

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 617 357**

51 Int. Cl.:

F25J 1/00 (2006.01)

F25J 1/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **02.05.2011 PCT/US2011/034842**

87 Fecha y número de publicación internacional: **10.11.2011 WO2011139989**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.05.2011 E 11720246 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.12.2016 EP 2567159**

54 Título: **Sistema y método de licuefacción de gas**

30 Prioridad:

03.05.2010 ES 201030658

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

16.06.2017

73 Titular/es:

**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS (CSIC) (33.3%)**

Serrano 117

28006 Madrid, ES;

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA (33.3%) y

GWR INSTRUMENTS, INC. (33.3%)

72 Inventor/es:

MILLÁN, CONRADO RILLO;

MARTÍNEZ, LETICIA TOCADO;

REINEMAN, RICHARD C. y

WARBURTON, RICHARD J.

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 617 357 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 y método de licuefacción de gas

Campo técnico

5 Esta invención se refiere generalmente a sistemas y métodos para la licuefacción de gases, y más particularmente a tales sistemas y métodos adaptados para mejorar la licuefacción y la eficiencia de rendimiento. Un sistema de licuefacción de gases según el preámbulo de la reivindicación 1 es conocido del documento US 2009/293505.

Técnica anterior

10 El helio es un elemento escaso en la tierra y sus numerosas aplicaciones científicas e industriales siguen impulsando una demanda creciente. Por ejemplo, los usos comunes del helio en fase gaseosa incluyen soldadura, elevación (globos) y fabricación de semiconductores y fibra óptica. En la fase líquida, los usos comunes incluyen la refrigeración de ciertos equipos médicos y científicos, el purgado de depósitos de combustible (NASA), y la investigación básica en física del estado sólido, magnetismo y una amplia variedad de otros temas de investigación. Debido a la generalizada utilidad del helio, su limitada disponibilidad y las reservas finitas de helio, se considera un recurso no renovable de alto costo. Por consiguiente, existe un interés creciente en el reciclado de helio y gases nobles similares.

15 En particular, se usa helio líquido como refrigerante en muchas aplicaciones en las que es necesario alcanzar temperaturas por debajo de -200°C . Tales aplicaciones están frecuentemente relacionadas con el uso de superconductores y particularmente en equipos de investigación de física de baja temperatura que operan en recipientes evacuados y aislados o termos llamados Dewars o criostatos. Tales criostatos contienen una mezcla de fases tanto gaseosa como líquida y, tras la evaporación, la fase gaseosa se libera a menudo a la atmósfera. Por lo tanto, a menudo es necesario comprar helio adicional de una fuente externa para continuar el funcionamiento del equipo en el criostato.

20 Una de las aplicaciones más importantes del helio líquido es refrigerar las bobinas superconductoras de alto campo magnético usadas en equipos de obtención de imágenes de resonancia magnética (MRI), que proporciona una técnica de diagnóstico importante creando imágenes no invasivamente del interior del cuerpo para diagnosticar una amplia variedad de afecciones médicas en los seres humanos.

25 Los mayores usuarios de helio líquido son grandes instalaciones o construcciones científicas internacionales, como el Large Hadron Collider en el laboratorio internacional del CERN. Los laboratorios tales como el CERN recuperan, purifican y vuelven a licuar el gas recuperado en sus propias plantas de licuefacción industrial a gran escala (Clase L), que típicamente producen más de 100 litros/h y requieren una potencia de entrada de más de 100 kW. Para laboratorios con un consumo más moderado, se dispone de plantas de licuefacción medianas (Clase M) que producen alrededor de 15 litros/hora. Estas plantas de licuefacción grandes y medias alcanzan un rendimiento, R, de alrededor de 1 litro/hora/kW (24 litros/día/kW) cuando el gas se enfría previamente con nitrógeno líquido y alrededor de 0,5 litros/hora/kW (12 litros/día/kW) sin enfriamiento previo.

30 Para aplicaciones a menor escala, están ahora disponibles comercialmente refrigeradores a pequeña escala que son capaces de alcanzar temperaturas suficientemente bajas para licuar una variedad de gases y, en particular, para licuar helio a temperaturas criogénicas por debajo de 4,2 Kelvin. En la industria, estos refrigeradores a pequeña escala se conocen normalmente como refrigeradores criogénicos de ciclo cerrado. Estos refrigeradores criogénicos tienen tres componentes: (1) una cabeza fría (una parte de la cual se denomina el "dedo frío" y típicamente tiene una o dos fases de enfriamiento), en la que el extremo más frío del dedo frío alcanza temperaturas muy bajas por medio de la compresión y expansión cíclica de helio gaseoso; (2) un compresor de helio que proporciona helio gaseoso de alta presión y acepta helio gaseoso de presión más baja desde la cabeza fría; y (3) las conducciones de conexión de alta y baja presión que conectan la cabeza fría al compresor de helio. Cada una de las una o más fases de enfriamiento del dedo frío tiene un diámetro diferente para acomodar variaciones en las propiedades del fluido de helio a varias temperaturas. Cada fase del dedo frío comprende un regenerador interno y un volumen de expansión interno en el que la refrigeración se produce en el extremo más frío de cada fase.

35 Como resultado del desarrollo de estos refrigeradores criogénicos, las plantas de licuefacción a pequeña escala (clase S) han llegado a estar comercialmente disponibles, sin embargo el rendimiento de estos aparatos de licuefacción está actualmente limitado a menos de 2 litros/día/kW. En estos aparatos de licuefacción, el gas a licuar no se somete a los complejos ciclos termodinámicos, sino que en su lugar se enfría simplemente mediante el intercambio térmico con las fases frías del refrigerador criogénico o con intercambiadores de calor conectados a las fases frías del refrigerador criogénico. En estos aparatos de licuefacción a pequeña escala, una cabeza fría del refrigerador criogénico opera en el cuello de un recipiente de doble pared, a menudo llamado Dewar, que contiene sólo el gas a licuar y está térmicamente aislado para minimizar el flujo de calor desde el exterior hacia el interior del recipiente. Después de que el gas se condensa, el líquido resultante se almacena dentro del depósito interior del Dewar.

40 Idealmente tales aparatos de licuefacción a pequeña escala basados en un refrigerador criogénico conseguirían una

5 eficiencia comparable a la de los aparatos de licuefacción a gran y media escala. Sin embargo, en la práctica, el rendimiento de licuefacción alcanzable en cuanto a litros por día por kW ha sido significativamente menor para estos aparatos de licuefacción a pequeña escala que el rendimiento obtenido por las plantas de licuefacción de clase M y Clase L más grandes. Por consiguiente, aún hay mucho que mejorar en el rendimiento de los aparatos de licuefacción a pequeña escala, y tales mejoras serían de particular beneficio en la técnica.

Compendio de la invención

Problema técnico

10 Las plantas de licuefacción a pequeña escala actualmente disponibles para producir menos de 20 litros de criógeno licuado al día, o aparatos de licuefacción de "Clase S", son sustancialmente ineficientes cuando se comparan con los rendimientos obtenidos en plantas de licuefacción a mayor escala. Además, las plantas a media y gran escala implican complejidad sustancial, requieren un mantenimiento extensivo y sus tasas de licuefacción son muy superiores a las necesidades de muchos usuarios. De acuerdo con estas limitaciones, no se disponía previamente de un aparato de licuefacción de "Clase S" que pudiera alcanzar una eficiencia operativa superior a 2,0 litros/día/kW.

15 El documento GB 2 457 054 así como el anteriormente citado documento US 2009/293505 están ambos diseñados como sistemas de recondensación en criostatos de dispositivo de baja temperatura con el propósito de mantener el sistema a la baja temperatura diseñada requerida para operar, por ejemplo, dispositivos superconductores tales como un SQUID en el documento US 2009/293505 o un imán superconductor en el documento GB 2 457 054. Estos sistemas por lo tanto no están diseñados para una máxima tasa de licuefacción sino para el enfriamiento optimizado del sistema. En particular, una tasa de licuefacción optimizada no se puede obtener a las típicas más bajas temperaturas proporcionadas para una operación segura de dichos dispositivos superconductores como se considera en los anteriores documentos.

Solución y ventajas de la invención

25 Para obtener un sistema de licuefacción con tasa de licuefacción optimizada, se proporciona un sistema de licuefacción según la reivindicación 1. Es un propósito de realizaciones de esta invención proporcionar un sistema de licuefacción de gas, y métodos para licuefacción de gas en él, basado en un refrigerador criogénico, que está adaptado para utilizar las propiedades termodinámicas de elementos gaseosos para extraer energía de enfriamiento incrementada del refrigerador criogénico operando a presiones elevadas y, por consiguiente, temperaturas de licuefacción elevadas, en las que se utiliza la energía de refrigeración incrementada del refrigerador criogénico para mejorar la tasa de licuefacción y el rendimiento del sistema.

30 Para llevar a cabo estas mejoras, el sistema de licuefacción de gas está adaptado con un medio para controlar la presión dentro de una región de licuefacción del sistema de tal manera que una presión elevada proporcione operación a una temperatura de licuefacción incrementada como se describe anteriormente. Mediante el control preciso del flujo de gas en el sistema, se puede mantener una presión de licuefacción interna a un umbral elevado. A la presión elevada, justo por debajo de la presión crítica, se utiliza la potencia de enfriamiento incrementada de la cabeza fría.

