

PROCESO PARA LICUAR GAS NATURAL Y PARA RECUPERAR POSIBLES LÍQUIDOS DEL GAS NATURAL, QUE COMPRENDEN DOS CICLOS REFRIGERANTES SEMI-ABIERTOS PARA EL GAS NATURAL Y UN CICLO REFRIGERANTE CERRADO PARA EL GAS REFRIGERANTE

5 **Antecedentes de la invención**

La presente invención se refiere al campo general de la licuefacción del gas natural que comprende predominantemente metano, para producir GNL, para Gas Natural Licuado, llamado igualmente LNG en inglés.

10 Un campo de aplicación de la invención particular pero no limitativo es el de las instalaciones flotantes de licuefacción de gas natural, llamado (FLNG, por sus siglas en inglés) que sirven para realizar una licuefacción del gas natural en alta mar, a bordo de un navío o en cualquier otro soporte flotante en el mar.

15 El gas natural que comprende predominantemente metano que se utiliza para producir GNL es un subproducto de los campos petrolíferos, es decir, se produce en asociación con el petróleo crudo, en cuyo caso se encuentra en cantidades bajas o medianas, siendo un producto importante de campos de gas.

Cuando el gas natural se asocia en pequeñas cantidades con el petróleo crudo, generalmente se trata y se separa y luego se reinyecta en el pozo de petróleo, se exporta por tubería y/o se usa en el sitio, en particular como combustible para alimentar generadores eléctricos, hornos, o calderas.

20 A la inversa, cuando el gas natural proviene de campos de gas y se produce en grandes cantidades, se prefiere transportarlo para poder utilizarlo en regiones distintas a las regiones donde se produce. A este efecto, el gas natural se puede transportar en tanques de buques de transporte especializados (conocidos como “metaneros”) en forma de un líquido criogénico (a una temperatura de aproximadamente 160°C) y a una presión cercana a la presión atmosférica ambiental.

25 La licuefacción del gas natural generalmente se realiza para fines de transporte en la proximidad del sitio de producción de gas, y eso requiere instalaciones a gran escala y cantidades considerables de energía mecánica para capacidades de producción que pueden llegar a varios millones de toneladas (métricas) por año. La energía mecánica necesaria para el proceso de licuefacción puede producirse en el sitio de la instalación de licuefacción utilizando parte del gas natural como combustible.

30 El gas natural debe someterse a un tratamiento previo a su licuefacción para extraer gases ácidos (en particular dióxido de carbono), agua (para evitar que se congele en la instalación de licuefacción), mercurio (para evitar cualquier riesgo de degradación de equipos de aluminio en la instalación de licuefacción), y algunos de los líquidos de gas natural, llamados igualmente NGL, por sus siglas en inglés. Los NGL comprenden todos los hidrocarburos más pesados que el metano que están presentes en el gas natural y que pueden condensarse. Los NGL comprenden en particular etano, gases de petróleo licuado (GPL) (propano y butanos), denominados igualmente LPG, por sus siglas en inglés, pentanos e hidrocarburos más pesados que los pentanos y están presentes en el gas natural. Entre esos hidrocarburos, es particularmente crítico extraer, corriente arriba de las instalaciones de licuefacción: benceno, la mayor fracción de pentanos y otros hidrocarburos más pesados para evitar que se congelen

35

en la instalación de licuefacción. Además, la extracción de GLP y etano también puede ser necesaria para garantizar que el GNL cumpla con las especificaciones comerciales de capacidad calorífica o para producir estos productos comercialmente.

5 La extracción de NGL se integra dentro de la instalación de licuefacción de gas natural o se realiza en una unidad dedicada corriente arriba de la instalación de licuefacción. En el primer caso, esta extracción generalmente se realiza a una presión que es relativamente alta (del orden de 4 mega pascales (MPa) a 5 MPa), y en segundo caso, cuando se realiza corriente arriba, generalmente se realiza a una presión más baja (del orden de 2 MPa a 4 MPa).

10 La extracción de NGL que está integrada en la licuefacción del gas natural, como se describe, por ejemplo, en la publicación US 4,430,103, presenta la ventaja de ser simple. Sin embargo, ese tipo de proceso opera solo a una presión inferior a la presión crítica del gas para licuar, lo que es perjudicial para la eficiencia de la licuefacción. Además, ese tipo de proceso típicamente separa el gas natural del NGL a una presión del orden de 4 MPa a 5 MPa. Desafortunadamente, a tales presiones, la selectividad de la extracción de los NGL es baja. Específicamente, se extrae una cantidad significativa de metano junto con
15 el NGL. Por lo general, se necesita un tratamiento posterior para rechazar el metano.

Además, a una presión del orden de 4 MPa a 5 MPa, las densidades del líquido y del gas natural son relativamente cercanas, lo que hace que los tambores separadores y las columnas de destilación sean difíciles de diseñar y operar (en particular en el contexto de una aplicación sobre un soporte flotante).

Extracción de NGL a una presión del orden de 2 MPa a 4 MPa corriente arriba de la instalación de
20 licuefacción en una unidad dedicada, por ejemplo, como se describe en la publicación US 4,157,904, permite alcanzar altos índices de recuperación de NGL con buena selectividad (es decir, se extrae poco metano). También hace posible garantizar que la alimentación de gas a la licuefacción esté a la presión óptima para la licuefacción (por lo general, al menos equivalente a la presión crítica) mediante el uso de un re-compresor dedicado. Por el contrario, una tal extracción de NGL requiere varios equipos y complejos y
25 requiere cantidades no despreciables de energía mecánica para volver a comprimir el gas natural.

Además, la forma en que se extraen los NGL tiene un impacto significativo en el costo y en el grado de complejidad de la planta de licuefacción en lo que respecta tanto al rendimiento de la licuefacción como a la eficiencia energética general de la planta de licuefacción.

