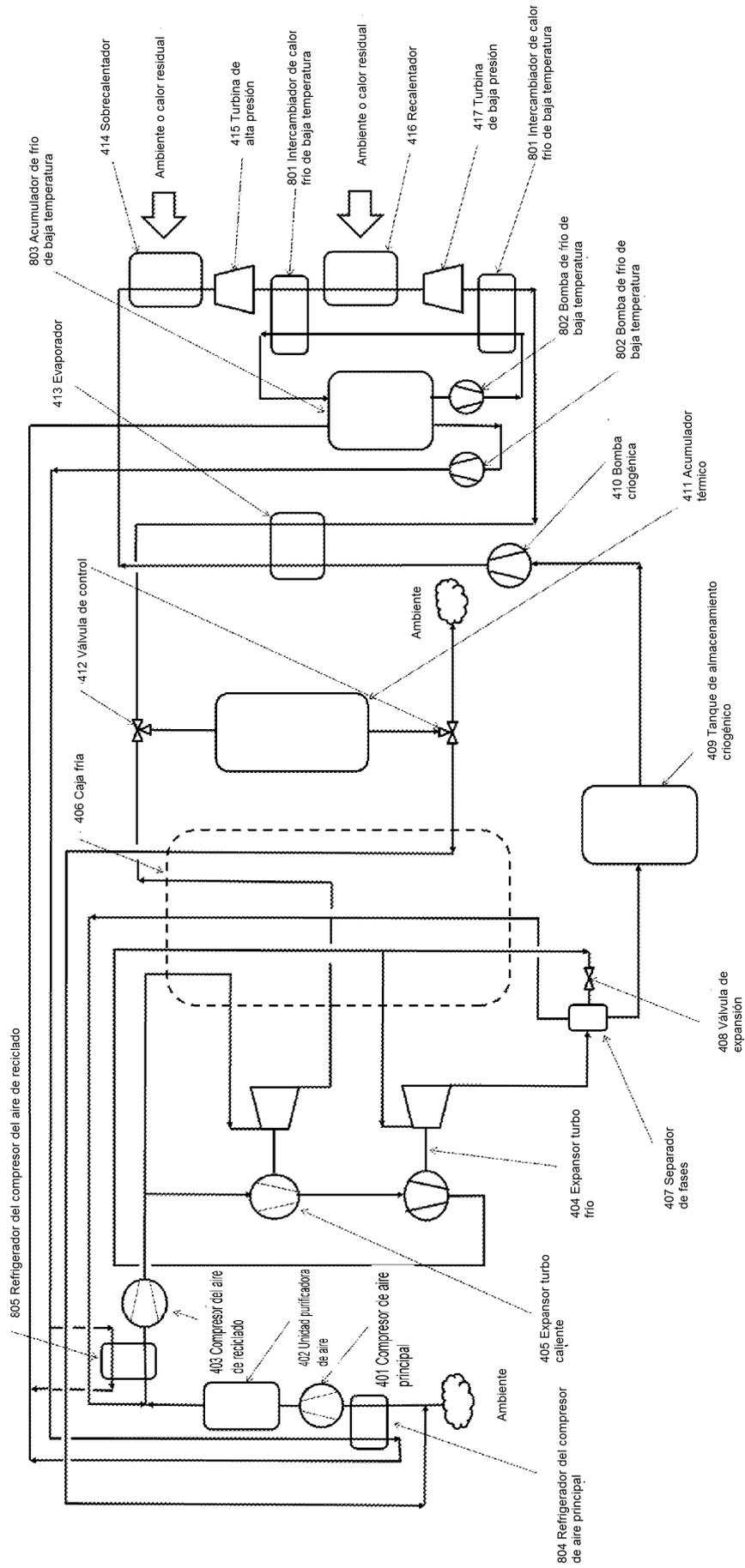


Figura 14