35 La región de licuefacción se define aquí como un volumen dentro del Dewar que incluye una primera región de enfriamiento adyacente a una primera fase de un refrigerador criogénico en la que el gas que entra en el sistema se enfría inicialmente y una segunda región de condensación adyacente a una segunda o subsiguiente fase del refrigerador criogénico en la que el gas enfriado se condensa adicionalmente en una fase líquida. De este modo, para los propósitos de esta invención, la región de licuefacción incluye la porción del cuello de Dewar y se extiende hasta la porción de almacenamiento donde se almacena el criógeno licuado.

45 En varias realizaciones de la invención, los medios para controlar la presión pueden incluir un módulo de control de presión unitario adaptado para regular un flujo de gas de entrada para entrar en la región de licuefacción de manera que la presión dentro de la región de licuefacción se mantenga con precisión durante un proceso de licuefacción. Alternativamente, una serie de componentes de control de presión seleccionados de válvulas de solenoide, un medidor de flujo másico, reguladores de presión y otros dispositivos de control de presión se pueden disponer individualmente en varias localizaciones del sistema de tal manera que un agrupamiento colectivo del rendimiento de aparatos de licuefacción a pequeña escala, y tales mejoras serían de particular beneficio en la técnica.

Sumario de la invención

50 Problema técnico

55 Las plantas de licuefacción a pequeña escala actualmente disponibles para producir menos de 20 litros de criógeno licuado al día, o aparatos de licuefacción de "Clase S", son sustancialmente ineficientes cuando se comparan con los rendimientos obtenidos en plantas de licuefacción a mayor escala. Además, las plantas a media y gran escala implican complejidad sustancial, requieren un mantenimiento extensivo y sus tasas de licuefacción son muy superiores a las necesidades de muchos usuarios. De acuerdo con estas limitaciones, no ha estado disponible previamente un aparato de licuefacción de "Clase S" que pueda alcanzar eficiencias operativas superiores a 2,0

litros/día/kW.

Solución y ventajas de la Invención

5 Es un propósito de realizaciones de esta invención proporcionar un sistema de licuefacción de gas y métodos para la licuefacción de gas en ellas, basados en un refrigerador criogénico, que está adaptado para utilizar las propiedades termodinámicas de elementos gaseosos para extraer energía de enfriamiento incrementada del refrigerador criogénico operando a presiones elevadas y, por consiguiente, temperaturas de licuefacción elevadas, en el que se utiliza la potencia de enfriamiento incrementada del refrigerador criogénico para mejorar la tasa de licuefacción y el rendimiento del sistema.

10 Para conseguir estas mejoras, el sistema de licuefacción de gas está adaptado con un medio para controlar la presión dentro de una región de licuefacción del sistema de tal manera que una presión elevada proporcione operación a una temperatura de licuefacción incrementada como se describe anteriormente. Mediante el control preciso del flujo de gas al sistema, se puede mantener una presión de licuefacción interna a un umbral elevado. A la presión elevada, justo por debajo de la presión crítica, se utiliza la potencia de enfriamiento incrementada de la cabeza fría.

15 La región de licuefacción se define aquí como un volumen dentro del Dewar que incluye una primera región de enfriamiento adyacente a una primera fase de un refrigerador criogénico en la que el gas que entra en el sistema se enfría inicialmente y una segunda región de condensación adyacente a una segunda o subsecuente fase del refrigerador criogénico en la que el gas enfriado se condensa adicionalmente en una fase líquida. De este modo, para los propósitos de esta invención, la región de licuefacción incluye la porción de cuello del Dewar y se extiende hasta la porción de almacenamiento en la que se almacena el criógeno licuado.

20 En varias realizaciones de la invención, los medios para controlar la presión pueden incluir un módulo de control de presión unitario que está adaptado para regular un flujo de gas de entrada para entrar en la región de licuefacción de manera que la presión dentro de la región de licuefacción se mantenga con precisión durante un proceso de licuefacción. Alternativamente, una serie de componentes de control de presión seleccionados de válvulas de solenoide, un medidor de flujo másico, reguladores de presión y otros dispositivos de control de presión se pueden disponer individualmente en varias localizaciones del sistema de tal manera que un agrupamiento colectivo de los componentes individualizados esté adaptado para proporcionar control de un gas de entrada que entra en la región de licuefacción del sistema.

30 En ciertas realizaciones de la invención, el elemento gaseoso licuado es helio. El helio gaseoso se licúa a continuación a presiones cercanas a 2,27 bar ya alrededor de 5,19 K para maximizar la potencia disponible del refrigerador criogénico de ciclo cerrado. Como datos indicativos, para una realización preferida de la invención, el sistema es capaz de licuar una masa de 19 kg de helio a partir de 105.000 litros de helio gaseoso en condiciones estándar en un recipiente de 150 litros de volumen. Esto se logra con una tasa de licuefacción que supera los 65 litros/día (o 260 g/hora) a 5,19 K, que es equivalente a 50 litros/día a 4,2 K, usando un refrigerador criogénico típico que genera 1,5 W de potencia de enfriamiento a 4,2 K con un consumo de 7,5 kW de potencia eléctrica. El factor de rendimiento, R, es por lo tanto > 7 litros/día/kW, lo que supone una mejora significativa con respecto a los aparatos de licuefacción a pequeña escala actualmente disponibles. Naturalmente, a medida que las eficiencias de los refrigeradores criogénicos mismos continúan mejorando, también lo hará el rendimiento del sistema de licuefacción de gas descrito aquí.

40 Las mejoras de licuefacción mencionadas anteriormente se consiguen mediante un sistema de licuefacción de gas para licuar gas que comprende:

un módulo de admisión de gas configurado para proporcionar gas al sistema desde una fuente de gas;

45 un recipiente térmicamente aislado, cuya parte superior comprende por lo menos una porción de cuello, y comprende adicionalmente por lo menos un recipiente interior configurado para mantener gas y el líquido resultante del gas que ya se ha licuado;

por lo menos una cabeza fría de refrigerador criogénico localizada en la parte superior del recipiente térmicamente aislado, con su porción fría que se extiende por lo menos parcialmente dentro de la porción del cuello y dirigida hacia el depósito interior del recipiente;

50 un compresor de gas configurado para proporcionar gas comprimido a la cabeza fría del refrigerador criogénico por medio de conexiones para el funcionamiento del refrigerador criogénico;

por lo menos un mecanismo de control de presión de gas configurado para controlar la presión de admisión de gas que fluye desde el módulo de admisión de gas y para ajustar tal presión a la presión de gas requerida dentro del sistema; y

55 dispositivos de control configurados para controlar el rendimiento del sistema y la cabeza fría del refrigerador criogénico por medio de los mecanismos de control de presión del gas.

5 El sistema según realizaciones de la invención se adapta para mantener el control preciso de la presión de vapor dentro del recipiente, y de este modo se adapta para mantener el control preciso de la temperatura y por consiguiente la potencia del refrigerador criogénico donde se produce la condensación. Consecuentemente, el sistema permite el control del punto de operación y potencia del refrigerador criogénico, como se determina por las temperaturas de sus una o más fases, y por ello la cantidad de calor que se puede extraer del gas, tanto para su pre-enfriamiento desde temperatura ambiente hasta el punto de operación como para su condensación y licuefacción.

Otro aspecto de la invención proporciona un método de licuefacción de gas que hace uso del sistema de licuefacción de gas descrito en la presente solicitud que comprende las siguientes etapas:

- 10 proporcionar una cantidad de gas al sistema de licuefacción de gas a través del módulo de admisión de gas;
- regular la presión del gas que entra en el depósito interior por medio de mecanismos de control del gas y los dispositivos de control;
- regular la potencia de la cabeza fría del refrigerador criogénico por medio de los mecanismos de control de la presión del gas y dispositivos de control para determinar una tasa de licuefacción deseada;
- 15 controlar una tasa de cambio de presión del gas entrante al depósito interior por medio de los mecanismos de control de la presión del gas para optimizar la tasa de licuefacción dentro del depósito interior tanto durante como después de los cambios de presión; y
- regular una presión del gas presente en el depósito interior del recipiente aislado hasta un valor constante determinado, para establecer la deseada tasa de licuefacción.

20 En resumen, el sistema de licuefacción de gas descrito en la Descripción detallada a continuación consigue eficiencias mucho más altas que los aparatos de licuefacción basados en refrigerador criogénico existentes, realizando la licuefacción de gas a una presión más alta y por lo tanto a una temperatura más alta, en el que el refrigerador criogénico tiene una potencia de enfriamiento mucho mayor para realizar la licuefacción y el criógeno que se está licuando tiene un calor de condensación mucho más bajo. La eficiencia de licuefacción del sistema se mejora y se estabiliza adicionalmente controlando con precisión el caudal del gas a temperatura ambiente que entra en la región de licuefacción y, por ello, controla con precisión la presión del gas de condensación en la región de licuefacción del sistema. El doble efecto de una mayor potencia del refrigerador criogénico y un menor calor de condensación a la presión de condensación más alta, mejorado adicionalmente por el control de presión preciso, permite que este nuevo proceso de licuefacción de gas logre tasas mucho más altas de licuefacción con menos potencia de entrada al refrigerador criogénico que las actualmente disponibles de otros aparatos de licuefacción basados en refrigerador criogénico.