Se han desarrollado varios procesos para licuar el gas natural con el fin de optimizar su eficiencia
30 energética general. En principio, esos procesos de licuefacción se basan típicamente en la refrigeración mecánica del gas natural que se obtiene por medio de uno o más ciclos termodinámicos de refrigeración que proporcionan la potencia térmica necesaria para enfriar y licuar el gas natural. En cada ciclo termodinámico implementado en esos procesos, el refrigerante comprimido (en forma de un gas) se enfría (y posiblemente se condensa) mediante una fuente de temperatura que tiene una temperatura mayor a la
35 temperatura del fluido refrigerado y se denomina "fuente caliente" "(agua, aire, algún otro ciclo de refrigeración) y luego se enfría aún más por una corriente de gas frío generado por el propio ciclo termodinámico antes de ser expandido. La corriente de refrigerante frío a baja temperatura que resulta de dicha expansión se utiliza para enfriar el gas natural y para enfriar previamente el refrigerante. El

refrigerante gaseoso a baja presión se comprime una vez más a su nivel de presión inicial (por medio de compresores accionados por turbinas de gas, turbinas de vapor o motores eléctricos).

Durante esos ciclos termodinámicos de refrigeración, la energía necesaria para refrigerar y licuar el gas natural puede suministrarse mediante la vaporización y calentamiento de un líquido refrigerante, y la mayor parte del calor de refrigeración es producida por el calor latente involucrado durante el cambio de estado, ya sea calentando un refrigerante frío en forma de gas. En el caso de un gas refrigerante, la temperatura del refrigerante generalmente se reduce mediante la expansión de la presión a través de una turbina de expansión (conocida como “expansor de gas”). El efecto de enfriamiento producido por el refrigerante es predominantemente en forma de calor sensible.

En el caso de un refrigerante líquido, la temperatura del refrigerante generalmente se reduce por expansión a través de una válvula y/o una turbina de expansión de líquido (también conocida como “expansor de líquido”). El efecto de enfriamiento producido por el refrigerante es predominantemente en forma de un calor latente (y en menor medida en forma de calor sensible). Dado que el calor latente es mucho mayor que el calor sensible, los corrientes de refrigerante que se necesitan para obtener la misma potencia de refrigeración son mayores para los ciclos termodinámicos que recurren a un refrigerante en forma de gas que para los ciclos termodinámicos que recurren a un refrigerante en forma líquida.

Por lo tanto, para la misma capacidad de licuefacción, los ciclos termodinámicos de refrigeración que utilizan un gas como refrigerante requieren compresores de refrigeración de mayor capacidad y tuberías de mayor diámetro que los necesarios para los ciclos termodinámicos de refrigeración que utilizan un refrigerante líquido. Los ciclos termodinámicos con un refrigerante gaseoso también son generalmente menos eficientes que los ciclos termodinámicos con un refrigerante líquido, en particular debido a la diferencia de temperatura entre el fluido que se somete a refrigeración y el fluido refrigerante es en promedio mayor para un ciclo refrigerante gaseoso, contribuyendo de esta manera a las pérdidas de eficiencia por irreversibilidad.

Por otro lado, los ciclos termodinámicos de refrigeración con un refrigerante líquido hacen uso de masas más grandes de refrigerante que los ciclos termodinámicos de refrigerante gaseoso. Cuando los fluidos refrigerantes utilizados son inflamables o tóxicos, los ciclos termodinámicos del refrigerante líquido presentan un nivel de seguridad intrínsecamente inferior al que presentan los procesos de refrigerante gaseoso, en particular cuando se comparan los ciclos termodinámicos del refrigerante líquido utilizando hidrocarburos como refrigerante con ciclos termodinámicos utilizando un gas inerte como el nitrógeno como el refrigerante. Este punto es particularmente crítico en un entorno donde una gran cantidad de equipos se concentra en un espacio pequeño, y en particular en una instalación en alta mar. Los ciclos termodinámicos de refrigeración que utilizan refrigerantes líquidos son, por lo tanto, eficientes, pero presentan una serie de inconvenientes, en particular para una aplicación en alta mar sobre un soporte flotante.

Se han propuesto varios procesos de licuefacción que utilizan ciclos termodinámicos de refrigeración con refrigerante gaseoso. A modo de ejemplo, los siguientes documentos US 5,916,260, WO 2005/071333, WO 2009/130466, WO 2012/175889 y WO 2013/057314 describen ciclos de licuefacción con doble o triple expansión de nitrógeno, en los que se calienta nitrógeno a la salida de un intercambiador

de calor está comprimida. En la entrega de los compresores, el nitrógeno es enfriado y expandido por las turbinas para ser utilizado para enfriar y licuar el gas natural.

Tales procesos de licuefacción de expansión de nitrógeno presentan claras ventajas en términos de simplicidad, seguridad intrínseca y robustez, lo que los hace particularmente adecuados para una aplicación en un soporte flotante en alta mar. Sin embargo, esos procesos también presentan poca eficiencia. Por lo tanto, un proceso que usa refrigerantes líquidos produce típicamente aproximadamente 30% más de GNL que un proceso de expansión de nitrógeno doble (con un gasto equivalente de energía mecánica).

Los documentos WO 2007/021351 y US 6,412,302 también describen procesos de licuefacción de gas natural que combinan gas natural en expansión y nitrógeno. Esos procesos permiten mejorar la eficiencia de la licuefacción, pero no integran la extracción de NGL en la licuefacción. Desafortunadamente, tal extracción puede requerir una gran cantidad de equipos complejos y/o puede tener un impacto negativo en la eficiencia de la licuefacción.

Finalmente, los documentos US 7 225 636 y WO 2009/017414 describen procesos para licuar gas natural que combinan ciclos de refrigeración para licuar el gas natural por medio de una turbina de expansión de gas con extracción de NGL. Sin embargo, esos procesos presentan un cierto número de inconvenientes. En particular, en esos dos documentos, los NGL se extraen a una presión que es relativamente alta, lo que conduce a una escasa selectividad de separación, mientras que la licuefacción del gas natural tiene lugar a baja presión (inferior a la presión crítica), lo que es perjudicial para su eficiencia.

