

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 754 616**

51 Int. Cl.:

F17C 13/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.12.2016 PCT/FR2016/053518**

87 Fecha y número de publicación internacional: **22.06.2017 WO17103531**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.12.2016 E 16825534 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.10.2019 EP 3390893**

54 Título: **Procedimiento y sistema para calcular en tiempo real la duración de la autonomía de un depósito no refrigerado que contiene GNL**

30 Prioridad:

18.12.2015 FR 1562854

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

20.04.2020

73 Titular/es:

**ENGIE (100.0%)
1 place Samuel de Champlain
92400 Courbevoie, FR**

72 Inventor/es:

**BEN BELGACEM-STREK, MICHEL;
ZELLOUF, YACINE y
LEGRAND, FRÉDÉRIC**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 754 616 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

Procedimiento y sistema para calcular en tiempo real la duración de la autonomía de un depósito no refrigerado que contiene GNL

5 La presente invención se refiere de manera general a un procedimiento y a un sistema para calcular en tiempo real la duración de la autonomía de un depósito no refrigerado que contiene gas natural (normalmente designado por el acrónimo GN), que comprende una capa de gas natural licuado (GNL) y una capa de gas natural gaseoso (GNL).

10 Por duración de la autonomía de un depósito no refrigerado que contiene GN, se entiende, en el sentido de la presente invención, el tiempo de retención (o tiempo de almacenamiento) restante del gas natural en el depósito antes de abrir las válvulas del depósito.

15 El gas natural licuado (abreviado como GNL) es típicamente gas natural compuesto esencialmente de metano condensado en estado líquido: cuando se enfría a una temperatura de aproximadamente -160 °C a presión atmosférica, adopta la forma de un líquido claro, transparente, inodoro, no corrosivo y no tóxico. En un depósito que contiene GNL, generalmente este se presenta en forma de una capa de líquido, que está cubierta por una capa de gas ("cielo gaseoso").

20 El combustible GNL es una alternativa simple y eficaz a los combustibles convencionales. Tanto desde el punto de vista de las emisiones de CO₂, como el de las partículas contaminantes y la densidad energética. Cada vez más actores recurren a su uso, concretamente los transportistas por carretera, marítimos o ferroviarios.

25 Sin embargo, uno de los defectos intrínsecos del GNL es su calidad de líquido criogénico a presión atmosférica. Esto significa que el GNL debe mantenerse a una temperatura muy inferior a la temperatura ambiente para permanecer en estado líquido. Esto implica entradas de calor inevitables en el depósito de GNL no refrigerado y, por lo tanto, un aumento de la presión en la capa gaseosa hasta que se abren las válvulas del depósito. Este aumento de presión limita la duración de la autonomía del GNL en el depósito.

30 Ahora bien, la duración de la autonomía es un parámetro que es crucial conocer, con el fin de dimensionar la cadena logística y, concretamente el transporte de GNL e informar en tiempo real al operador sobre la duración de la autonomía residual (de la misma manera que generalmente se comunica la duración de la autonomía de una batería a su usuario). Cuando dicha información no se comunica a los operadores de un depósito de GNL, esto tiene, por ejemplo, como consecuencia emisiones de metano a la atmósfera que son incompatibles con los requisitos ambientales actuales.

35 En la actualidad, no se conoce ninguna solución para informar al operador en tiempo real de la duración de la autonomía (o tiempo de retención) de un depósito de GNL antes de abrir las válvulas. La única información disponible para el operador es la presión del cielo gaseoso (es decir, la capa de gas superficial en el depósito). En consecuencia, el operador sigue las normas de buena conducta deducidas a partir de la experiencia y proporcionadas por el fabricante del depósito para evitar una descarga de gas a la atmósfera.

40 La Patente de los Estados Unidos 7.104.124 describe un procedimiento y un sistema que permiten calcular la cantidad residual de un gas comprimido en un contenedor y, por lo tanto, el período restante de uso cuando este contenedor se vacía, este periodo corresponde al período durante el cual el gas residual del contenedor puede ser suministrado en función del caudal de utilización del gas. No obstante, la Patente de los Estados Unidos 7.104.124 no hace referencia alguna a un fluido criogénico que se evapora en un depósito criogénico, conteniendo este último, por tanto, a la vez gas natural en fase gaseosa y gas natural en fase líquida criogénica. Por lo tanto, la patente de los Estados Unidos no se refiere en principio al tiempo de retención de este fluido criogénico que se evapora en el depósito.

45 Las normas de seguridad vigentes (en particular, las establecidas por la "American Society of Mechanical Engineers", la "International Maritime Organization"), el "Acuerdo europeo sobre el transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera" y el "International Maritime Dangerous Goods") requieren que los fabricantes de depósitos calculen y midan un tiempo de retención máximo en determinadas condiciones precisas de llenado, de temperatura y de presión específicas para cada norma. Este tiempo de retención máximo se menciona actualmente en los estudios de dimensionamiento de las cadenas logísticas. No obstante, no se trata de una información en tiempo real sobre la duración de la autonomía del depósito y la ausencia de esta información en tiempo real es problemática por varias razones:

- 50
- se observa una falta de flexibilidad en la cadena logística: de hecho, los tiempos máximos de retención se calculan antes del desarrollo de la cadena logística. En caso de imprevistos, los clientes u operadores no tienen herramientas a su disposición para ayudarles en la toma de decisiones;
 - la gestión del GNL fuera de equilibrio no se tiene en cuenta: de hecho, un GNL no está necesariamente en un estado de equilibrio con su fase gaseosa, al contrario que en los casos hipotéticos que se tienen en cuenta en las normas vigentes. Un estado de desequilibrio podría sorprender al operador. Por ejemplo, en el caso de un GNL
- 65

subenfriado, el aumento de presión podría acelerarse enormemente una vez que se alcanza la temperatura de equilibrio. Esta temperatura de equilibrio es obviamente incalculable por el operador; es necesario que todos los operadores que tengan que gestionar GNL reciban una formación adaptada a la manipulación de GNL y a las buenas prácticas. Este es el caso de los actores actuales del mercado, quienes son en gran medida profesionales que han recibido dicha formación y que también están iniciados en las buenas prácticas. Pero esto es posible porque el mercado actual del carburante GNL es relativamente pequeño. Con todo, si el mercado llegara a crecer rápidamente, entonces habría actores con menos formación relacionados con el GNL. Conocer el tiempo que queda antes de que se produzca el evento podría ayudar mucho a estos nuevos actores en su gestión del GNL.

En conclusión, el objetivo de hoy en día es, para garantizar el desarrollo del GNL como carburante, implementar una solución que permita predecir mejor su comportamiento en tiempo real. La obligación de trabajar en un marco rígido preestablecido es uno de los obstáculos tecnológicos que actualmente benefician a sus competidores directos, como el diésel.