25

30

Breve descripción de los dibujos

Las características y ventajas de esta invención serán más evidentes a partir de la siguiente descripción detallada, cuando se lea conjuntamente con los dibujos adjuntos, en los que:

- 35 La Fig. 1 es un diagrama de fases de helio 4;
- La Fig. 2 es el mapa de carga para un refrigerador criogénico típico que tiene 2 fases, que muestra la potencia de enfriamiento tanto de la primera como de la segunda fase del refrigerador criogénico a varias temperaturas, así como varios puntos de funcionamiento (a, b y c) de la cabeza fría durante una trayectoria característica de un ciclo de licuefacción típico de este sistema de licuefacción;
- 40 La Fig. 3 es un diagrama esquemático del sistema y sus elementos compuestos según por lo menos una realización de la invención;
- La Fig. 4 es un esquema general de una porción del sistema para la licuefacción mejorada del gas criógeno de la Fig. 3, que ilustra adicionalmente caminos de convección alrededor de una región de licuefacción del sistema; y
- 45 La Fig. 5 es un esquema del sistema según la Fig. 4, que representa adicionalmente un área delimitada por una línea discontinua dentro del sistema que se denomina aquí región de licuefacción.

Descripción de realizaciones

50 En la siguiente descripción, con fines de explicación y no de limitación, se describen detalles y descripciones para proporcionar una comprensión completa de la presente invención. Sin embargo, será evidente para los expertos en la técnica que la presente invención se puede practicar en otras realizaciones que se apartan de estos detalles y descripciones sin apartarse del espíritu y alcance de la invención. A continuación se describirán algunas realizaciones con referencia a los dibujos, en los que las características ilustrativas se indican mediante números de referencia.

En una realización general de la invención, un sistema de licuefacción, también denominado aquí criostato, incluye un recipiente de almacenamiento aislado o Dewar que comprende una porción de almacenamiento y una porción de cuello que se extiende desde la misma y está conectada a un recipiente externo que está a temperatura ambiente. El Dewar está aislado por una envoltura, estando el volumen dentro de la envoltura externa de la porción de almacenamiento substancialmente evacuado de aire. La porción de cuello está adaptada para recibir por lo menos parcialmente una cabeza fría de refrigerador criogénico. La cabeza fría puede comprender una o más fases, cada una de las cuales tiene una sección transversal distinta. La porción de cuello del recipiente aislado puede estar opcionalmente adaptada para adaptarse geométricamente a una o más fases del refrigerador criogénico de cabeza fría de una manera escalonada. El recipiente aislado comprende además un puerto de transferencia que se extiende desde la porción de almacenamiento hasta una superficie superior del Dewar. Se proporciona adicionalmente un mecanismo de control para controlar el flujo de gas y, por lo tanto, la presión dentro de una región de licuefacción del Dewar. El mecanismo de control incluye generalmente: un sensor de presión para detectar la presión dentro de la región de licuefacción del criostato; un regulador de presión u otros medios para regular la presión del gas que entra en la región de licuefacción del Dewar; un medidor de flujo másico; y una o más válvulas para regular el flujo de gas de entrada que entra en la región de licuefacción. En este sentido, el mecanismo de control está conectado además a un ordenador para modular dinámicamente el flujo de gas de entrada y, por consiguiente, la presión dentro de la región de licuefacción del criostato para proporcionar una eficiencia óptima.

Aunque no está ilustrado, se debe señalar que el criostato puede comprender una o más porciones de almacenamiento y una o más porciones de cuello que se extienden desde allí dentro del recipiente aislado.

En una realización de la invención, la cabeza fría de refrigeración del sistema de licuefacción de gas se dirige hacia el depósito interior del recipiente y comprende por lo menos una fase que define una fase de refrigeración.

En otra realización de la invención, la cabeza fría del refrigerador criogénico comprende un cilindro que se dirige hacia el depósito interior del recipiente que consiste en una primera fase y una segunda fase, ambas orientadas en paralelo al cuello del recipiente y que definen colectivamente dos fases de refrigeración.

En otra realización más, la cabeza fría del refrigerador criogénico dirigida hacia el depósito interior del recipiente comprende tres o más fases que definen colectivamente tres o más fases de refrigeración.

Para estas realizaciones de la invención, la cabeza fría que comprende una o más fases del sistema de refrigeración opera en el cuello de un recipiente térmicamente aislado o Dewar. La primera fase es la más caliente y opera en el cuello más lejos de la región de licuefacción que las otras fases que operan en el cuello más cerca de la región de licuefacción. El gas entra en el extremo caliente del cuello y se pre-enfría por las paredes de la primera fase de la cabeza fría, por el extremo más frío de la primera fase, se pre-enfría adicionalmente por las paredes de las fases más frías y se condensa a continuación en el extremo más frío de la fase más fría de la cabeza fría. (Para la realización en una fase, la condensación ocurre en el extremo más frío de la primera fase.). Una vez condensado o licuado, el líquido cae al fondo del depósito, o porción de almacenamiento, situado en el interior del recipiente aislado. La potencia de enfriamiento que genera cada fase de un refrigerador criogénico de ciclo cerrado está determinada principalmente por su temperatura, pero también depende hasta el segundo orden de la temperatura de las fases anteriores. Esta información es generalmente suministrada por el fabricante del refrigerador criogénico en forma de un mapa de carga bidimensional que representa la dependencia de la potencia de la primera y segunda fase frente a las temperaturas de la primera y segunda fase. De importancia para esta invención es que la potencia de enfriamiento disponible en cada fase se incrementa generalmente con la temperatura.

Además de generar potencia de enfriamiento en la primera y en las subsecuentes fases, la cabeza fría también genera potencia de refrigeración a lo largo de toda su longitud, en particular a lo largo de la superficie del dedo frío cilíndrico entre la temperatura ambiente y el extremo más frío de la primera fase, y a lo largo de la longitud del dedo frío cilíndrico entre la primera y las subsecuentes fases. Un objetivo de esta invención es optimizar el intercambio de calor entre el gas y las diversas fases de enfriamiento, así como entre el gas y las paredes del dedo frío cilíndrico entre las diversas fases de enfriamiento de la cabeza fría del refrigerador criogénico. Esto se consigue usando las altas propiedades de conductividad térmica del gas sin la necesidad de intercambiadores de calor mecánicos o condensadores de ningún tipo que se unan a la cabeza fría, o cualquier pantalla de radiación en el cuello, que generalmente se han considerado esenciales en los sistemas más avanzados anteriores. Por lo tanto, también es un objetivo de esta invención extraer tanto calor del gas como sea posible a la temperatura más alta posible optimizando la transferencia de calor entre el gas y las paredes del dedo frío cilíndrico entre las diversas fases de enfriamiento. Esto también reducirá la carga térmica en las diversas fases de enfriamiento de la cabeza fría del refrigerador criogénico, optimizando por ello la eficiencia térmica del proceso de pre-enfriamiento y licuefacción.

Generalmente, se construye una cabeza fría multifase que tiene la fase primera o superior de un diámetro mayor que las fases inferiores de la cabeza fría. En este aspecto, las fases de la cabeza fría del refrigerador criogénico se fabrican con un patrón de fases en el que las dos o más fases tienen diferentes secciones transversales. La porción de cuello del recipiente aislado se puede adaptar en varias realizaciones para recibir la una o más fases de la cabeza fría del refrigerador criogénico.

En una realización, la porción de cuello del recipiente aislado puede incluir una superficie interna adaptada para que

5 coincida estrechamente con la superficie de una o más fases de la cabeza fría del refrigerador criogénico, de tal manera que la porción de cuello comprende un primer diámetro interior en la primera fase y un segundo diámetro interior en la segunda fase, en el que el primer diámetro interior es distinto del segundo diámetro interior. El volumen reducido reduce la carga de calor hacia abajo del cuello, mientras que el cuello escalonado mejora el proceso de intercambio entre el gas y el refrigerador criogénico, favoreciendo la convección natural en el área escalonada, por lo menos durante el enfriamiento inicial.

10 Alternativamente, la porción de cuello se puede adaptar con un diámetro interior uniforme que se extiende a lo largo de una longitud de la porción de cuello adyacente a una o más fases de la cabeza fría del refrigerador criogénico. Cuando se usa un cuello recto, el proceso de intercambio sigue siendo eficiente para el enfriamiento inicial y la licuefacción. De este modo, la presente invención puede hacer uso de cuellos rectos o escalonados dentro del recipiente.

En una realización de la invención, el mecanismo de control de presión de gas comprende uno o más de los siguientes elementos:

15 una válvula de entrada electrónicamente controlada, tal como una válvula de solenoide, que permite el flujo de gas dentro del sistema desde el módulo de admisión de gas;

un regulador de presión absoluta, que regula la presión del gas que fluye desde el módulo de admisión de gas al depósito interior del recipiente térmicamente aislado;

un medidor de flujo másico, que mide el volumen del gas procedente del regulador de presión absoluta y que entra en el depósito interior; y

20 un sensor de presión dentro del recipiente aislado, que mide la presión del gas dentro del depósito interior del recipiente aislado

25 Según esta realización de la invención, un sistema de tubos o tuberías, válvulas (controladas manual o electrónicamente) y mecanismos de control permite la manipulación tanto de la presión como del caudal másico del gas a medida que entra en el Dewar. La presión del gas de admisión puede diferir de la presión del gas presente dentro del Dewar, o la presión en el Dewar puede necesitar ser ajustada para conseguir el rendimiento óptimo. Para evitar cambios de presión rápidos que perturben en gran medida las condiciones de equilibrio, el sistema integra los mecanismos de control de presión del gas anteriormente mencionados por medio de, por ejemplo, una válvula de solenoide y un mecanismo de control de presión. Este proceso regula la presión de admisión según se considere necesario para controlar el flujo de gas desde los mecanismos de admisión de gas hasta el Dewar.

30 Adicionalmente, el sistema de esta invención logra su control de presión de precisión mediante el uso de mecanismos de control que regulan la potencia de refrigeración de la cabeza fría del refrigerador criogénico mediante el ajuste de las válvulas y del flujo másico del gas.