Objetivo y breve descripción de la invención

Un objetivo principal de la presente invención es, por lo tanto, mitigar dichos inconvenientes al proponer un proceso de licuefacción mediante el uso de ciclos termodinámicos de refrigerante gaseoso y tener una eficiencia superior a los procesos de licuefacción de la técnica previa, mientras se propone un proceso que sea simple y compacto para la extracción de NGL, si cualquiera, proceso que se integra en el proceso de licuefacción y proporciona una mejor optimización de energía general que los procesos de la técnica previa.

De acuerdo con la invención, este objetivo se logra mediante un proceso para licuar un gas natural que comprende una mezcla de hidrocarburos que comprenden predominantemente metano, el proceso comprende:

a) un primer ciclo semi-abierto con gas natural en el que sucesivamente:

una corriente de alimentación de gas natural a una presión P_0 tratada previamente para extraer gases ácidos, agua y mercurio se mezcla con una corriente de gas natural, se expande a una presión P_1 y su temperatura se reduce a una temperatura T_1 por medio de una turbina de expansión a temperatura ambiente para obtener una condensación de cualquier líquido de gas natural contenido en el gas natural;

cualquier líquido de gas natural que se haya condensado se separa en un separador principal de la corriente de alimentación de gas natural, y la corriente pasa luego a través de un intercambiador de calor criogénico principal para formar una primera corriente de gas natural que contribuye por intercambio de calor en primer lugar a un enfriamiento previo de la corriente principal de gas natural que fluye en

contracorriente a través del intercambiador de calor criogénico principal y, en por otra parte, enfría una corriente inicial de gas refrigerante que fluye en contracorriente a través del intercambiador de calor criogénico principal;

5 a la salida del intercambiador de calor criogénico principal, la primera corriente de gas natural, que está a una temperatura T2 superior a T1 y cercana a la temperatura de una fuente caliente, se comprime a una presión P2 mediante un compresor accionado por la turbina de expansión a temperatura ambiente antes de ser admitida a la succión de un compresor de gas natural para ser comprimida aún más a una presión P3 superior a P2 para formar una segunda corriente de gas natural;

10 la segunda corriente de gas natural en el suministro del compresor de gas natural se expande en parte y se mezcla con la corriente de alimentación de gas natural corriente arriba de la turbina de expansión a temperatura ambiente, y en parte forma la corriente principal de gas natural; y

una fracción de esta corriente principal de gas natural pasa a través del intercambiador de calor criogénico principal para enfriarse a una temperatura T3 que sea lo suficientemente baja como para permitir que el gas natural se licue;

15 b) un segundo ciclo refrigerante semi-abierto con gas natural en el que, sucesivamente:

otra fracción de la corriente principal de gas natural se extrae del intercambiador de calor criogénico principal a una temperatura T4 superior a T3 para dirigirse a una turbina de expansión intermedia, para que su temperatura se reduzca por expansión a una temperatura T5 inferior a T4 y para formar una tercera corriente de gas natural;

20 la tercera corriente de gas natural se reinyecta en el intercambiador de calor criogénico principal para enfriar por intercambio de calor la corriente de gas natural principal y la corriente inicial de gas refrigerante que fluye en contracorriente a través del intercambiador de calor criogénico principal; y

a la salida del intercambiador de calor criogénico principal, la tercera corriente de gas natural, que está a una temperatura T6 cercana a la temperatura de la fuente caliente, se dirige a un compresor accionado por la turbina de expansión intermedia para ser comprimida en él y luego se enfría antes de mezclarse con la primera corriente de gas natural corriente arriba del compresor de gas natural; y

c) un ciclo refrigerante cerrado con gas refrigerante en el cual, sucesivamente:

una corriente inicial de gas refrigerante a una temperatura T7 cercana a la temperatura de la fuente caliente y previamente comprimida por un compresor de gas refrigerante fluya a través del intercambiador de calor criogénico principal para que se vuelva a enfriar;

a la salida del intercambiador de calor criogénico principal, la corriente inicial de gas refrigerante, que está a una temperatura T8 inferior a T7, se dirige a una turbina de expansión a baja temperatura, de modo que su temperatura se reduce por expansión a una temperatura T9 inferior a T8, la primera corriente de gas refrigerante que se forma de este modo se reinyecta en el intercambiador de calor criogénico principal para contribuir a enfriar la corriente principal de gas natural y la corriente inicial de gas refrigerante;

35 y

a la salida del intercambiador de calor criogénico principal, la primera corriente de gas refrigerante, que está a una temperatura T10 cercana a la temperatura de la fuente caliente, se dirige a un compresor

accionado por la turbina de expansión a baja temperatura para comprimirse antes de ser enfriada y luego dirigida a la succión del compresor de gas refrigerante.

El proceso de licuefacción de la invención comprende dos ciclos refrigerantes semi-abiertos con gas natural y un solo ciclo refrigerante cerrado con gas refrigerante. El primer ciclo refrigerante semi-abierto con gas natural sirve para extraer los líquidos de gas natural (NGL) pesados que pueden estar presentes en el gas natural para evitar problemas de congelación en la sección fría de la instalación de licuefacción, y para pre-enfriar el gas natural y el gas refrigerante. El segundo ciclo refrigerante semi-abierto con gas natural sirve para contribuir al enfriamiento previo del gas natural y del gas refrigerante y también a la licuefacción del gas natural. El ciclo refrigerante cerrado con gas refrigerante sirve para sub-enfriar el gas natural licuado y para proporcionar energía de refrigeración además de los otros dos ciclos. El gas refrigerante utilizado es típicamente nitrógeno.

Se ha calculado que el proceso de la invención presenta una relación de potencia mecánica consumida por tonelada de GNL producido en condiciones equivalentes que es aproximadamente 15% más bajo que un proceso de dos ciclos refrigerantes con nitrógeno, 10% más bajo que un proceso de tres ciclos refrigerantes con nitrógeno, y 8% más bajo que un proceso que tiene un ciclo refrigerante con gas natural y dos ciclos refrigerantes con nitrógeno cuando esos procesos están asociados con una unidad de extracción de NGL corriente arriba de la licuefacción, haciendo necesaria la re-compresión del gas (esta potencia de re-compresión se toma en cuenta en la comparación). La potencia consumida por tonelada de GNL producida por el proceso de la invención es, por lo tanto, menor que por los procesos conocidos en la técnica previa, lo que demuestra una mayor eficiencia para este proceso.