Para lograr el objetivo mencionado anteriormente, la solicitante ha desarrollado un procedimiento y un sistema para calcular en tiempo real la duración de la autonomía de un depósito no refrigerado que contiene GNL, que permiten proporcionar instantáneamente la duración de la autonomía de un depósito de GNL en función de:

- por un lado, los parámetros termodinámicos del GNL medidos en el interior del depósito por unos sensores dentro del depósito (temperaturas y composiciones del líquido y del gas, la presión del GNL gaseoso y la proporción de GNL líquido en el depósito), y
- por otro lado, los datos relativos al depósito (forma, dimensiones, presión de calibración de las válvulas del depósito y velocidad de evaporación o en inglés "*Boil Off Rate*" (BOR)).

La presente invención tiene, por lo tanto, como objetivo un procedimiento para calcular en tiempo real la duración de la autonomía de un depósito no refrigerado y que está definido por una presión de tara de las válvulas $P_{v\grave{a}lvula}$, su forma y sus dimensiones, así como su velocidad de evaporación, (normalmente designada en inglés con la expresión "*Boil Off Rate*" y el acrónimo correspondiente BOR (datos de entrada relativos al depósito), conteniendo dicho depósito gas natural (GN) que se distribuye en:

- una capa de gas natural en estado líquido (GNL), definida en un instante t dado por su temperatura $T_{liq}(t)$, su composición $x_{liq}(t)$ y la velocidad de llenado del depósito por dicha capa de gas natural en estado líquido (parámetros termodinámicos relativos al GN en estado líquido);
- una capa de gas natural en estado gaseoso (GNG), definida en un instante t dado por su temperatura $T_{gas}(t)$ y su composición $x_{gas}(t)$ y una presión $p(t)$ (parámetros termodinámicos relativos al GN en estado gaseoso);

estando dicho procedimiento caracterizado por que consiste en un algoritmo que consta de las siguientes etapas:

- A. en un momento t_0 , se procede a la inicialización de los parámetros físicos de dichas capas de gas natural licuado, mediante la medición, con la ayuda de sensores de presión y temperatura, de la presión del gas $p(t_0)$ y de la temperatura del líquido $T_{liq}(t_0)$, mientras que las respectivas composiciones de las fases líquida $x_{liq}(t_0)$ y gaseosa $x_{gas}(t_0)$ son datos de entrada conocidos que corresponden bien a las composiciones respectivas de las fases líquida y gaseosa en el momento de carga del depósito, bien a composiciones medias para el tipo de GNL utilizado;
- B. para cada instante t superior a t_0 , se resta un volumen V predeterminado de gas natural en estado gaseoso o líquido correspondiente al estado de funcionamiento del depósito en ese instante t (si este depósito es transportado por un vehículo parado, $V=0$, de lo contrario, V corresponde al consumo de GN del vehículo); y se calcula, basándose en el volumen de gas natural restante después de la sustracción, los parámetros físicos $p(t)$, $T_{gas}(t)$ y $T_{liq}(t)$, con la ayuda de ecuaciones basadas en la conservación de la masa y de la energía del gas natural líquido y gaseoso contenido en el depósito;
- C. mientras la presión $p(t)$ sea inferior a $P_{v\grave{a}lvula}$, se repite el cálculo de la etapa B para el instante siguiente $t+\delta t$, con un paso de tiempo físico δt constante (concretamente, del orden de un minuto, en función de los flujos de calor y de las constantes de tiempo de los equilibrios termodinámicos).
- D. tan pronto como en el transcurso de N iteraciones del proceso de cálculo de $p(t)$, $p(t+\delta t)$, ..., $p(t+N*\delta t)$, la presión $p(t+N*\delta t)$ se vuelve igual o superior a $P_{v\grave{a}lvula}$, se detiene el cálculo;
- E. la duración de la autonomía buscada es igual a la duración total $N*\delta t$ recorrida por el algoritmo en el momento de detención del cálculo.

El depósito puede operar en un sistema abierto (transportado en este caso por un vehículo en marcha) o cerrado (transportado en este caso por un vehículo parado o no transportado).

El proceso según la invención se ilustra en la figura 2.

Con respecto a los datos de entrada relativos al depósito, este puede presentarse con diferentes formas, por ejemplo, prismática, cilíndrica o esférica. Sus dimensiones pueden ser típicamente del orden de 1,5 m de longitud y

0,5 m de diámetro para un depósito cilíndrico. La presión de tara de las válvulas del depósito $p_{válvula}$ viene dada por el fabricante del depósito de GNL. Normalmente, es del orden de 1,6 Mpa (16 bares) para un depósito de 300 litros de volumen e incluso puede llegar a 2,5 Mpa (25 bares).

5 Por velocidad de evaporación (o en inglés "*Boil Off Rate*"), se entiende, en el sentido de la presente solicitud, el volumen equivalente de líquido que se evaporaría diariamente debido a las entradas de calor en el caso de que el depósito estuviera abierto. También es un valor específico del depósito, generalmente proporcionado por el fabricante.

10 Con respecto a los parámetros termodinámicos relativos al GN, se parte de la hipótesis de que el gas natural licuado contenido en el depósito se distribuye en una capa de gas natural en estado líquido y una capa de gas natural en estado gaseoso, como se ilustra en la figura 1. Cada capa está definida en cada instante t por su temperatura $T_{liq}(t)$ y $T_{gas}(t)$ (respectivamente, para la capa de GNL en estado líquido y la capa de GNL en estado gaseoso) y su composición $x_{liq}(t)$ y $x_{gas}(t)$ (respectivamente, para la capa de GNL y la capa de GNG).

15 La fase gaseosa (es decir, la capa de gas natural en estado gaseoso) además se caracteriza específicamente por su presión $p(t)$, que se calcula en cada instante t mediante la ecuación de estado de Peng-Robinson^[1], mientras que la fase líquida (es decir, la capa de gas natural en estado líquido) además se caracteriza específicamente por la velocidad de llenado z del depósito por la capa de gas natural en estado líquido, que suele ser del orden del 80 al 90 % en volumen después de cargar el depósito y al final del periodo de autonomía, del orden del 10 al 20 % en volumen.

20 Las composiciones $x_{liq}(t)$ y $x_{gas}(t)$ son vectores que dan la fracción másica de cada componente del GNL (generalmente, la fracción de masa de CH₄, C₂H₆, C₃H₈, iC₄H₁₀, nC₄H₁₀, iC₅H₁₂, nC₅H₁₂, nC₆H₁₄ y N₂ en cada una de las fases gaseosas o líquidas del GNL). Cabe señalar que la fase líquida y la fase gaseosa no están necesariamente en equilibrio termodinámico: de hecho, la compresión de la fase gaseosa durante un llenado puede inducir un retraso en los intercambios térmicos entre las dos fases (la líquida en estado sobreenfriado).

25 El procedimiento de cálculo según la invención consiste en un algoritmo (o código de comportamiento del GN) que comprende diferentes etapas A a D. Este código (o algoritmo) tiene en cuenta varios fenómenos físicos (detallados a continuación), que afectan a la presión:

- compresibilidad del gas,
- entrada de calor por conducción,
- 35 - entrada de calor por radiación,
- evaporación del GNL.