35 Además, los mecanismos de control reciben los datos necesarios del sistema para calcular el nivel de líquido dentro del recipiente, que es necesario para realizar los ajustes necesarios. Adicionalmente, los procesos de licuefacción se pueden realizar a intervalos de presión variables que comienzan ligeramente por encima de las presiones atmosféricas y alcanzan valores de presión de gas casi críticos. Todas las funciones y procedimientos son controlables remotamente o in situ, usando dispositivos programables tales como ordenadores personales o un FPGA (Field Programmable Gate Array), con software de control específico (tal como aplicaciones basadas en LabView), o conectados a hardware de almacenamiento digital en el que dicho software se almacena y se accede de forma remota.

40 En otra realización de la invención, el sistema de licuefacción comprende un puerto de transferencia y una válvula situados en la parte superior del recipiente aislado que permite la extracción del líquido, resultante del gas licuado presente en la porción de almacenamiento dentro del depósito interior.

45 En una realización de la invención, el método de licuefacción de gas comprende la determinación del nivel del gas licuado dentro de la porción de almacenamiento del depósito interior a partir de la masa total del gas contenido en el depósito interior y las densidades de gas y líquido determinadas por la medida de la presión o temperatura en el equilibrio termodinámico. El nivel de gas se puede calcular en base a un algoritmo que implica el caudal másico, el caudal másico integrado, el volumen total del depósito interior del recipiente y las densidades del gas y del líquido, como se determinan por la presión y temperatura en el interior del recipiente.

50 En otra realización de la invención, el método de licuefacción de gas incluye un modo de limpieza que comprende las etapas de:

activar que se cierre la válvula de entrada, impidiendo el flujo de gas dentro del sistema de licuefacción de gas;

determinar y mantener la presión del recipiente aislado; y

realizar ciclos de encendido/apagado de la cabeza fría de refrigeración, forzando las temperaturas de las fases del refrigerador criogénico a exceder de las temperaturas de fusión y sublimación de las impurezas presentes en el interior del recipiente aislado, haciendo precipitar dichas impurezas y caer en el fondo del depósito interior y limpiando de este modo la zona en la que el gas se pre-enfría y licua.

5 En otra realización más, el método de licuefacción de gas incluye un modo de espera, en el que el volumen de gas licuado se conserva indefinidamente en equilibrio con el vapor, iniciado por los dispositivos de control, activando la válvula de admisión por medio de los mecanismos de control de presión del gas para cerrar la admisión de gas en el sistema y obtener la potencia reducida necesaria realizando ciclos de arranque/parada de la cabeza fría o mediante el control de velocidad de la cabeza fría del refrigerador criogénico.

10 Mediante el modo de espera anterior, que realiza ciclos de arranque/parada y el modo de limpieza, por la manipulación automática de los mecanismos de admisión-control, se puede detener la licuefacción de gas y mantener el volumen de líquido constante en el depósito interior. Los ciclos de arranque/parada de la cabeza fría del refrigerador criogénico producen ciclos de temperatura en la cabeza fría que permiten la fusión y subsecuente precipitación de las impurezas adquiridas en el cilindro escalonado de la cabeza fría mencionada anteriormente.

15 En otra realización más, el método de licuefacción de gas permite la licuefacción directa del gas recuperado a o ligeramente por encima de la presión atmosférica, comprendiendo el método:

almacenar el gas en el depósito de almacenamiento de expansión a o ligeramente por encima de la presión atmosférica; y

20 mantener el sistema a o cerca de la presión atmosférica por medio de los mecanismos de control de presión de gas para optimizar la licuefacción.

Para el caso del helio, cuando la presión de vapor en el Dewar está en equilibrio con el líquido, la temperatura del helio gaseoso y líquido está definida únicamente por la curva de equilibrio de la presión de vapor. Es significativo para esta invención que la temperatura del helio aumenta con la presión a lo largo de la curva de presión de vapor. En el caso del helio, tanto la presión como la temperatura aumentan desde el punto triple del helio (a una presión absoluta de 0,051 bar y una temperatura de 2,17 K) hasta el punto crítico del helio, que ocurre a la presión crítica, P_c , de 2,27 bar absolutos y la temperatura crítica, T_c , de 5,19 K. Normalmente, sin carga aplicada, la temperatura más baja alcanzada por los refrigeradores criogénicos de ciclo cerrado es de alrededor de 3 K para la cual la presión de vapor de helio es de alrededor de 0,5 bar. Por lo tanto, un intervalo práctico para el cual las capacidades de los sistemas de refrigerador criogénico de ciclo cerrado y la curva de presión de vapor de helio se solapan es de alrededor de 0,5 bar a 3 K a 2,27 bar a 5,19 K. Por consiguiente, el sistema de refrigeración también puede rendir en el punto intermedio a presión atmosférica y a una temperatura de 4,23 K.

25

30

En otra realización del método de licuefacción de gas de la presente invención, los mecanismos de control de presión del gas, el módulo de admisión de gas y los dispositivos de control están gobernados por medio de un programa de software en por lo menos un medio de almacenamiento de datos digitales.

35 En otra realización, el medio de almacenamiento de datos digitales está conectado a un dispositivo programable encargado de ejecutar el programa de software.

En otra realización general, se proporciona un método para la licuefacción de gas junto con los sistemas descritos. El método comprende:

40 (i) proporcionar por lo menos: una fuente que contiene una cantidad de criógeno en fase gaseosa; un Dewar que tiene una región de licuefacción definida por una porción de almacenamiento y una porción de cuello que se extiende desde la misma; un refrigerador criogénico por lo menos parcialmente dispuesto dentro de la porción de cuello, estando adaptado el refrigerador criogénico para condensar el criógeno contenido dentro de la región de licuefacción desde una fase gaseosa a una fase líquida; y un mecanismo de control de presión, comprendiendo el mecanismo de control de presión por lo menos un sensor de presión, un medidor de flujo másico y una o más válvulas;

45

(ii) medir la presión de vapor dentro de dicha región de licuefacción de dicho Dewar usando dicho sensor de presión;

(iii) mantener dicha presión de vapor dentro de dicha región de licuefacción dentro de un intervalo operativo controlando dinámicamente un flujo de gas de entrada alrededor de la región de licuefacción; y

50 (iv) regular el flujo de gas de entrada alrededor de la región de licuefacción usando el mecanismo de control de presión.

En ciertas realizaciones, el método puede comprender adicionalmente la etapa de procesar datos en un ordenador para el control dinámico del criostato, en el que los datos incluyen por lo menos uno de: la presión de vapor medida, y una velocidad del flujo de gas de entrada.

Aunque el helio se discute extensamente en las realizaciones representativas, se debe reconocer que se pueden utilizar otros criógenos de una manera similar que incluyen, sin limitación: nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, neón, y otros gases.

Además, se debe reconocer que aunque representados como una unidad distinta en varias realizaciones descriptivas aquí, los componentes del mecanismo de control se pueden localizar individualmente cerca de otros componentes del sistema y adaptar para efectuar un proceso de licuefacción similar. Por ejemplo, el regulador de presión se puede unir a la fuente de almacenamiento de gas o colocar si no en cualquier lugar entre la fuente de almacenamiento y la región de licuefacción del sistema criostático. Alternativamente, la fuente puede estar provista de un compresor para suministrar un gas de entrada a la presión deseada. Tal sistema no requeriría necesariamente un regulador de presión dentro del mecanismo de control de presión. Se debe reconocer que se pueden conseguir varias configuraciones modificadas del sistema descrito tal que se pueden obtener similares resultados. Por consiguiente, el mecanismo de control de presión se desea que incluya una colección de componentes en unión directa o si no colectivamente proporcionados dentro del sistema para controlar dinámicamente el flujo de gas de entrada, y de este modo la presión dentro de la región de licuefacción del criostato.

Volviendo ahora a los dibujos, la Fig. 1 ilustra un diagrama de fases general del helio 4. El intervalo de operación para las cabezas frías de refrigerador criogénico de ciclo cerrado está entre alrededor de 3,0 K y alrededor de 5,2 K y entre alrededor de 0,25 bar y alrededor de 2,27 bar. En referencia a la curva de licuefacción de la Fig. 1, Z_1 representa un punto en el que se licua helio gaseoso a presión atmosférica, y la temperatura de licuefacción es de alrededor de 4,2 K, como es la actual técnica más avanzada para aparatos de licuefacción a pequeña escala. Z_2 representa un punto en la curva de licuefacción en el que se licua helio gaseoso justo por debajo del punto crítico en el que el líquido y gas están en equilibrio. La presión en Z_2 está cerca de la presión crítica P_c (aquí alrededor de 2,2 bar), y la temperatura de licuación en Z_2 es de alrededor de 5,2 K. Es en este punto (Z_2) en el que se desea que opere el presente sistema de licuefacción y se opera preferentemente durante un típico proceso de licuefacción de helio gaseoso.

La presión de licuefacción óptima está ligeramente por debajo de la presión crítica, es decir, 2,1 bar para el caso del helio, una presión para la que las tasas pueden alcanzar y superar los 65 litros/día a 2,1 bar (260 g/h), equivalente a 50 litros/día a 1 bar, con eficiencias iguales o incluso superiores a 7 litros/día/kW.