El proceso de la invención integra la extracción de líquidos pesados de gas natural (NGL) con licuefacción, mejorando de esta manera la eficiencia energética general de la planta de licuefacción de gas natural y haciendo posible evitar el recurso a instalaciones dedicadas a tal extracción. De este modo se simplifica el proceso de tratamiento previo del gas natural. Además, dado que la extracción se realiza a baja presión, se arrastran pocos hidrocarburos ligeros (en particular metano) durante el proceso de extracción, lo que hace posible tratar los NGL pesados mediante el uso de un proceso que es fácil de implementar.

El ciclo único con gas refrigerante en el proceso de acuerdo con la invención es un ciclo cerrado. Por lo tanto, solo se necesita gas refrigerante de recarga, y puede producirse fácilmente (específicamente cuando el gas refrigerante es predominantemente nitrógeno). En particular, no se requiere una unidad dedicada para importar, producir, tratar o almacenar hidrocarburos líquidos para su uso como refrigerante. Esto hace que el proceso de la invención sea mucho más fácil de instalar.

El proceso de acuerdo con la presente invención presenta un alto nivel de seguridad intrínseca. Específicamente, las masas de hidrocarburos involucrados son limitadas (en particular en comparación con un proceso que utiliza hidrocarburos en forma líquida como refrigerantes). Esto hace que el proceso de la invención sea más fácil de instalar.

Finalmente, el proceso es particularmente adecuado para una instalación de licuefacción de gas natural en alta mar, por ejemplo, como a bordo de un FLNG, debido a su alto nivel de seguridad intrínseca

y porque no requiere que los refrigerantes se almacenen.

En una variante de “recompresión en serie”, durante el segundo ciclo refrigerante semi-abierto con gas natural, la corriente de gas natural en la salida del compresor impulsado por la turbina de expansión intermedia se enfría y luego se mezcla con la primera corriente de gas natural antes de ser dirigido a la
5 descarga del compresor accionado por la turbina de expansión a temperatura ambiente. Esta variante hace posible realizar la compresión por etapas del gas natural para hacer que la compresión sea más eficiente.

En una variante de “pre-enfriamiento adicional por ciclo refrigerante auxiliar”, durante el primer ciclo refrigerante semi-abierto con gas natural, la corriente de alimentación de gas natural en la admisión a la turbina de expansión a temperatura ambiente se enfría aún más en un intercambiador de calor auxiliar. En
10 esta variante, un ciclo de refrigeración auxiliar entrega la potencia de refrigeración necesaria para el funcionamiento del intercambiador de calor auxiliar. Esta disposición hace que la temperatura en el separador principal se reduzca, lo que sirve para obtener una mejor recuperación de los NGL.

En una variante llamada “absorción de NGL por reflujo sub-enfriado”, durante el segundo ciclo refrigerante semi-abierto con gas natural, la tercera corriente de gas natural en el escape de la turbina de
15 expansión intermedia se dirige a un separador auxiliar de la salida del cual el gas natural la corriente se reinyecta en el intercambiador de calor criogénico principal, y la corriente de gas natural líquido en la salida del separador auxiliar se bombea total o parcialmente al separador principal para contribuir a la absorción de líquidos de gas natural. El contacto entre el gas natural a tratar y el reflujo sub-enfriado puede ocurrir, por ejemplo, en contracorriente. Para este propósito, el separador principal puede estar equipado con un
20 lecho de empaque. En esta variante, es fácil tratar gases ligeros con un alto contenido de compuestos aromáticos (por ejemplo, benceno) o extraer GPL a una alta tasa de recuperación (por ejemplo, para proporcionar la producción industrial de GPL).

En una variante de “absorción de NGL por reflujo de GNL”, durante el primer ciclo refrigerante semi-abierto con gas natural, se extrae una porción de la fracción de la corriente principal de gas natural que
25 pasa a través del intercambiador de calor criogénico principal para ser enfriada y se extrae del intercambiador de calor criogénico principal a una temperatura T11 superior a la temperatura T3 para dirigirse al separador principal para contribuir a la absorción de líquidos de gas natural. El contacto entre el gas natural para el tratamiento y el reflujo de GNL puede ocurrir, por ejemplo, en contracorriente. Para este propósito, el separador principal puede estar provisto de un lecho de empaque. En esta variante, es posible
30 tratar gases ligeros con un contenido de compuestos aromáticos (por ejemplo, benceno) o, en particular, extraer GPL a una alta tasa de recuperación, y también etano.

Durante el primer ciclo refrigerante semi-abierto con gas natural, la corriente de alimentación de gas natural se mezcla ventajosamente con el gas natural más ligero proveniente de la entrega del compresor de gas natural antes de expandirse en la turbina a temperatura ambiente sin pre-enfriamiento
35 en el intercambiador de calor criogénico principal, lo que hace posible producir eficientemente un gas frío para pre-enfriar el gas natural y el gas refrigerante y extraer cualquier NGL con excelente selectividad.

Durante el primer ciclo refrigerante semi-abierto con gas natural, la corriente de alimentación de gas natural en el escape de la turbina de expansión a temperatura ambiente se inyecta en el separador

principal, desde cuya salida se recupera una corriente de líquidos de gases pesados. En tales circunstancias, una fracción de la corriente de líquidos de gas natural recuperada se calienta y se vaporiza en parte para facilitar su tratamiento corriente abajo.

En una disposición ventajosa, la presión de la corriente principal de gas natural es mayor que la presión crítica del gas natural, lo que sirve para maximizar la eficiencia de la licuefacción y garantizar que la licuefacción tenga lugar sin cambio de fase.