40 El código de comportamiento del GN es de tipo iterativo, es decir, calcula la evolución de la presión en cada paso de tiempo físico δt hasta la apertura de las válvulas.

45 La primera (etapa A) consiste en la inicialización, en un instante inicial t_0 , de los parámetros físicos de dichas capas de gas natural licuado, mediante la medición (de manera continua) con la ayuda de sensores de presión y temperatura, de la presión del gas $p(t_0)$ y de la temperatura del líquido $T_{liq}(t_0)$. Por el contrario, las respectivas composiciones de las fases líquida $x_{liq}(t_0)$ y gaseosa $x_{gas}(t_0)$ son datos de entrada conocidos que corresponden ya sea a las composiciones respectivas de las fases líquida y gaseosa en el momento de carga del depósito, ya sea a las composiciones medias para el tipo de GNL utilizado.

50 Después, para cada instante t superior a t_0 , se resta un volumen V predeterminado de gas natural en estado gaseoso o líquido correspondiente al estado de funcionamiento del depósito; entonces se calcula, durante la etapa B, los parámetros físicos $p(t)$, $T_{gas}(t)$ y $T_{liq}(t)$, con la ayuda de ecuaciones basadas en la conservación de la masa y la energía del gas natural líquido y gaseoso contenido en el depósito.

55 Estas ecuaciones, que se detallan a continuación, se basan en la hipótesis de que el depósito no refrigerado se considera un sistema cerrado: las ecuaciones de conservación de la masa son, por lo tanto, complementarias entre la fase gaseosa y la fase líquida, y la evaporación de la superficie se considera el único fenómeno que permite una transferencia de masa.

60 El cálculo de la masa de líquido se realiza teniendo en cuenta la velocidad de llenado z del depósito por el gas natural y la volumétrica del GNL a la temperatura del líquido $T_{liq}(t)$.

La evolución de la masa de la fase gaseosa se puede venir dada por la relación (1):

$$(1) \quad \frac{\partial}{\partial t} m_i = \dot{m}_{Ev} * x_{Ev,liq,i}$$

65 donde:

- m_i designa el caudal másico de un componente i del gas natural (véase más adelante el párrafo relativo a la evaporación de superficie en la parte de la descripción que describe los fenómenos físicos que deben tenerse en cuenta en la ley de comportamiento), y
- 5 - $X_{Ev, liq, i}$ designa la fracción másica del componente i asociado con la evaporación de GNL en la superficie libre de la capa líquida (en otras palabras, la interfaz entre las caras líquida y gaseosa).

La ecuación de conservación de la energía utilizada para la fase líquida puede venir dada por la relación (2):

$$10 \quad (2) \quad \frac{\partial}{\partial t} h_{liq} = \phi_{liq}^{Cond} + \phi_{Ray} - \phi_{Ev}$$

donde:

- h_{liq} designa la entalpía total de la fase líquida,
- 15 - Φ designa el flujo térmico asociado con cada fenómeno que actúa sobre el GNL:
 - o ϕ_{liq}^{Cond} designa, en particular, las entradas de calor parásitas por conducción a través de las paredes mojadas del depósito (lateral y fondo),
 - o ϕ_{Ray} designa, en particular, la radiación incidente de la fase gaseosa (capa superior del depósito), y
 - 20 o ϕ_{Ev} designa el flujo de GNL evaporado en la superficie libre de la capa de GNL líquido.

La ecuación de conservación de la energía de la fase gaseosa puede venir dada por la relación (3):

$$25 \quad (3) \quad \frac{\partial}{\partial t} h_{gas} = \phi_{Ev} + \phi_{gas}^{Cond}$$

donde:

- h_{gas} designa la entalpía total de la fase gaseosa, y
- ϕ_{Ev} es tal como se definió anteriormente, y
- 30 - ϕ_{gas}^{Cond} designa, en particular, las entradas de calor parásitas por conducción a través de las paredes secas del depósito (lateral y fondo).

Como ya se ha indicado anteriormente, la presión $p(t)$ de la fase gaseosa puede calcularse mediante la ecuación de Peng-Robinson^[1].

35 Las temperaturas del gas y del líquido, respectivamente $T_{gas}(t)$ y $T_{liq}(t)$, puede determinarse por la capacidad térmica a un volumen constante C_v de cada fase, lo que puede venir dado por la relación (4):

$$40 \quad (4) \quad T(t) = \frac{h}{c_v}$$

donde:

- $T(t)$ designa la temperatura de la fase considerada, calculada en el instante t ,
- h designa la entalpía de la fase considerada, y
- 45 - C_v la capacidad térmica con un volumen constante de la fase considerada.

Los principales fenómenos físicos que afectan a la presión $p(t)$, que se tienen en cuenta en el cálculo de la duración de la autonomía del depósito de acuerdo con el procedimiento según la invención, puede comprender, en concreto, la compresibilidad del gas, la entrada de calor por conducción, la entrada de calor por radiación y la evaporación del GNL. Estos fenómenos se detallan a continuación:

Evaporación de la superficie

55 Se considera que los intercambios de calor y masa entre la fase líquida y la fase gaseosa están controlados por una ley de evaporación superficial, cuyo motor es la diferencia de temperatura entre el núcleo de GNL almacenado en estado líquido y su superficie libre. La presión $p(T)$ en la fase gaseosa del depósito afecta a la evaporación de la superficie al influir en la temperatura de equilibrio del GN en la superficie líquida/vaporosa correspondiente a esta presión. Se supone que la temperatura de la superficie libre del GNL es igual a la temperatura de equilibrio del GNL.

60 La evaporación en un depósito de GN en reposo es un fenómeno local que se produce en la superficie. El cambio de fase es relativamente "suave" (es decir, sin ebullición y en una capa límite relativamente fina) y se produce sin ebullición. En el algoritmo del procedimiento según la invención se puede utilizar una ley basada en las leyes de la convección natural turbulenta, que concretamente puede tener la siguiente forma^[2]:

$$(5) \quad q_{ev} = K \cdot (\Delta T_{sobrecalentamiento})^\alpha$$

donde:

- 5 - K designa una constante relativa al GNL que siempre es positiva,
- $\Delta T_{sobrecalentamiento}$ designa el sobrecalentamiento que se produce durante el fenómeno de evaporación en el depósito de GNL,
- Q_{ev} designa el caudal de evaporación normalizado de GNL, y
- α designa un coeficiente relativo al GNL, donde $1 \leq \alpha \leq 2$.

10

Conducción térmica al nivel de las paredes

Para los intercambios térmicos con la pared, se puede considerar un flujo parietal uniforme y constante. El valor del flujo es una magnitud de entrada del cálculo, que está directamente relacionado con la velocidad de evaporación (generalmente designada en inglés con la expresión "Boil Off Rate" o el acrónimo correspondiente BOR) según los criterios de los fabricantes.