La figura 2 representa un mapa de carga que define las características de una cabeza fría 18 de refrigerador criogénico típica (véase la figura 3) que funciona a 50 Hz y que usa 7,5 kW de potencia. El mapa de carga define la relación única entre un conjunto de pares de puntos (T_1 , T_2) y (P_1 , P_2), en los que T_1 es la temperatura del extremo más frío de la primera fase, T_2 es la temperatura del extremo más frío de la segunda fase, P_1 es la potencia de la primera fase 10 y P_2 la potencia de la segunda fase 11. El punto medido (0 W, 0 W) representa el punto (3 K, 24 K), que indica que las temperaturas más bajas alcanzadas sin ninguna carga aplicada a cualquiera de las dos fases de este refrigerador criogénico son aproximadamente 3 K en la segunda fase y 24 K en la primera fase. El punto medido (5 W, 40 W) representa el punto (6,2 K, 45 K) y muestra que si se aplica 5 W de potencia a la segunda fase y 40 W de potencia a la primera fase, entonces la segunda fase funcionará a alrededor de 6,2 K y la primera fase a alrededor de 45 K. Los puntos del mapa de carga medidos están conectados por líneas para interpolar puntos intermedios.

Un ciclo eficiente de licuefacción de helio gaseoso también se muestra en el mapa de carga como el ciclo de línea continua que une los puntos (a), (b) y (c). Los puntos se determinan por la temperatura (o presión) del helio y se representan frente a la temperatura T_2 de la segunda fase. El punto (a) está a una temperatura (T_2) de alrededor de 4,3 K, lo que corresponde a una presión de alrededor de 1,08 bar, que está ligeramente por encima de la presión atmosférica a 1,0 bar. En el punto (a), la tasa de licuefacción es de aproximadamente 20 litros/día. El punto (b) está próximo al punto crítico y está a una temperatura T_2 de 5,1 K, que corresponde a una presión de 2,1 bar. El punto (b) es el lugar donde ocurre la máxima eficiencia de licuefacción y normalmente se mantiene el sistema en el punto (b) hasta que el volumen del depósito interior se llena completamente con helio líquido. En el punto (b), la tasa de licuefacción es de aproximadamente 65 litros/día (260 g/h), lo que equivale a 50 litros/día a 1,0 bar. La trayectoria que se muestra uniendo el punto (a) al punto (b) es uno de los caminos más eficientes a seguir entre estos dos puntos mientras se mantienen las condiciones de cuasi-equilibrio.

El punto (c) está a alrededor de 4,2 K (T_2) a presión atmosférica, la presión a la que normalmente vuelve el sistema antes de transferir el líquido del Dewar al equipo científico o médico. La trayectoria que se muestra uniendo punto (b) y punto (c) es una de las trayectorias más eficientes tomadas entre estos dos puntos. No sólo disminuye la presión en el depósito interior, sino que dado que la densidad del líquido aumenta entre estos dos puntos, el volumen del líquido se contrae y por lo tanto la licuefacción debe continuar a lo largo de esta trayectoria para mantener el depósito interior lleno de líquido cuando alcanza el punto (c).

El sistema de licuefacción de gas también puede operar en un intervalo mucho más amplio que la trayectoria definida por los puntos (a), (b) y (c). Un ejemplo del área de trabajo total del aparato de licuefacción se representa como un área encerrada por líneas discontinuas en la Fig. 2. La región inferior izquierda de este área de trabajo incluye la licuefacción del helio gaseoso para presiones inferiores a 1 atmósfera, en la que T_2 , la temperatura del extremo más frío de la segunda fase, es inferior a 4,2K y las tasas de licuefacción a su vez son de alrededor de 17

litros/día. Esta región es apropiada para equipos de MRI y otros equipos que deben operar en estas condiciones. En la región superior derecha de la zona de trabajo, se muestra que el aparato de licuefacción puede operar por encima del punto crítico, donde se llena el depósito interior sólo con helio gaseoso denso. Otras trayectorias eficientes incluyen, por ejemplo, el caso en el que el punto (c) se une con el punto (a), definiendo un ciclo cerrado comprendido por los puntos de trayectoria (a), (b), (a).

La Fig. 3 ilustra un esquema del sistema 1 general de licuefacción de gas según varias realizaciones de la invención. Al sistema se suministra principalmente gas a través del módulo 2 de admisión de gas, preferentemente gas recuperado, de pureza del 99% o superior en el caso del helio, aunque puede funcionar con grados de menor pureza si es necesario. El sistema de la Fig. 3 ilustra dos fuentes 25 de helio gaseoso, una primera fuente está conectada directamente al módulo de admisión de gas, y una segunda fuente comprende además un depósito 24 de almacenamiento de expansión para operación con MRI sensible y otro equipo. El gas se licúa en el depósito 9 interior del matraz o recipiente 8 a vacío térmicamente aislado, tal como un Dewar o un recipiente térmico. El proceso de licuefacción comprende controlar la presión del gas en el depósito interior, mientras que el gas se enfría y condensa por medio de una o más cabezas 18 de refrigerador criogénico que comprenden refrigeradores criogénicos de ciclo cerrado de una o más fases, colocadas en uno o más cuellos 20 del depósito interior del recipiente aislado.

Aunque en principio la presente invención permite el uso de cualquier refrigerador criogénico multifase, la siguiente descripción se refiere a una realización que comprende una cabeza fría con dos fases de refrigeración. No obstante, debe ser evidente para el experto en la técnica que la aplicación a otros tipos de cabezas frías (equipadas con una, dos o más fases de refrigeración) es análogamente conseguible con un incremento equivalente de las tasas de licuefacción.

En la Figura 3, la cabeza fría 18 de refrigerador criogénico tiene dos fases frías definidas por un patrón escalonado, siendo el diámetro cilíndrico de la primera fase 10 mayor que el diámetro de la segunda fase 11. En el caso del helio, la alta conductividad térmica del gas y las corrientes de convección generadas por gradientes térmicos en la dirección de la fuerza de gravedad proporciona un intercambio de calor extremadamente eficiente entre las dos fases de la cabeza fría y el gas y elimina la necesidad de intercambiadores de calor mecánicos, condensadores y pantallas de radiación. Las corrientes de convección son importantes sólo durante el primer enfriamiento, dado que después de que el fondo del depósito 9 interior se enfría, el helio está estratificado en temperatura y el gradiente es siempre opuesto a la fuerza de gravedad. Se usan sensores de temperatura para medir la temperatura de vapor T_{S1} en el extremo inferior de la primera fase 10, la temperatura de vapor T_{S2} en el extremo inferior de la segunda fase 11 y la temperatura de vapor o líquido T_{S3} en la parte inferior del depósito 9 interior. Después de la condensación, el líquido desciende y llena la parte de almacenamiento del depósito interior. El líquido es transferido fuera del depósito interior, ya sea manual o automáticamente, vía la válvula de transferencia o el puerto 6 cuando sea necesario. Los medios de conexión 17 en la cabeza fría se usan para conectar con el compresor de refrigeración 22, vía los que se suministra gas comprimido a y se devuelve desde la cabeza fría 18 vía las conducciones 21 del compresor y la alimentación eléctrica vía el cable de alimentación del compresor 22A.

El mecanismo 19 de control de presión del gas mantiene el control sobre el flujo de entrada del gas para controlar la presión dentro del depósito 9 interior. El mecanismo de control de presión del gas mide la presión del depósito interior usando el sensor 7 de presión y controla el caudal del gas que va al recipiente usando la válvula 3 de entrada (preferentemente una válvula de solenoide), el regulador 4 de presión y varias válvulas de entrada de control de flujo, preferentemente válvulas electrónicas de solenoide o válvulas manuales 12, 13, 14, 15, 16. El medidor 5 de flujo másico de gas mide la velocidad de flujo instantánea, que está modulada por el regulador 4 de presión de gas a medida que controla la presión. El flujo de gas, la presión y la temperatura integrados se usan para calcular la cantidad total de gas así como el nivel de líquido acumulado dentro del depósito 9 interior del recipiente aislado. El mecanismo 19 de control de la presión del gas puede detener la entrada de gas si la presión del suministro de helio es insuficiente, y puede cambiar el sistema a modo de espera para mantener la masa del gas licuado. El flujo másico del gas que va al recipiente aislado y, consecuentemente, la tasa de licuefacción, aumentará a medida que aumenta la potencia disponible para la condensación en la última fase 11 de la cabeza fría 18 del refrigerador criogénico. Dado que el helio está estratificado con el mismo perfil de temperatura que la cabeza fría, el intercambio térmico entre el gas y la cabeza fría es óptimo.

El dispositivo 23 de control por ordenador, que comprende por lo menos un ordenador equipado con software/hardware programado y un monitor, controla el rendimiento del sistema por medio del mecanismo 19 de control de presión del gas, cabeza fría 18 de refrigeración, compresor 22 del refrigerador criogénico, sensores de temperatura e indicadores de nivel opcionales dentro del depósito interior.

El proceso de licuefacción comprende introducir en el depósito 9 interior la masa de gas equivalente al 100% de su volumen y mantenerlo lo más próximo posible a la presión atmosférica o a la presión de la aplicación elegida para el líquido en el menor tiempo posible. Para conseguir esto, se debe extraer la máxima energía del gas por la cabeza fría 18 del refrigerador criogénico durante todo el proceso. Es decir, la trayectoria que el proceso describe en el mapa de carga de la cabeza fría del refrigerador criogénico es idealmente la más eficiente.