La invención también proporciona una instalación de licuefacción de gas natural para realizar un proceso como se definió anteriormente, la instalación comprende una turbina de expansión a temperatura ambiente para recibir una corriente de alimentación de gas natural y una parte de una segunda corriente de gas natural que proviene de la entrega de un compresor de gas natural y que tiene un escape conectado a una descarga de un separador principal, un intercambiador de calor criogénico principal para recibir las corrientes de gas natural y gas refrigerante, un compresor accionado por la turbina de expansión a temperatura ambiente para recibir una primera corriente de gas natural del separador principal y tener una salida conectada a la succión del compresor de gas natural, una turbina de expansión a temperatura intermedia para recibir una porción de una corriente principal de gas natural proveniente del suministro del compresor de gas natural y conectada a la entrada y a la salida del intercambiador de calor criogénico principal, un compresor accionado por la turbina de expansión a temperatura intermedia para recibir una tercera corriente de gas natural del intercambiador de calor criogénico principal, una turbina de expansión a baja temperatura para el gas refrigerante conectado a la entrada y la salida del intercambiador de calor criogénico principal, y un compresor accionado por la turbina de expansión a baja temperatura y que tiene una salida conectada a la succión de un compresor de gas refrigerante.

Preferiblemente, el compresor de gas natural y el compresor de gas refrigerante son accionados por la misma máquina impulsora que entrega la potencia mecánica necesaria para aumentar la presión del gas natural para licuar y comprimir los fluidos circulantes en los tres ciclos refrigerantes. El consumo de energía mecánica necesaria para estas funciones se optimiza para que se maximice la producción de GNL y se minimice el número de equipos.

También preferiblemente, el compresor de gas natural se encuentra corriente abajo de los compresores accionados por la turbina de expansión a temperatura ambiente y la turbina de expansión a temperatura intermedia, y el compresor de gas refrigerante se encuentra corriente abajo del compresor accionado por la turbina de expansión a baja temperatura.

Breve descripción de los dibujos

Otras características y ventajas de la presente invención aparecen en la siguiente descripción hecha con referencia a los dibujos adjuntos, que muestran modalidades que no tienen carácter limitante. En las figuras:

- la figura 1 representa esquemáticamente un ejemplo de implementación del proceso de licuefacción de acuerdo con la invención;
- la figura 2 muestra una variante de implementación del proceso de licuefacción de acuerdo con la invención denominada variante de "recompresión en serie".

- la figura 3 muestra otra variante de la implementación del proceso de licuefacción de acuerdo con la invención referida como la variante de “enfriamiento previo adicional por un ciclo refrigerante auxiliar”;

- la figura 4 muestra otra variante de la implementación del proceso de licuefacción de acuerdo con la invención denominada “absorción de NGL por reflujo sub-enfriado”; y

5 - la figura 5 muestra otra variante de implementación del proceso de licuefacción de acuerdo con la invención referida denominada “absorción de NGL por reflujo de GNL”.

Descripción detallada de la invención

El proceso de licuefacción de acuerdo con la invención se aplica particularmente (pero no exclusivamente) al gas natural que proviene de un campo de gas. Típicamente, el gas natural comprende
10 predominantemente metano y se encuentra en combinación con otros gases, principalmente hidrocarburos en C2, C3, C4, C5 y C6, gases ácidos, agua y gases inertes, incluidos el nitrógeno, junto con diversas impurezas como el mercurio.

La figura 1 muestra un ejemplo de instalación 2 para implementar el proceso de licuefacción de gas natural de acuerdo con la invención.

15 En esencia, el proceso de licuefacción de acuerdo con la invención recurre en tres ciclos termodinámicos de refrigeración, es decir, dos ciclos refrigerantes semi-abiertos con gas natural y un ciclo refrigerante cerrado con gas refrigerante.

Además, el proceso de acuerdo con la invención utiliza preferiblemente como gas refrigerante un gas que comprende predominantemente nitrógeno, por lo que el proceso es particularmente adecuado para
20 llevarse a cabo en alta mar, típicamente en una instalación flotante de licuefacción de gas natural (FLNG).

Como se muestra en la figura 1, la instalación de licuefacción 2 requiere solo un intercambiador de calor criogénico principal 4, que puede estar formado por un conjunto de intercambiadores de calor de aluminio soldado instalados en una caja fría.

La instalación de licuefacción 2 de acuerdo con la invención también requiere tres turboexpansores,
25 a saber, un turboexpansor a temperatura ambiente 6 dedicado al gas natural, un turboexpansor a temperatura intermedia 8 dedicada al gas natural, y un turboexpansor a baja temperatura 10 dedicado al gas refrigerante.

De manera conocida, un turboexpansor es una máquina rotativa formada por una turbina de expansión de gas (en este ejemplo, respectivamente, una turbina de expansión a temperatura ambiente
30 6a, una turbina de expansión a temperatura intermedia 8a y una turbina de expansión a baja temperatura 10a) junto con un compresor de gas (específicamente, respectivamente, un compresor 6b, un compresor 8b y un compresor 10b) accionados por la turbina de expansión de gas.

La instalación de licuefacción 2 de la invención comprende además un compresor de gas natural 12 y un compresor de gas refrigerante 14, estos dos compresores 12 y 14 son accionados preferiblemente
35 por una máquina impulsora común ME, por ejemplo, una turbina de gas que suministra la potencia necesaria para aumentar la presión del gas natural para licuar y también para comprimir los fluidos circulantes en los tres ciclos refrigerantes.

Como se describe detalladamente a continuación, el compresor de gas natural realiza tres

funciones: presurizar y asegurar la circulación del gas natural para entregar suficiente potencia de refrigeración para contribuir a la refrigeración y la licuefacción del gas natural y del gas refrigerante; recomprimir el gas natural que se expandió para extraer NGL pesados; y asegurar que el gas natural para licuar esté a la presión óptima para maximizar la eficiencia de la licuefacción.

5 La función del compresor de gas refrigerante es presurizar y hacer circular el gas refrigerante para obtener la potencia de refrigeración necesaria para contribuir al enfriamiento del gas refrigerante, contribuir a la refrigeración previa y la licuefacción del gas natural y garantizar el sub-enfriamiento del gas natural.

La instalación de licuefacción 2 también tiene un separador principal 16 para separar cualquier NGL contenido en el gas natural, y un tambor 18 destinado a permitir una separación entre el gas
10 instantáneo (flash-gas) y el gas natural licuado (GNL).