15

Radiación térmica de las paredes

20 Las paredes verticales no mojadas pueden ser, asimismo, objeto de flujos térmicos, que tienen el efecto de recalentar la fase gaseosa, pero también de contribuir al recalentamiento del líquido por radiación.

Para tener en cuenta la contribución de la fase gaseosa al recalentamiento del líquido, se puede usar un modelo simple que establece un balance de radiación en todas las superficies, es decir, la superficie libre del GNL (interfaz) y las superficies no mojadas del depósito (superficies del depósito únicamente en contacto con la fase gaseosa del GN en el depósito). Las hipótesis de este modelo se detallan a continuación:

25

- se supone que la superficie libre es plana a la temperatura de saturación del GNL. Por otra parte, se supone que esta superficie es negra con $\epsilon = \alpha = 1$, $\rho = 0$, siendo ϵ la emisividad, α el factor de absorción y ρ designando el factor de reflexión,
- se supone que las paredes verticales del depósito se encuentran a una temperatura constante. También se supone que estas superficies son grises con una emisividad constante $\epsilon = \alpha = cte$, $\rho = 1 - \alpha$,
- se supone que el gas es transparente a la radiación de las paredes.

30

35 Se puede utilizar, para cada una de las superficies involucradas, la ecuación de radiosidad para regir estos intercambios:

$$(6) \quad \Phi_{neto} = Superficie \times (Radiación\ reflejada - Radiación\ incidente) = S \times (J - E)$$

40 donde:

- E designa la iluminancia (o flujo incidente) y
- J designa la radiosidad que se expresa como ($\epsilon\sigma T^4 + \rho E$);
- $S_{superficie}$ designa el área de la superficie involucrada;
- 45 - Φ_{neto} significa el flujo neto recibido por esta superficie.

45

De este modo, ventajosamente, el cálculo en la etapa B de los parámetros físicos $p(t)$, $T_{gas}(t)$ y $T_{liq}(t)$ se puede realizar según las etapas definidas como sigue.

- 50 • la temperatura de la fase líquida $T_{liq}(t)$ y de la fase gaseosa $T_{gas}(t)$ se determinan directamente a partir de la ecuación de conservación de la energía, usando como datos de entrada las capacidades térmicas del gas natural en estado líquido y del gas natural en estado gaseoso, el aislamiento térmico del depósito definido por el fabricante del depósito y las temperaturas en el instante $t-\delta t$ del GNL y del GNG,
- la masa de líquido evaporada en la fase gaseosa se determina mediante la relación (5) en función de la temperatura del líquido y de la presión determinada en la etapa anterior en el instante $t-\delta t$:

55

$$(7) \quad q_{ev} = K \cdot (\Delta T_{sobrecalentamiento})^\alpha$$

donde:

60

- K designa una constante relativa al GNL y que es siempre positiva,
- $\Delta T_{sobrecalentamiento}$ designa el sobrecalentamiento que se produce durante el fenómeno de evaporación en el depósito de GNL,
- Q_{ev} designa el caudal de evaporación normalizado de GNL, y
- 65 - α designa un coeficiente relativo al GNL, donde $1 \leq \alpha \leq 2$;
- un 2 coeficiente relativo al GNL, donde $1 \leq \alpha \leq 2$;

65

- la presión $p(t)$ de la fase gaseosa se obtiene mediante la ecuación de Peng-Robinson, usando como datos de entrada la masa de líquido evaporada, el volumen del depósito y la temperatura del gas en el instante t .

5 Durante el transcurso de la etapa C del algoritmo del procedimiento según la invención, se repite el cálculo de la etapa B, recalculando, para el instante siguiente $t+\delta t$ (con un paso de tiempo físico δt constante), las ecuaciones de conservación de la masa y de la energía mientras la presión $p(t)$ sea inferior a $p_{válvula}$. Este paso de tiempo δt puede ser del orden de un minuto. Su valor depende de los flujos térmicos, de las constantes de tiempo de los equilibrios termodinámicos.

10 Tan pronto como en el transcurso de N iteraciones del proceso de cálculo de $p(t)$, $p(t+\delta t)$ $p(t+N*\delta t)$, la presión $p(t+N*\delta t)$ de la fase gaseosa en el instante $t+N*\delta t$ pasa a ser igual o superior a la presión de apertura de las válvulas $p_{válvula}$, el algoritmo finaliza (etapa D) y devuelve la duración total recorrida por el algoritmo (etapa E), que es igual a la duración total $N*\delta t$ recorrida por el algoritmo en el momento de detención del cálculo.

15 Un operador, conociendo esta duración podrá deducir la duración de la autonomía del depósito, es decir, el tiempo de retención (o tiempo de almacenamiento) restante de un GNL en el depósito antes de la apertura de las válvulas del depósito.

20 De manera ventajosa, se reitera, en el procedimiento según la invención, el conjunto de etapas A a D tan pronto como haya transcurrido un intervalo de tiempo ΔT (definido en función de la tecnología del calculador) para volver a calcular la duración de la autonomía en el instante $t_0 + \Delta T$. Típicamente, este intervalo de tiempo puede ser del orden de 1 minuto, pero puede variar en función de la tecnología utilizada (calculador, interfaz IHM en particular).

25 De manera ventajosa, el algoritmo (o código de comportamiento GN) del procedimiento según la invención puede implementarse por medio de un calculador conectado a una interfaz IHM que permite informar a un operador esta duración de la autonomía. Gracias al calculador conectado a una interfaz IHM, se podrá realizar un cálculo físico de la duración de la autonomía en todos los intervalos de tiempo ΔT (variables en función de la tecnología utilizada, por ejemplo, cada minuto) y el resultado de este cálculo se podrá transmitir a la IHM.

30 Como se ha indicado anteriormente, se deben proporcionar diferentes tipos de datos al calculador:

- datos relativos al depósito (a introducir una sola vez por el usuario):

- 35
- forma del depósito (prismático, cilíndrico, esférico, ...),
 - dimensiones del depósito,
 - velocidad de evaporación (o BOR) del depósito,
 - evaluación de las entradas de calor (datos del fabricante), y
 - la presión de calibración de las válvulas $p_{válvula}$,

40 - composición del GN (a introducir al comienzo de la carga del depósito o utilización de una composición promedio), y

45 - datos proporcionados por los sensores (de manera continua): Temperatura del gas y del líquido y Presión del gas.