En otra realización de la invención, el sistema 1 de licuefacción de gas está configurado para la recuperación de

helio en máquinas de MRI. Para mayor seguridad, el sistema de recuperación de gas puede incluir una válvula de seguridad manual adicional que está situada entre la máquina de MRI y el pequeño depósito 24 de almacenamiento de expansión, preferentemente metálico, que se coloca inmediatamente antes de la entrada de gases. La función de tal depósito de almacenamiento de expansión o recipiente externo es establecer una reserva de gas pequeña en la que la presión puede ser ajustada para operar a o cerca de presiones atmosféricas, siempre dentro del intervalo específico de las máquinas de MRI. Adicionalmente, el puerto 6 de acceso vertical puede estar situado en uno de los lados de la parte superior del Dewar para transferir el helio líquido del aparato de licuefacción al equipo científico o médico de MRI. Este puede estar configurado para insertar un simple tubo de transferencia, o puede estar configurado con una válvula criogénica.

El proceso de condensación del vapor frío que se acumula como líquido en el depósito 9 interior corresponde a un proceso isobárico durante el cual cualquier perturbación en la presión produce una tasa de licuefacción disminuida. Para que el sistema 1 de licuefacción de gas funcione con eficiencia óptima, es necesario por lo tanto realizar un control de presión preciso del depósito 9 interior usando el control electrónico del diverso mecanismo 19 de control de presión de gas y mantener el control durante todo el proceso.

Se ha observado que las mayores tasas de licuefacción sólo se pueden obtener con una pureza de gas de 99,99% o mejor, mientras que el gas de menor pureza degrada significativamente el rendimiento de licuefacción. Además, después de la contaminación con gas impuro, el sistema no muestra ninguna mejora de la tasa de licuefacción cuando el gas de entrada vuelve a ser 99,99% de pureza o mejor. Sin embargo, el modo de espera también se puede usar para limpiar las superficies de la cabeza fría y para restaurar la eficiencia. Cuando las temperaturas de la primera fase y la segunda fase se establecen lo suficientemente altas para producir la fusión y sublimación de cualquier impureza, el sistema experimenta un proceso de regeneración, o limpieza, sin pérdida de gas. Después de un conjunto de varios de tales ciclos en modo de espera, la tasa de licuefacción aumenta de nuevo a valores característicos de la licuefacción de gas de alta pureza. Durante las operaciones de transferencia de líquido, se reproduce el mismo efecto de purga o regeneración debido al aumento de temperatura (más de 100 K) tanto de la primera fase como de la segunda fase de la cabeza fría de refrigeración.

Las Figs. 4 y 5 ilustran adicionalmente un sistema para la licuefacción de criógeno según varias realizaciones de la invención. El sistema 101 incluye un recipiente 102 aislado a vacío que tiene una porción de almacenamiento o depósito 103 y una porción 104 de cuello que se extiende desde la parte de almacenamiento, un refrigerador criogénico 105 de cabeza fría recibido por lo menos parcialmente dentro de la parte de cuello y la región 106 de licuefacción definida por un volumen de espacio generalmente dispuesto entre la porción de almacenamiento y la porción de cuello adyacente a la cabeza fría, tal como se representa adicionalmente por el área delimitada por una línea discontinua de la Fig. 5. La cabeza fría incluye N fases de cabeza fría representadas como primera fase 107, segunda fase 108, tercera fase 109 y enésima fase 110. En el sistema de la Fig. 5, la porción de cuello es un cuello recto. Sin embargo, como se indica con líneas discontinuas en la Fig. 4, el cuello se puede adaptar opcionalmente para ajustarse geoméricamente a la superficie de las fases de la cabeza fría. Los caminos 111 de convección del gas de enfriamiento se representan adicionalmente en la Fig. 4. El sistema está adaptado para mejorar la licuefacción del criógeno mediante el control de la presión dentro de la región de licuefacción del criostato. El mecanismo 114 de control de presión incluye un controlador 112 de presión electrónico y un medidor 113 de flujo másico para controlar el gas de entrada que fluye dentro del criostato tal que la presión dentro de la región de licuefacción se optimiza para una licuefacción mejorada. El puerto 115 de extracción proporciona acceso al criógeno licuado.

En ciertas realizaciones de la invención, un método para la licuefacción mejorada de criógeno, tal como helio, incluye:

proporcionar un criostato que incluye un recipiente aislado a vacío que tiene una porción de almacenamiento y por lo menos una porción de cuello que se extiende desde ella, un refrigerador criogénico de cabeza fría recibida por lo menos parcialmente dentro de la parte de cuello y una región de licuefacción definida por un volumen de espacio dispuesto entre la porción de almacenamiento y la porción de cuello adyacente a la cabeza fría;

proporcionar un mecanismo de control de presión para mantener una presión deseada alrededor de la región de licuefacción del criostato, en el que la presión deseada es sustancialmente uniforme alrededor de la región de licuefacción; y

controlar la presión dentro de la región de licuefacción durante un proceso de licuefacción de tal modo que la licuefacción del criógeno se puede conseguir a temperaturas ligeramente más altas en el que el refrigerador criogénico está configurado para operar a una potencia de enfriamiento incrementada.

REIVINDICACIONES

- 1.- Un sistema (1) de licuefacción de gas para licuar que comprende:
- 5 un módulo (2) de admisión de gas adaptado para estar conectado a una fuente de gas y configurado para proporcionar gas al sistema;
- un recipiente (8) térmicamente aislado;
- por lo menos un depósito (9) interior en el recipiente (8) que tiene por lo menos un cuello (20) que se extiende desde allí;
- 10 por lo menos una cabeza fría (18) de refrigeración que tiene una porción de dedo frío localizada dentro del cuello y dirigida hacia el depósito interior;
- un compresor (22) de gas configurado para proporcionar gas comprimido a la cabeza fría de refrigeración para la operación del refrigerador criogénico;
- caracterizado por el hecho de que:
- 15 por lo menos un mecanismo (19) de control de la presión del gas configurado para controlar la presión de admisión del gas que fluye desde el módulo (2) de admisión de gas y para ajustar tal presión a la requerida elevada presión del gas dentro del depósito (9) interior y
- 20 por lo menos un dispositivo (23) de control para controlar el rendimiento de licuefacción del sistema, dicho por lo menos un mecanismo (19) de control de presión del gas y dicho por lo menos un dispositivo (23) de control estando configurados para optimizar el rendimiento de licuefacción e incrementar la tasa de licuefacción controlando el flujo de gas dentro al depósito (9) interior para mantener la presión dentro del interior (9) justo por debajo de la presión crítica del gas que se está licuando y
- por lo menos un puerto (6) de transferencia está en comunicación de fluido con el depósito (9) interior y está adaptado para permitir la extracción del criógeno de ahí.
- 25 2.- El sistema de licuefacción de gas según la reivindicación 1, caracterizado por el hecho de que por lo menos una cabeza fría de refrigeración dirigida hacia el depósito interior comprende una, dos, o más fases (107, 108, 109, 110) que tiene cada una un sección transversal distinta.
- 3.- El sistema de licuefacción de gas según la reivindicación 2, caracterizado por el hecho de que el cuello del depósito interior tiene un patrón escalonado según la geometría de las fases (107, 108, 109, 110) de la cabeza fría de refrigeración.
- 30 4.- El sistema de licuefacción de gas según una cualquiera de las reivindicaciones 1-3, caracterizado por el hecho de que el mecanismo (19) de control de la presión del gas comprende uno o más de los siguientes elementos:
- una válvula (3) de entrada electrónicamente controlada, que controla el flujo de gas dentro del depósito interior;
- un regulador (4) de presión que regula la presión del gas que fluye desde el módulo de admisión de gas hasta el depósito interior;
- 35 un medidor (5) de flujo másico que mide el volumen de gas que sale del regulador de presión y entra en el depósito interior; y
- un sensor (7) de presión que mide la presión del gas dentro del depósito interior.
- 5.- El sistema de licuefacción de gas según una cualquiera de las reivindicaciones 1-4, y que comprende adicionalmente las válvulas (12, 13, 14, 15, 16) configuradas para controlar el paso de gas a través del mecanismo de control de presión.
- 40 6.- El sistema de licuefacción de gas según una cualquiera de las reivindicaciones 1-5, caracterizado por el hecho de que el gas es helio.
- 7.- Un método de licuefacción de gas que hace uso de un sistema (1) de licuefacción de gas según cualquiera de las reivindicaciones 1-6, que comprende las siguientes etapas:
- 45 suministrar gas al sistema (1) de licuefacción de gas a través del módulo (2) de admisión de gas; regular la presión del gas que entra en el depósito (9) interior por medio del mecanismo (19) de control de gas y los dispositivos (23) de control;
- regular la potencia de la cabeza fría (18) de refrigeración por medio de los dispositivos (23) de control para

determinar la tasa de licuefacción;

controlar el ritmo de los cambios de presión del gas entrante en el depósito (9) interior por medio del mecanismo (19) de control de presión de gas para optimizar la tasa de licuefacción dentro del depósito (9) interior tanto durante como después de los cambios de presión; y

- 5 regular la presión del gas presente en el depósito (9) interior hasta un valor constante determinado por encima de la presión atmosférica para establecer la tasa de licuefacción deseada.

8.- El método de licuefacción de gas según la reivindicación 7, y que comprende adicionalmente la determinación del nivel de gas licuado dentro del depósito (9) interior a partir de la masa total del gas en el depósito (9) interior y/o la determinación de las densidades del gas y líquido midiendo la presión o temperatura en el equilibrio termodinámico.

- 10 9.- El método de licuefacción de gas según la reivindicación 7 u 8, y que comprende adicionalmente las etapas de:

activar una válvula (3) de entrada para que se cierre, evitando el flujo de gas dentro del sistema, determinar y mantener la presión dentro del depósito (9) interior; y

- 15 realizar ciclos de encendido/apagado de la cabeza fría de refrigeración, forzar las temperaturas de las fases (10, 11) de la cabeza fría de refrigeración a que excedan de las temperaturas de fusión y sublimación de las impurezas presentes en el interior del depósito (9) interior, haciendo precipitar tales impurezas y caer dentro del fondo del depósito (9) interior y de este modo limpiando la zona en la que el gas se pre-enfría y licua.