A continuación se describen las diversas etapas del proceso de licuefacción de gas natural de acuerdo con la invención.

Antes del primer ciclo refrigerante semi-abierto con gas natural, el gas natural se somete a un tratamiento previo para que sea adecuado para la licuefacción. Este tratamiento previo comprende, en
15 particular, un tratamiento para extraer gas natural de gases ácidos (incluido el dióxido de carbono), estos gases ácidos pueden congelarse en particular en la instalación de licuefacción. El tratamiento previo también comprende un tratamiento de deshidratación para extraer el agua del gas natural y el tratamiento de eliminación de mercurio, donde el mercurio corre el riesgo de degradar el equipo hecho de aluminio en la instalación de licuefacción (incluido el intercambiador de calor criogénico principal 4).

20 La corriente de alimentación F0 del gas natural abandona esta fase previa del tratamiento previo, típicamente a una presión P0 comprendida en el rango de 5 MPa a 10 MPa y a una temperatura T0 cercana (específicamente en este ejemplo, ligeramente superior) a la temperatura de la fuente de calor. El término “fuente de calor” se usa en el presente documento para referirse a la fuente térmica que se usa para enfriar las corrientes no criogénicas del proceso de licuefacción. La fuente térmica puede ser típicamente aire
25 ambiente, agua de mar, agua fresca enfriada por agua de mar, un fluido enfriado por un ciclo refrigerante auxiliar, o una combinación de una pluralidad de estas fuentes.

Esta corriente F-0 se mezcla con la corriente de gas natural F21 que proviene de la instalación de licuefacción (y se describe a continuación) y alimenta el primer ciclo refrigerante semi-abierto con gas natural.

30 Como se mencionó anteriormente, este primer ciclo refrigerante semi-abierto con gas natural sirve para extraer cualquier NGL pesado que pueda estar presente en el gas natural y para enfriar previamente el gas natural y el gas refrigerante.

A este efecto, la corriente de alimentación de gas natural F-0 (combinada con la corriente de gas natural F-2-1 como se describe a continuación) pasa a través de la turbina de expansión a la temperatura
35 ambiente 6a en el escape (es decir, en la salida) cuya presión P1 se reduce a una presión comprendida en el rango de 1 MPa a 3 MPa y su temperatura T1 se reduce a una temperatura comprendida en el rango de 40°C a 60°C. Esta fase de expansión de la corriente de alimentación de gas natural conduce a la condensación de cualquier NGL pesado contenido en el gas natural.

El término “NGL pesado” se usa aquí para significar esencialmente C5 (pentanos), C6 (hexanos, benceno) e hidrocarburos superiores que están contenidos en el gas natural, y también fracciones más pequeñas y variables de etano, propano y butanos y una fracción muy limitada de metano.

Con la condensación de NGL pesados, la corriente de gas natural en el escape de la turbina de expansión a temperatura ambiente 6a se dirige a la entrada del separador principal 16. En la salida del separador principal 16, la corriente de líquidos de gas natural F-HL se recalienta, por ejemplo fluyendo a través del intercambiador de calor criogénico principal 4 (como se muestra en la figura) o pasando a través de un hervidor de NGL dedicado, y luego se dirige a una unidad de tratamiento de NGL 20. Después de calentarse, la corriente de líquidos de gas natural F-HL es una corriente de dos fases y puede enviarse directamente a la unidad de tratamiento NGL 20 (como se muestra en la figura) o bien puede someterse a una separación gas-líquido, devolviendo el gas evaporado al separador principal 16.

La unidad de tratamiento de NGL 20 es una unidad para el tratamiento de NGL pesados, y en particular para separar butanos e hidrocarburos más ligeros de pentanos e hidrocarburos más pesados para formar una corriente de salida de líquidos ligeros de gas natural F-G (también conocida como corriente NGL ligeros F-G) y un chorro de gasolina a gas natural. A la salida de la unidad de tratamiento de NGL, la corriente de NGL ligeros F-G que contiene predominantemente etano, propano y butanos es para reinyectarse en el gas para licuarlo siempre que sea compatible con la especificación de GNL objetivo (o bien se usa lejos de la instalación de licuefacción, siempre que no sea compatible).

Además, una fracción F-HL-1 de la corriente de líquidos de gas natural pesado F-HL se puede dirigir a un enfriador de NGL 19 para proporcionar la potencia térmica necesaria para operar el intercambiador de calor. En particular, la corriente de líquidos de gas natural ligero F-G de la unidad de tratamiento NGL 20 se enfría en el enfriador NGL 19. Una fracción F-G-1 de la corriente de NGL F-G refrigerada se reinyecta en el separador principal 16.

Al controlar la velocidad a la que esta corriente F-G-1 se reinyecta en el separador principal, es posible mejorar la extracción de NGL pesados y, en particular, reducir la cantidad residual de benceno y de hidrocarburos pesados en el gas a la salida de separador principal.

La fracción de la corriente de NGL ligero F-G enfriada que no se reinyecta en el separador principal 16 se reinyecta en la corriente de gas natural principal F-P, corriente abajo del punto de despegue que alimenta la turbina a temperatura intermedia 8a (descrita a continuación).

Debe observarse que la reinyección de la fracción F-G-1 de la corriente de NGL ligero F-G enfriado en el separador principal 16 no es necesaria si las cantidades de benceno y de C5 e hidrocarburos superiores en la corriente de alimentación de gas natural son bajas. También debe observarse que el enfriamiento de la corriente de NGL ligeros F-G se puede realizar directamente en el intercambiador de calor criogénico principal 4 si no se proporciona un intercambiador de calor dedicado para ese propósito.

Finalmente, debe observarse que la inyección de la corriente de NGL ligeros F-G puede tener lugar ya sea en co-corriente o en contracorriente. Cuando la corriente de NGL ligeros F-G se reinyecta en contracorriente en el separador principal 16, puede equiparse opcionalmente con un lecho de empaque para mejorar la eficiencia de la extracción de NGL.

A la salida del separador principal 16, la corriente de gas natural desprovisto de hidrocarburos pesados (residuo de gas) se encuentra a una temperatura que es aceptable para el enfriamiento previo del gas para licuar y del gas refrigerante. Para este propósito, este residuo de gas forma una primera corriente de gas natural F 1 que pasa a través del intercambiador de calor criogénico principal.