50 Por lo tanto, la presente invención también se refiere a un sistema para calcular en tiempo real la duración de la autonomía de un depósito no refrigerado, en el que el algoritmo se implementa mediante un calculador que calcula la duración de la autonomía del depósito, estando el depósito definido por una presión de tara de las válvulas $P_{válvula}$, su forma y sus dimensiones, así como su velocidad de evaporación, constando dicho sistema según la invención de:

- un depósito que contiene gas natural licuado, que se distribuye en:

- 55
- una capa de gas natural en estado líquido, definida en un instante t dado por su temperatura $T_{liq}(t)$, su composición $x_{liq}(t)$ y la velocidad de llenado del depósito por dicha capa de gas natural; y
 - una capa de gas natural en estado gaseoso, definida en un instante t dado por su temperatura $T_{gas}(t)$ y su composición $x_{gas}(t)$, y una presión $p(t)$;

60 - unos sensores de presión y de temperatura,

estando dicho sistema caracterizado por que además consta de:

- 65
- un calculador conectado a dichos sensores de presión y temperatura, siendo dicho calculador capaz de ejecutar el algoritmo del procedimiento tal y como se ha definido según la invención,
 - una interfaz IHM que interactúa con dicho calculador, para proporcionar a un operador la duración de la autonomía calculada según el algoritmo (o código de comportamiento del GNL) del procedimiento según la

invención cuando se implementa por medio de un computador conectado a una interfaz IHM.

A modo de interfaces IHM (acrónimo que significa interfaz hombre-máquina) que se pueden utilizar en el contexto de la presente invención, podemos mencionar concretamente los paneles de instrumentos de los vehículos, los teclados de ordenador, los testigos LED, las pantallas táctiles y tabletas.

Según un modo de realización ventajoso del sistema según la invención, dicho sistema según la invención es un sistema integrado en el que:

- el computador es un computador integrado conectado a dichos sensores de presión y temperatura, estando dicho computador diseñado específicamente para ejecutar el algoritmo del procedimiento según la invención,
- la interfaz IHM también puede integrarse o, como alternativa, ser remota si, por ejemplo, el vehículo está conectado a una central de control,
- esta interfaz IHM, si está integrada, puede ser de tipo panel de instrumentos del vehículo, interactuando específicamente con dicho computador integrado para proporcionar al operador (en este caso, el conductor) la duración de la autonomía calculada según el procedimiento de la invención.

Por computador diseñado específicamente para ejecutar el algoritmo del procedimiento según la invención, se entiende, en el sentido de la presente invención, un ordenador de a bordo que comprende un procesador asociado con una memoria de almacenamiento dedicada y una placa base de interfaces; estando el conjunto de estos elementos ensamblados para asegurar la robustez del conjunto del "ordenador de a bordo" en términos de resistencia mecánica, termodinámica y electromagnética, y permitir así su adaptación para su uso en un vehículo de GNL.

Específicamente, el computador además puede comprender una pantalla y un teclado. Está conectado a dos sensores, uno de presión y uno de temperatura, que proporcionan información sobre el estado del GNL dentro del depósito (véase la figura 1).

El sistema según la invención se ilustra en la figura 2.

La presente invención también se refiere a un vehículo (terrestre, marítimo o aéreo) que consta de un depósito de GNL y de un sistema según la invención, siendo el depósito y el sistema tales como se han definido anteriormente. La duración de la autonomía, que es el dato de interés para el operador (por ejemplo, el conductor del vehículo o un operador remoto), puede mostrarse ventajosamente, por ejemplo, al nivel del panel de instrumentos de un vehículo y/o en un lado del vehículo.

Por lo tanto, la presente invención presenta las siguientes ventajas múltiples:

- el hecho de tener una información sobre la duración de la retención de cualquier depósito de GNL de manera instantánea.
- tiene en cuenta la calidad del GNL en el cálculo, lo que no es el caso con las normas actuales donde se usa metano puro como referencia.
- puede gestionar GNL no equilibrado.
- tiene en cuenta la compresibilidad del cielo gaseoso.

Otras ventajas y particularidades de la presente invención se apreciarán a partir de la siguiente descripción, aportada a modo de ejemplo no limitativo y realizada con referencia a los dibujos adjuntos:

- la figura 1 representa un diagrama esquemático de un depósito 1 de GN según la invención;
- la figura 2 representa un diagrama esquemático del sistema según la invención,
- la figura 3 representa un diagrama esquemático del procedimiento según la invención,
- las figuras 4 a 8 son capturas de pantalla de los paneles de instrumentos de los vehículos que transportan, cada uno, un depósito de GN no refrigerado.

La figura 1 muestra esquemáticamente un depósito 1 de GNL, que está modelado según un sistema bicapa con dos capas homogéneas de GN, una capa líquida 1 (GNL) y una capa gaseosa g (GNG).

La figura 2 es un diagrama esquemático del sistema según la invención, que consta de:

- un depósito 1 que contiene gas natural licuado, que se distribuye en
 - una capa de gas natural en estado líquido 1 ($T_{liq}(t)$, $x_{liq}(t)$, y la velocidad de llenado z del depósito 1 por la capa de gas natural en estado líquido);
 - una capa de gas natural g en estado gaseoso g ($T_{gas}(t)$, $x_{gas}(t)$ y $p(t)$);
- unos sensores de presión 3 y de temperatura 4,

- un calculador 5 conectado a dichos sensores de presión 3 y temperatura 4, siendo el calculador capaz de ejecutar el algoritmo del procedimiento tal y como se ha definido según la reivindicación 4,
- una interfaz IHM 6 que interactúa con el calculador, proporcionar a un operador 7 dado la duración de la autonomía calculada según el procedimiento de la reivindicación 4.

La figura 3 es un diagrama esquemático del procedimiento según la invención, que muestra las diferentes etapas del procedimiento como se ha descrito anteriormente.

Las figuras 4 a 8 son capturas de pantalla de los paneles de instrumentos de vehículos que transportan, cada uno, un depósito de GNL no refrigerado.

En particular, la figura 4 es una captura de pantalla de un panel de instrumentos que muestra los datos de entrada específicos del depósito (dimensiones, velocidad de evaporación, presión máxima permitida). Estos datos son comunes a todos los ejemplos que se describen a continuación.

La figura 5 es una captura de pantalla de un panel de instrumentos que muestra, para un primer ejemplo de cálculo de acuerdo con el procedimiento de cálculo según la invención, los datos de entrada específicos de un GNL (composición, temperatura, presión y velocidad de llenado z. En este ejemplo, el GNL está ligeramente sobrecalentado: temperatura de $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la temperatura de equilibrio para este GNL es de $-162,31\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La figura 6 es una captura de pantalla de un panel de instrumentos que muestra, para un segundo ejemplo de cálculo de acuerdo con el procedimiento de cálculo según la invención, los datos de entrada específicos de un GNL (composición, temperatura, presión y velocidad de llenado z. En este ejemplo, el GNL está ligeramente sobreenfriado: temperatura de $-157\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la temperatura de equilibrio para este GNL es de $-154,17\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Las figuras 7 y 8 son capturas de pantalla que dan, respectivamente, para cada uno del primer (datos de las figuras 4 y 5) y segundo ejemplos (datos de las figuras 4 y 6), la duración de la autonomía calculada del depósito no refrigerado transportado por el vehículo.

Lista de referencias

[1] Peng, D. Y. (1976). A New Two-Constant Equation of State. Industrial and Engineering Chemistry: Fundamentals, 15: 59-64.