- 20 10.- El método de licuefacción de gas según una cualquiera de las reivindicaciones 7-9, y que comprende adicionalmente un modo de espera en el que el volumen de gas licuado se conserva indefinidamente en equilibrio con el vapor, siendo iniciado el modo de espera por los dispositivos (23) de control que activan la válvula (3) de entrada por medio del mecanismo (19) de control de la presión de gas para cerrar la admisión de gas dentro del sistema de licuefacción de gas.

11.- El método de licuefacción de gas según una cualquiera de las reivindicaciones 7-10, que incluye la licuefacción directa de gas recuperado por encima de la presión atmosférica, que comprende:

- 25 el almacenamiento de gas en un depósito (24) de almacenamiento de expansión antes de su paso a través del módulo (2) de admisión de gas por encima de la presión atmosférica; y

la licuefacción directa, manteniendo el sistema de licuefacción de gas a una presión por encima de la atmosférica por medio del mecanismo (19) de control de presión de gas.

- 30 12.- El método de licuefacción de gas según una cualquiera de las reivindicaciones 7-11, caracterizado por el hecho de que el mecanismo (19) de control de presión de gas, el módulo (2) de admisión de gas, y los dispositivos (23) de control están gobernados por medio de un programa de software en por lo menos un medio de almacenamiento de datos.

13.- El método de licuefacción de gas según la reivindicación 12, caracterizado por el hecho de que el medio de almacenamiento de datos está conectado a un dispositivo programable encargado de ejecutar dicho programa de software.

- 35 14.- El método de licuefacción de gas según cualquiera de las reivindicaciones 7-13, caracterizado por el hecho de que dicho gas se selecciona del grupo que consiste en: helio, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, y neón.