5 Cuando pasa a través del intercambiador de calor criogénico principal, la primera corriente de gas natural F-1 se enfría por cambio de calor, por una parte una corriente de gas natural principal F-P que fluye en contracorriente a través del intercambiador de calor criogénico principal, y por otra parte, la corriente inicial de gas refrigerante G-0 (como se menciona a continuación) que fluye en contracorriente a través del intercambiador de calor criogénico principal.

10 A la salida del intercambiador de calor criogénico principal, la primera corriente de gas natural F-1 se encuentra a una temperatura T_2 superior a T_1 y cercana a la temperatura de la fuente caliente. Se envía al compresor 6b que es impulsado por la turbina de expansión a temperatura ambiente 6a, donde se comprime a una presión P_2 , que generalmente se encuentra en el rango de 2 MPa a 4 MPa.

15 En la entrega (es decir, en la salida) del compresor 6b, la corriente de gas natural pasa a través de un enfriador de gas natural 21 y luego se admite en la succión (es decir, en la entrada) del compresor de gas natural 12, donde se comprime a una presión P_3 superior a P_2 y P_0 (y preferiblemente superior a la presión crítica del gas natural) para formar en la salida una segunda corriente de gas natural F-2. Por lo general, la presión P_3 puede estar en el rango de 6 MPa a 10 MPa.

20 En este compresor de gas natural 12, la corriente de gas natural puede comprimirse en dos fases sucesivas de compresión, entre las cuales la corriente de gas natural puede ser enfriada por un enfriador de gas natural 22.

25 La segunda corriente de gas natural F-2 pasa a través de otro enfriador de gas natural 24 y luego se separa en dos fracciones de corriente: una fracción de corriente F-2-1 se expande y se mezcla con la corriente de alimentación de gas natural F-0 corriente arriba de la turbina de expansión a temperatura ambiente 6a (como se describió anteriormente), y la fracción restante de esta corriente forma la corriente principal de gas natural F-P que pasa a través del intercambiador de calor criogénico principal 4.

Debe observarse que la corriente F-2-1 puede expandirse simplemente por medio de una simple válvula de control 23 (como se muestra en la figura), o por medio de una turbina de expansión.

30 Una fracción de esta corriente principal de gas natural F-P pasa a través del intercambiador de calor criogénico principal, donde se enfría a una temperatura T_3 (que generalmente se encuentra en el rango de -140°C a -160°C) que es lo suficientemente baja como para licuar el gas natural.

Otra fracción de la corriente principal de gas natural F-P está sujeta a un segundo ciclo semi-abierto de gas natural. El propósito de este segundo ciclo es contribuir a enfriar el gas refrigerante y contribuir al enfriamiento previo del gas natural y a su licuefacción.

35 La fracción de la corriente principal de gas natural F-P que se somete a este segundo ciclo semi-abierto se extrae del intercambiador de calor criogénico principal a una temperatura T_4 (que generalmente se encuentra en el rango de -10°C a 40°C) que es superior a la temperatura T_3 para ser enviada a la turbina de expansión a temperatura intermedia 8a para bajar su temperatura por expansión a una temperatura T_5

(que se encuentra típicamente en el rango de -80°C a -110°C) que es inferior a la temperatura T_4 y formar una tercera corriente de gas natural F-3.

La tercera corriente de gas natural F-3 puede contener opcionalmente una fracción variable de líquido condensado y luego se reinyecta en el intercambiador de calor criogénico principal para enfriar por intercambio de calor la corriente inicial de gas refrigerante G-0 y la corriente de gas natural principal F-P que pasa por el principal intercambiador de calor criogénico en contracorriente.

A la salida del intercambiador de calor criogénico principal, la tercera corriente de gas natural F-3 en la fase gaseosa y a una temperatura T_6 cercana a la temperatura de la fuente caliente se dirige a un compresor 8b que es impulsado por la turbina de expansión a temperatura intermedia 8a, donde se comprime. Después se enfría con un enfriador de gas natural 26 antes de mezclarse con la primera corriente de gas natural F-1 corriente arriba del compresor de gas natural 12.

Al pasar por el intercambiador de calor criogénico principal, la corriente principal de gas natural F-P se enfría mediante intercambio de calor con la primera corriente de gas natural F-1, la tercera corriente de gas natural F3 y mediante una primera corriente de gas refrigerante G-1 (descrita a continuación), los tres fluyen en contracorriente a través del intercambiador de calor criogénico principal 4.

A la salida del intercambiador de calor criogénico principal, la corriente principal de gas natural F-P se ha enfriado a una temperatura que le permite licuar. Se somete a la expansión de Joule-Thomson al pasar a través de una válvula 28 hasta alcanzar una presión cercana a la presión atmosférica. Alternativamente, esta expansión podría realizarse por medio de una turbina de expansión líquida para mejorar su eficiencia.

La expansión del gas natural licuado tiene el efecto de generar gases instantáneos, que se separan del gas natural licuado en el tambor 18 que está dedicado a este propósito. En la salida del tambor, la corriente de gas natural licuado GNL separada de los gases instantáneos se entrega a los recipientes de almacenamiento de GNL.

En cuanto a los gases instantáneos F-F, se envían al intercambiador de calor criogénico principal para ser calentados a una temperatura T_{11} que normalmente se encuentra en el rango de -50°C a -110°C , y luego a una unidad de tratamiento de gas instantáneo, lo que permite reducir las necesidades de potencia de refrigeración en la sección fría del intercambiador de calor criogénico principal.

A continuación se incluye una descripción del único ciclo refrigerante cerrado, que utiliza el gas refrigerante (predominantemente nitrógeno en este ejemplo) con el fin de suministrar energía térmica adicional a los otros dos ciclos refrigerantes y para sub-enfriar el gas natural licuado.

El compresor de gas refrigerante 14 entrega una corriente inicial de gas refrigerante G-0 que, después de ser enfriada en un enfriador de gas refrigerante 32, está a una temperatura T_7 cercana a la temperatura de la fuente caliente.