[2] H.T Hashemi, H. W. (1971). CUT LNG STORAGE COSTS. Hydrocarbon Processing, 117-120.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para calcular en tiempo real la duración de la autonomía de un depósito no refrigerado y definido por una presión de tara de las válvulas $P_{v\grave{a}lvula}$, su forma y sus dimensiones, así como su velocidad de evaporación, conteniendo dicho depósito gas natural que se distribuye en:

- una capa de gas natural en estado líquido (l), definida en un instante t dado por su temperatura $T_{liq}(t)$, su composición $x_{liq}(t)$ y la velocidad de llenado del depósito por dicha capa de gas natural;
- una capa de gas natural en estado gaseoso (g), definida en un instante t dado por su temperatura $T_{gas}(t)$ y su composición $x_{gas}(t)$, y una presión p(t);

estando dicho procedimiento caracterizado por que consiste en un algoritmo que consta de las siguientes etapas:

A. en un momento t_0 , se procede a la inicialización de los parámetros físicos de dichas capas de gas natural, mediante la medición, con la ayuda de sensores de presión y temperatura, de la presión del gas $p(t_0)$ y la temperatura del líquido $T_{liq}(t_0)$; mientras que las respectivas composiciones de las fases líquida $x_{liq}(t_0)$ y gaseosa $x_{gas}(t_0)$ son datos de entrada conocidos que corresponden bien a las composiciones respectivas de las fases líquida y gaseosa en el momento de carga del depósito, bien a composiciones medias para el tipo de GNL utilizado;

B. para cada instante t superior a t_0 , se resta un volumen predeterminado de gas natural en estado gaseoso o líquido, correspondiendo dicho volumen al estado de funcionamiento del depósito en ese instante t; y se calcula, basándose en el volumen de gas natural restante después de la sustracción, los parámetros físicos p(t), $T_{gas}(t)$ y $T_{liq}(t)$, con la ayuda de ecuaciones basadas en la conservación de la masa y de la energía del gas natural líquido y gaseoso contenido en el depósito;

C. mientras la presión p(t) sea inferior a $P_{v\grave{a}lvula}$, se repite el cálculo de la etapa B para el instante siguiente $t+\delta t$, con un paso de tiempo físico δt constante;

D. tan pronto como en el transcurso de N iteraciones del proceso de cálculo de p(t), $p(t+\delta t)$,..., $p(t+N\delta t)$, la presión $p(t+N\delta t)$ se vuelva igual o superior a $P_{v\grave{a}lvula}$, se detiene el cálculo;

E. la duración de la autonomía buscada es igual a la duración total $N\delta t$ recorrida por el algoritmo en el momento de detención del cálculo.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que todos se repite el conjunto de las etapas A a D tan pronto como haya transcurrido un intervalo de tiempo ΔT , para recalcular la duración de la autonomía en el instante $t_0+\Delta T$.

3. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que el cálculo en la etapa B de los parámetros físicos p(t), $T_{gas}(t)$ y $T_{liq}(t)$ se realiza según las etapas definidas como sigue.

- la temperatura de la fase líquida $T_{liq}(t)$ y de la fase gaseosa $T_{gas}(t)$ se determinan directamente a partir de la ecuación de conservación de la energía, usando como datos de entrada las capacidades térmicas del gas natural en estado líquido y del gas natural en estado gaseoso, el aislamiento térmico del depósito definido por el fabricante del depósito y las temperaturas en el instante $t-\delta t$ del GNL líquido y del GNL gaseoso,
- la masa de líquido evaporada en la fase gaseosa se determina mediante la relación (5) en función de la temperatura del líquido y de la presión determinada en la etapa anterior en el instante $t-\delta t$:

$$(8) \quad q_{ev} = K \cdot (\Delta T_{sobrecalentamiento})^\alpha$$

donde:

- K designa una constante relativa al GNL y que es siempre positiva,
- $\Delta T_{sobrecalentamiento}$ designa el sobrecalentamiento que se produce durante el fenómeno de evaporación en el depósito de GNL,
- Q_{ev} designa el caudal de evaporación normalizado de GNL, y
- α designa un coeficiente relativo al GNL, donde $1 \leq \alpha \leq 2$;
- un 2 coeficiente relativo al GNL, donde $1 \leq \alpha \leq 2$;

- la presión p(t) de la fase gaseosa se obtiene mediante la ecuación de Peng-Robinson, usando como datos de entrada la masa de líquido evaporada, el volumen del depósito y la temperatura del gas en el instante t.

4. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el algoritmo se implementa mediante un calculador que calcula la duración de la autonomía del depósito, estando dicho calculador conectado a una interfaz IHM que permite informar a un operador sobre esta duración de la autonomía.

5. Sistema para calcular en tiempo real, según el procedimiento tal y como se ha definido en la reivindicación 3, la duración de la autonomía de un depósito no refrigerado y definido por una presión de tara de las válvulas $P_{v\grave{a}lvula}$, su forma y sus dimensiones, así como su velocidad de evaporación, constanding dicho sistema de:

- un depósito que contiene gas natural licuado, que se distribuye en:

5 o una capa de gas natural en estado líquido, definida en un instante t dado por su temperatura $T_{liq}(t)$, su composición $x_{liq}(t)$, y la velocidad de llenado del depósito por dicha capa de gas natural en estado líquido;
o una capa de gas natural en estado gaseoso, definida en un instante t dado por su temperatura $T_{gas}(t)$ y su composición $x_{gas}(t)$ y una presión $p(t)$;

- unos sensores de presión y de temperatura,

10 estando dicho sistema caracterizado por que es un sistema integrado que además consta de:

- un calculador (5) integrado conectado a dichos sensores de presión (3) y temperatura (4), estando dicho calculador diseñado para ejecutar el algoritmo del procedimiento tal y como se ha definido según la reivindicación 4,
15 - una interfaz IHM (6), de tipo panel de instrumentos integrado de un vehículo, interactuando específicamente con dicho calculador (5) integrado, para proporcionar a un operador (7) la duración de la autonomía calculada según el procedimiento de la reivindicación 4.

20 6. Vehículo que consta de un depósito GN y de un sistema como el que se ha definido en la reivindicación 5.