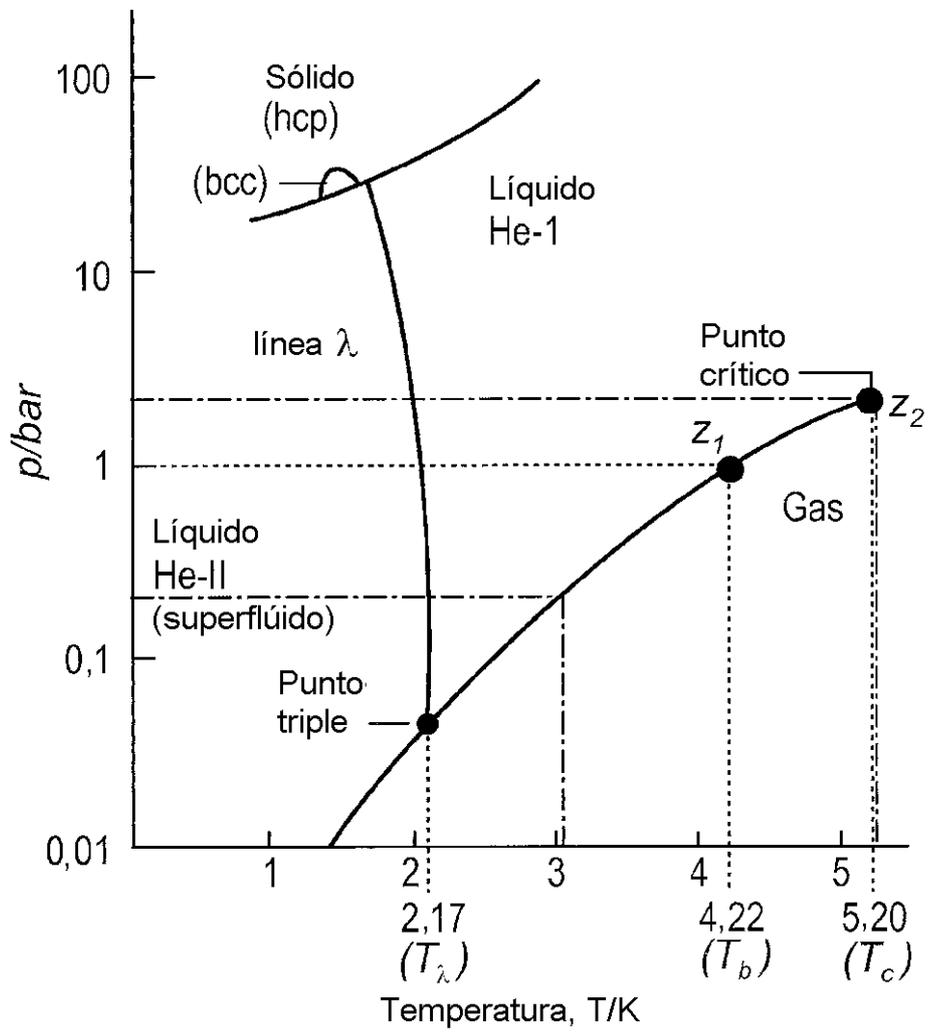


Fig. 1

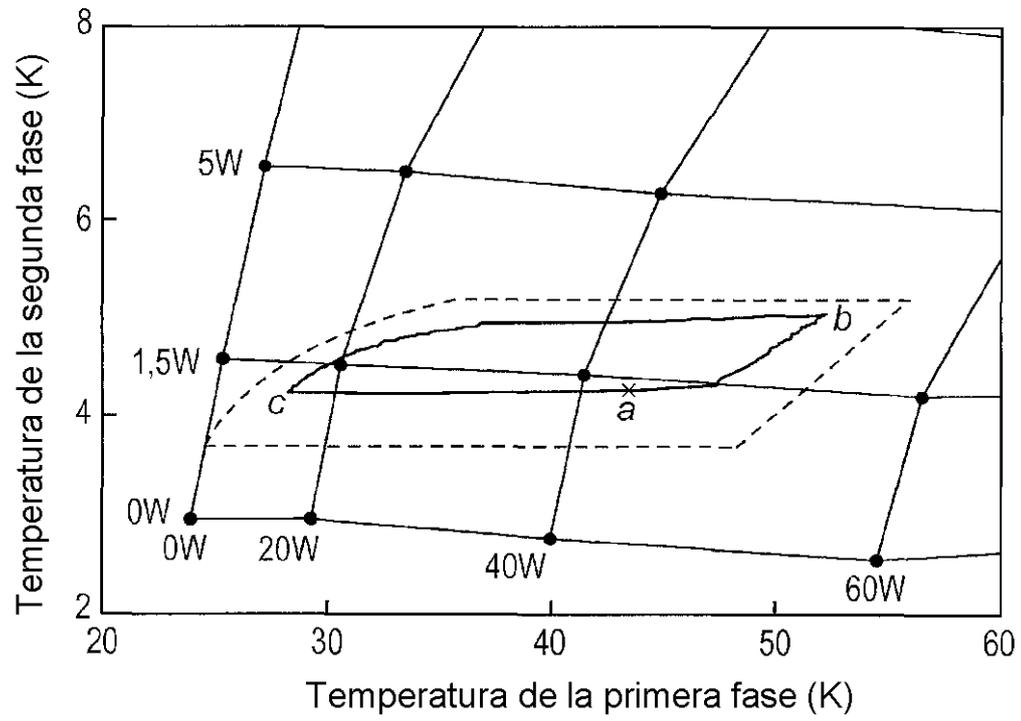


Fig. 2

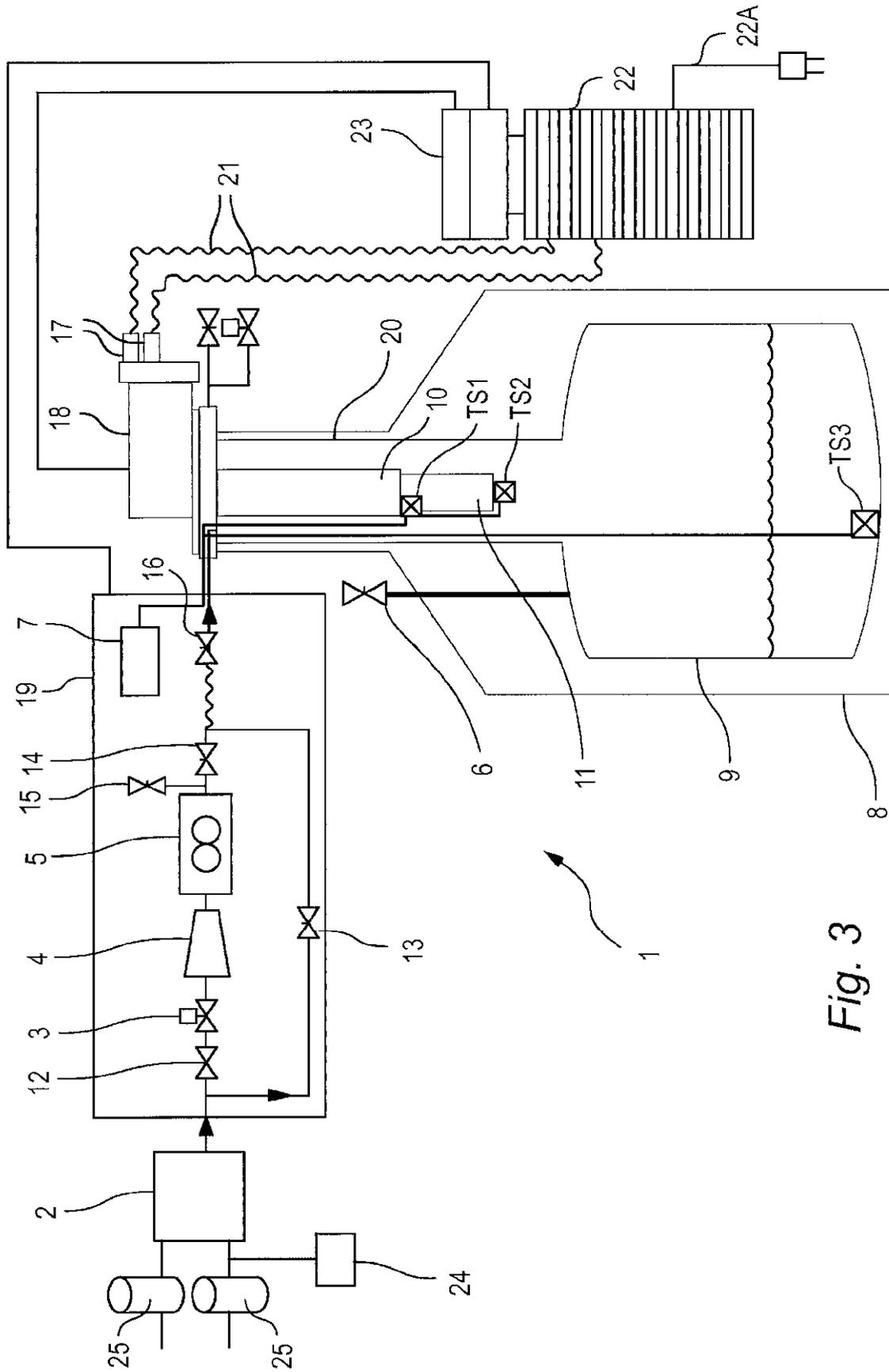
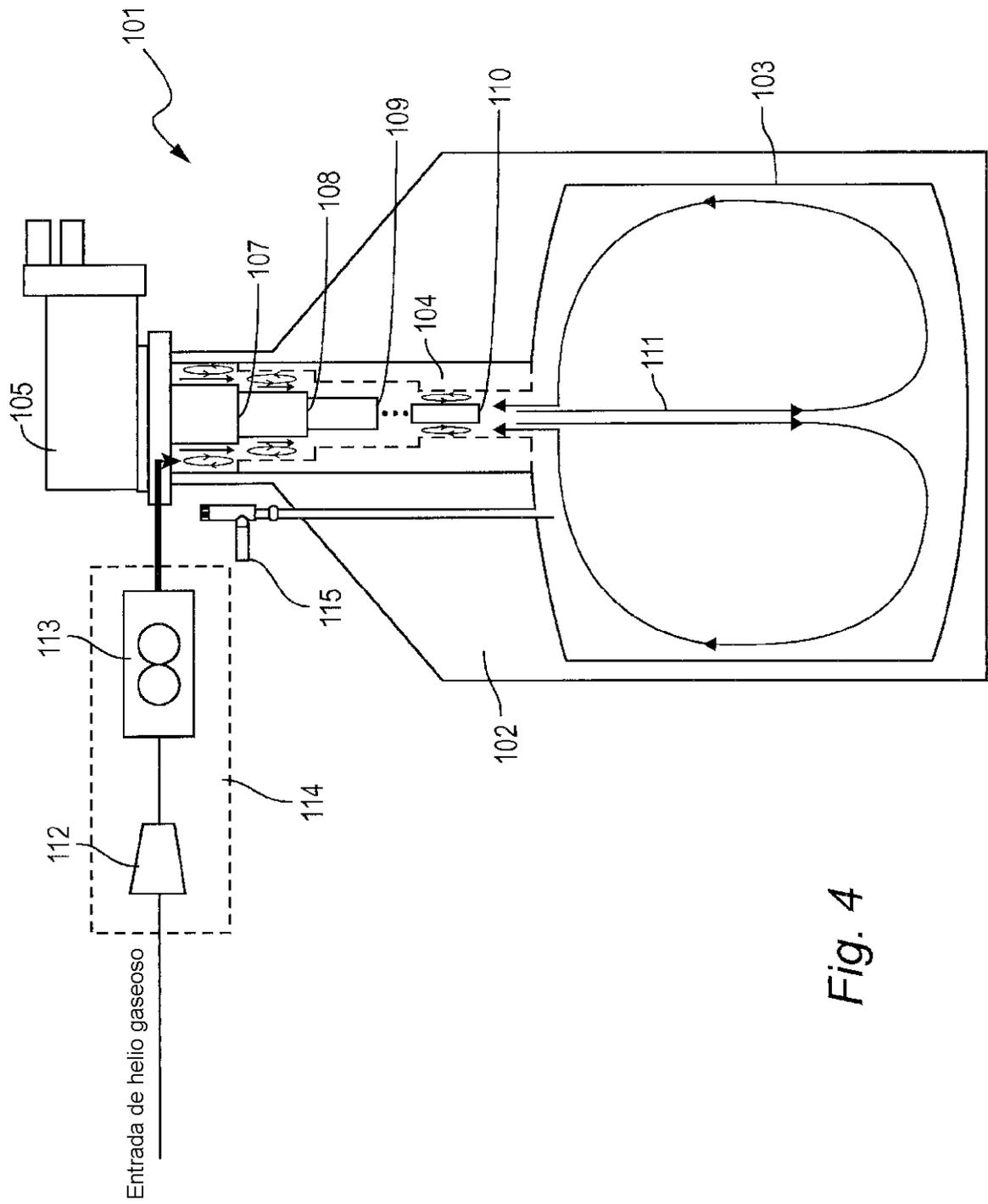


Fig. 3



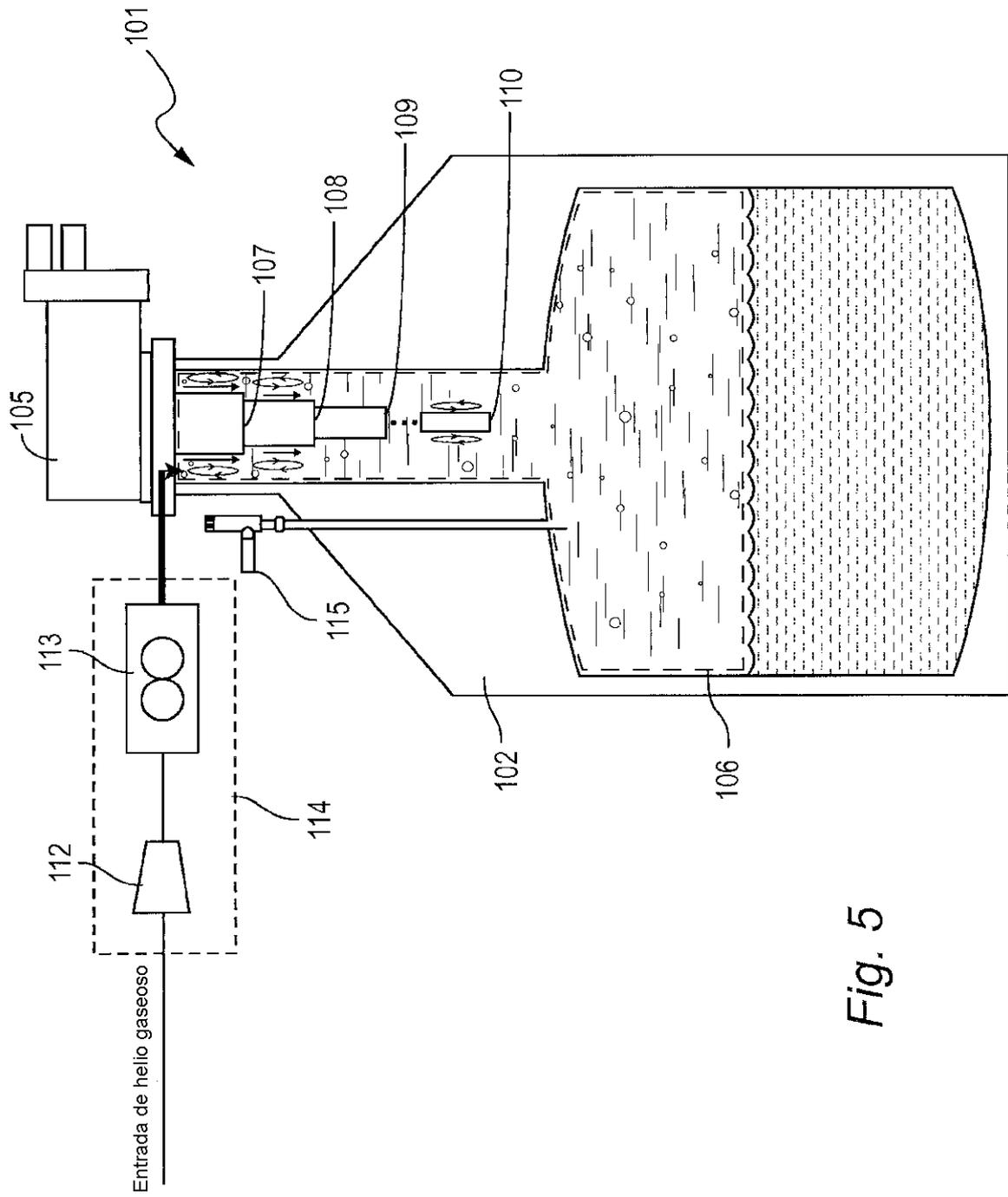


Fig. 5