La mayor parte de esta corriente inicial de gas refrigerante G-0 se hace fluir a través del intercambiador de calor criogénico principal 4 para ser enfriada calentando previamente la primera corriente de gas natural F-1, una tercera corriente de gas natural F-3 y también la primera corriente de gas refrigerante G-1 como se menciona a continuación, que fluye en contracorriente a través del intercambiador

de calor criogénico principal.

A la salida del intercambiador de calor criogénico principal, la corriente inicial de gas refrigerante G-0 está a una temperatura T8 (por ejemplo, en el rango de -80°C a -110°C) que es inferior a la temperatura T7. Esta corriente se dirige a la turbina de expansión a baja temperatura 10a para que se enfríe aún más a una temperatura T9 (por ejemplo, en el rango de -140°C a -160°C) que es inferior a la temperatura T8, antes de ser reinyectada en el intercambiador de calor criogénico principal para formar una primera corriente de gas refrigerante G-1.

Como se describió anteriormente, el flujo de esta primera corriente de gas refrigerante G-1 a través del intercambiador de calor criogénico principal intercambia calor para enfriar la corriente principal de gas natural F-P y la corriente inicial de gas refrigerante G-0 en contracorriente fluye a través del intercambiador de calor criogénico principal.

A la salida del intercambiador de calor criogénico principal 4, la primera corriente de gas refrigerante G-1 está a una temperatura T10 superior a T9 y cercana a la temperatura de la fuente caliente. Esta corriente se dirige al compresor 10b impulsado por la turbina de expansión a baja temperatura 10a para comprimirse antes de ser enfriado por un enfriador de gas refrigerante 34 y luego reinyectarse por succión en el compresor de gas refrigerante 14.

Debe observarse que en el compresor de gas refrigerante 14, la primera corriente de gas refrigerante G-1 se puede comprimir en dos fases sucesivas de compresión, posiblemente la corriente de gas refrigerante se enfríe entre ellas por medio de otro enfriador de gas refrigerante 30.

Con referencia a las figuras 2 a 5, a continuación se describen varias variantes del proceso de licuefacción de la invención, observándose que cada una de estas variantes puede implementarse por separado o en combinación con las demás, según las circunstancias.

La figura 2 muestra una variante del proceso de licuefacción de la invención denominado de “recompresión en serie”.

Esta variante difiere de la modalidad de la figura 1 en donde el flujo entregado por el compresor 8b impulsado por la turbina de expansión a temperatura intermedia 8a se dirige a la succión del compresor 6b impulsado por la turbina de expansión a temperatura ambiente 6a (en lugar de ser admitido directamente a la succión del compresor de gas natural 12 como se describe para la modalidad de la figura 1). En la descarga del compresor 6b, este flujo de gas natural pasa a través del compresor de gas natural 21 y después se admite la succión del compresor de gas natural.

Esta variante permite que el gas natural sea comprimido en etapas, lo cual es más eficiente que la compresión descrita con referencia a la figura 1.

La figura 3 muestra otra variante del proceso de licuefacción de la invención referida como la variante de “pre-enfriamiento adicional por ciclo refrigerante auxiliar”.

Esta variante difiere de la modalidad de la figura 1 en la que, durante el primer ciclo refrigerante semi-abierto con gas natural, la corriente de alimentación de gas natural en la admisión a la turbina de expansión a temperatura ambiente 6a se enfría adicionalmente en un intercambiador de calor auxiliar 36.

Como se muestra en la figura 3, un ciclo de refrigeración auxiliar 38 proporciona la potencia de

refrigeración necesaria para operar el intercambiador de calor auxiliar 36. Este ciclo puede ser, por ejemplo, un ciclo de hidro-fluoro-carbono (HFC) o un ciclo de dióxido de carbono.

En esta variante, la temperatura en el separador principal 16 se reduce, lo que permite obtener una mejor recuperación de los NGL.

5 La figura 4 muestra otra variante del proceso de licuefacción de la invención, denominada variante de “absorción de NGL por reflujo sub-enfriado”.

En esta variante, durante el segundo ciclo refrigerante semi-abierto con gas natural, la tercera corriente de gas natural F3 en el escape de la turbina de expansión intermedia 8a se dirige a un separador auxiliar 40 desde la salida del cual se reinyecta la corriente de gas natural en el intercambiador de calor criogénico principal 4, la corriente de líquidos de gas natural en la salida del separador auxiliar 40 se
10 bombea total o parcialmente al separador principal 16 para contribuir a la absorción de líquidos del gas natural.

El contacto entre el gas natural para el tratamiento y el reflujo sub-enfriado puede tener lugar en contracorriente. A este efecto, el separador principal puede estar equipado con un lecho de empaque, por
15 ejemplo. En esta variante, es posible tratar gases ligeros con un alto contenido de compuestos aromáticos (por ejemplo, benceno), o extraer LPG con una alta tasa de recuperación (por ejemplo, para garantizar la producción industrial de GPL).

La figura 5 muestra otra variante del proceso de licuefacción de la invención referida como la variante de “absorción de NGL por reflujo de GNL”.

20 En esta variante, durante el primer ciclo refrigerante semi-abierto con gas natural, una porción F-I de la fracción de la corriente principal de gas natural F-P que pasa a través del intercambiador de calor criogénico principal 4 donde se enfría, se extrae de dicho intercambiador de calor criogénico principal a una temperatura T11 para ser dirigido al separador principal 16 para contribuir a la absorción de líquidos de gas natural.

25 La temperatura T11 a la que se extrae la corriente F-I es superior a la temperatura T3. A modo de ejemplo, se encuentra en el rango de -70°C a -110°C.

El contacto entre el gas natural para el tratamiento y el reflujo de GNL puede ocurrir, por ejemplo, en contracorriente. A este efecto, el separador principal puede estar equipado, por ejemplo, con un lecho de empaque. En esta variante, es posible tratar gases ligeros con un alto contenido de compuestos
30 aromáticos (por ejemplo, benceno) o, en particular, extraer GPL a una alta tasa de recuperación junto con etano.