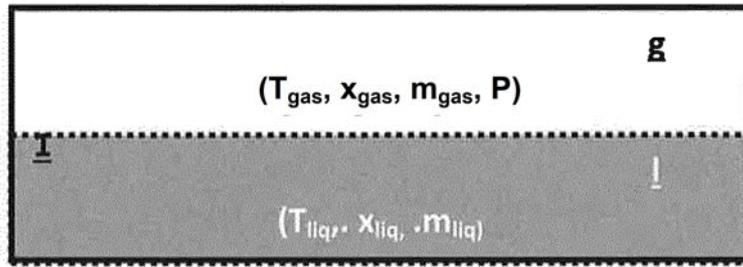


FIG. 1

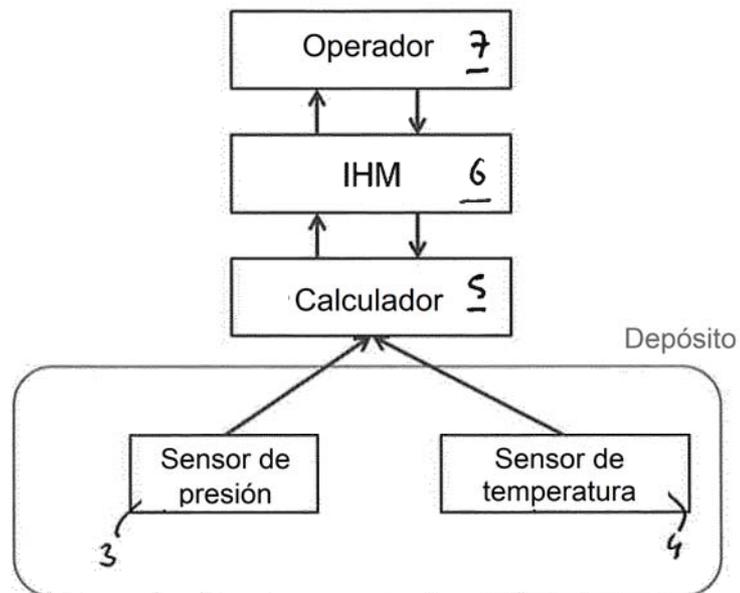


FIG. 2

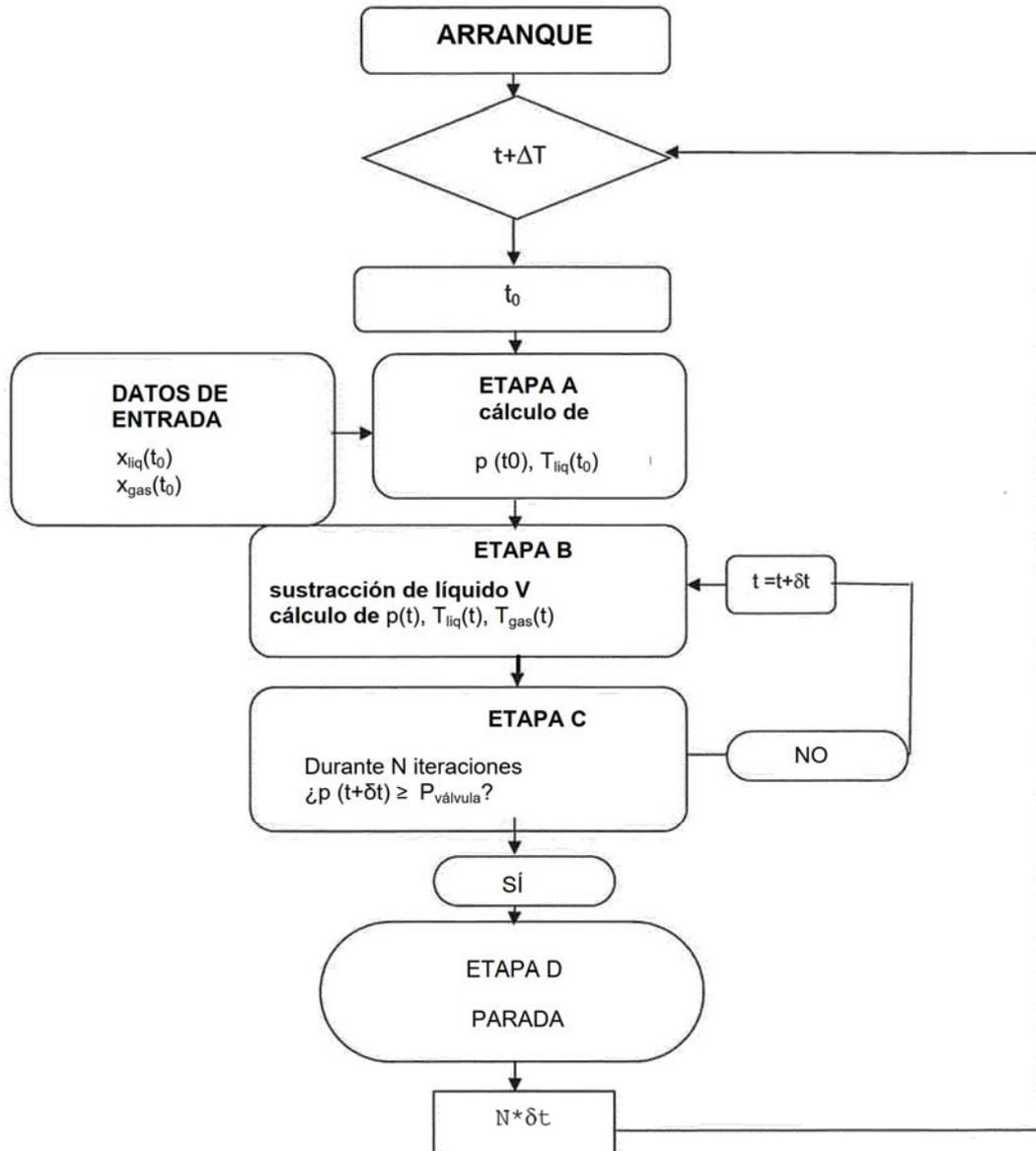


FIG. 3

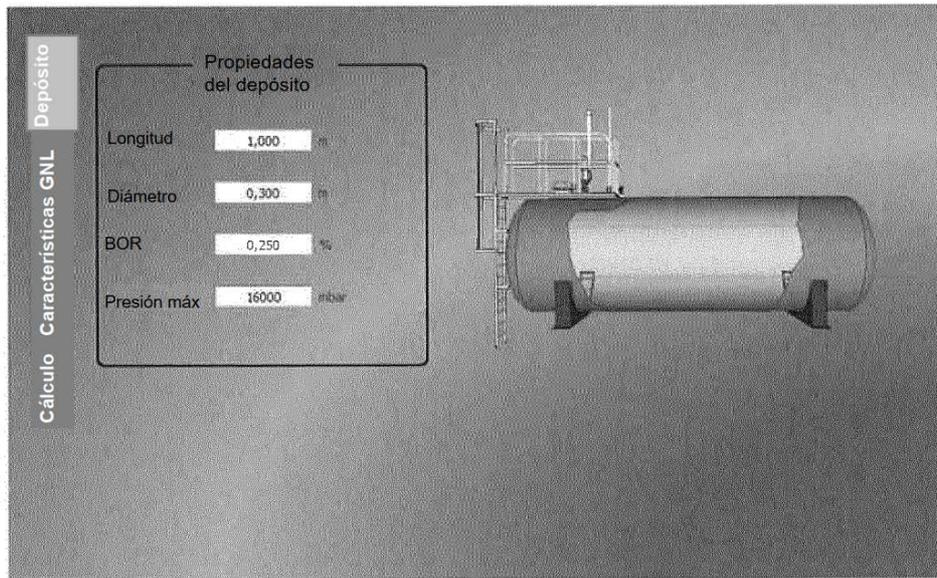


FIG. 4

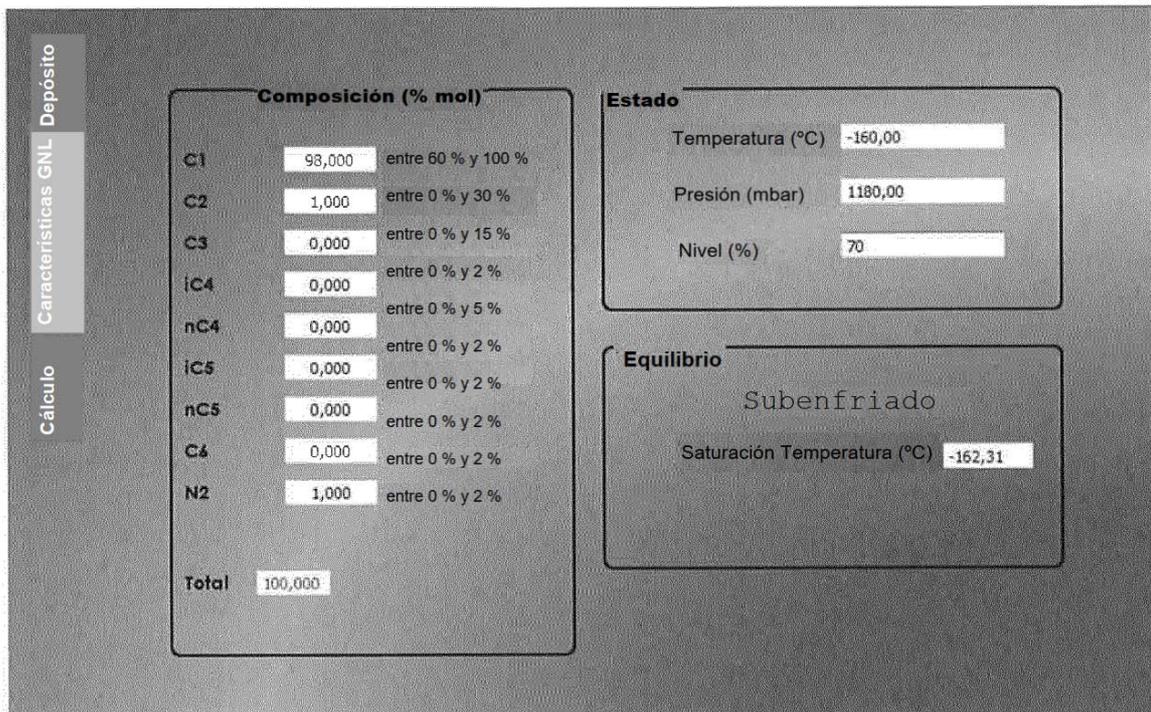


FIG. 5

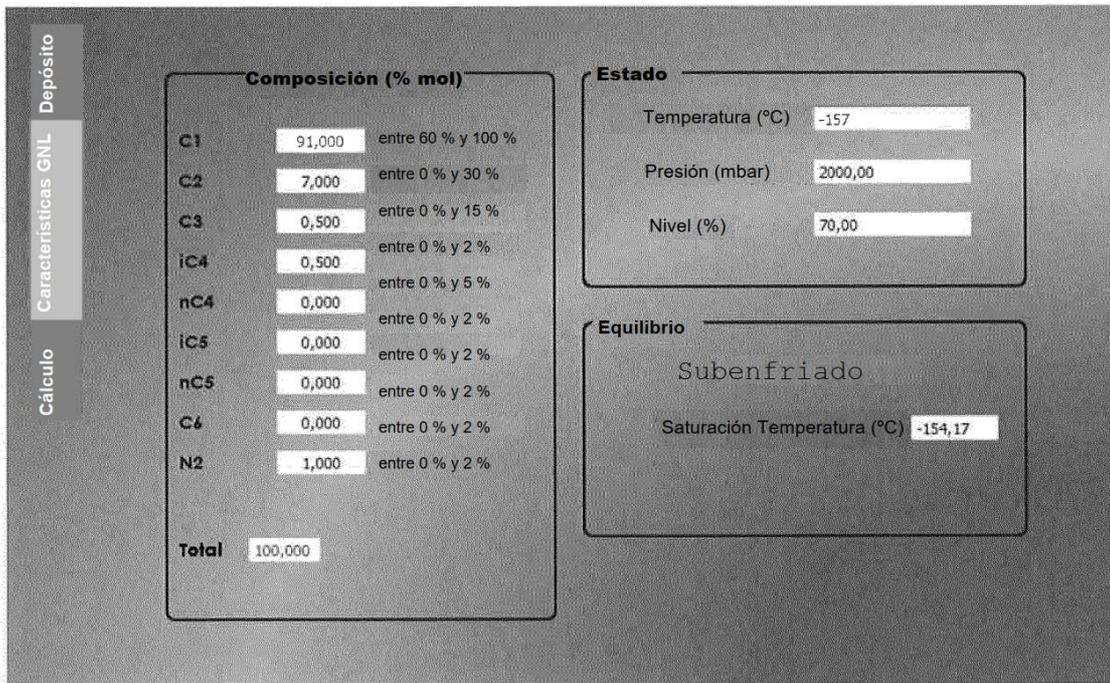


FIG. 6

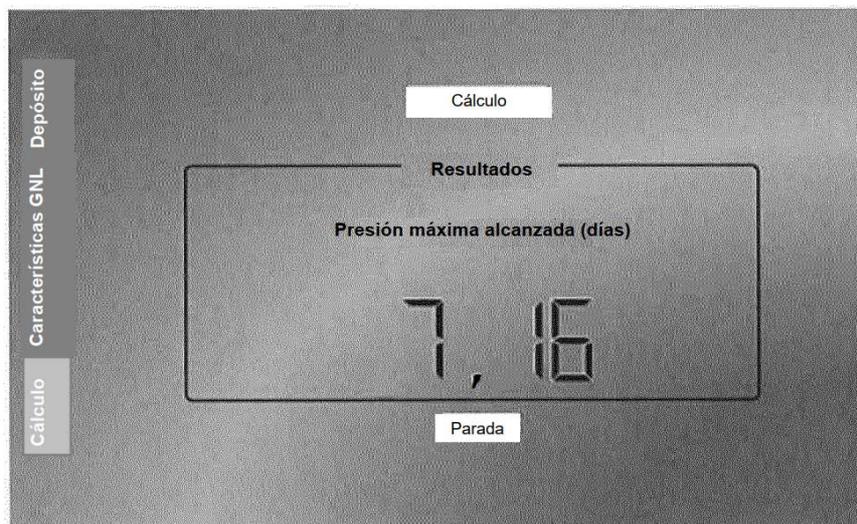


FIG. 7



FIG. 8