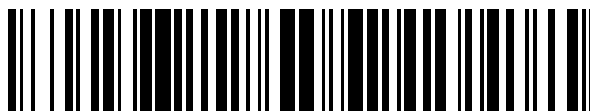


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 793 873**

51 Int. Cl.:

C01B 3/00 (2006.01)

B65G 5/00 (2006.01)

C01B 3/50 (2006.01)

F17C 3/00 (2006.01)

B01D 53/26 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.08.2015 E 15183111 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.03.2020 EP 3018093**

54 Título: **Método para tratar hidrógeno que se va a almacenar en una caverna de sal y suministro del mismo**

30 Prioridad:

02.09.2014 US 201414475120

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

17.11.2020

73 Titular/es:

**PRAXAIR TECHNOLOGY, INC. (100.0%)
10 Riverview Drive
Danbury, CT 06810, US**

72 Inventor/es:

OATES, ROMMEL M.

74 Agente/Representante:

DEL VALLE VALIENTE, Sonia

ES 2 793 873 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

Método para tratar hidrógeno que se va a almacenar en una caverna de sal y suministro del mismo

5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a un novedoso sistema y método para tratar el hidrógeno que se va a almacenar en una caverna de sal y el suministro de hidrógeno desde la caverna de sal. En particular, el proceso de tratamiento implica enfriar el producto de hidrógeno y/o una corriente de hidrógeno en bruto que se ha extraído de la caverna.

10 Antecedentes de la invención

El hidrógeno se suministra a los clientes conectados a un sistema de conducciones de hidrógeno. De forma típica, el hidrógeno se fabrica mediante reformado de metano con vapor, en la que un hidrocarburo y vapor se hacen reaccionar a alta temperatura para producir un gas de síntesis que contiene hidrógeno y monóxido de carbono. El hidrógeno se separa del gas de síntesis para producir una corriente de producto de hidrógeno que se introduce en el sistema de conducciones para su distribución a los clientes que están conectados al sistema de conducciones. Alternativamente, el hidrógeno producido a partir de la oxidación parcial de un hidrocarburo se puede recuperar de una corriente rica en hidrógeno.

De forma típica, el hidrógeno se suministra a los clientes según contratos que exigen disponibilidad y tiempos de funcionamiento para la planta de reformado de metano con vapor o de recuperación de hidrógeno. Cuando una planta de reformado de metano con vapor se pone fuera de línea debido a un mantenimiento no planificado o prolongado, el resultado podría ser una infracción de dichos contratos. Es por tanto deseable disponer de una instalación de almacenamiento para suministrar hidrógeno de respaldo a las conducciones de suministro en lo que respecta al funcionamiento de las conducciones de hidrógeno. Teniendo en cuenta que las plantas de producción de hidrógeno tienen, de media, capacidades que son de aproximadamente 1,42 millones de metros cúbicos estándar (50 millones de pies cúbicos estándar) al día o mayor, una instalación de almacenamiento que permitiera que una planta se pusiera fuera de línea, para que fuera eficaz, debería tener una capacidad de almacenamiento de aproximadamente 28,3 millones de metros cúbicos estándar (1000 millones de pies cúbicos estándar) o mayor.

Adicionalmente, existen casos en los que la demanda del cliente puede superar la capacidad de producción de hidrógeno de las plantas existentes. La instalación de almacenamiento permite que el exceso de hidrógeno se almacene temporalmente y posteriormente esté disponible como suministro de respaldo para ayudar a satisfacer la demanda del cliente cuando, por ejemplo, una planta de reformado de metano con vapor no puede satisfacer la demanda del cliente.

La importante capacidad de almacenamiento se puede conseguir mediante cavernas de sal para almacenar el hidrógeno bajo tierra. Las cavernas de sal son grandes huecos subterráneos que se han formado por adición de agua dulce a la sal subterránea, creando de esta forma salmuera. Este proceso de formación se denomina como minería en solución. Las cavernas son habituales en los estados del golfo de Estados Unidos donde la demanda de hidrógeno es especialmente elevada. El almacenamiento de hidrógeno se ha realizado donde no hay requisitos de pureza o se aplican requisitos menos rigurosos (<95 % de pureza) al producto de hidrógeno. En ese caso, el hidrógeno almacenado procedente de la caverna de sal se puede retirar de la caverna de sal sin procesamiento adicional.

Sin embargo, utilizar una caverna de sal para ayudar en el suministro de hidrógeno de pureza superior de al menos un 95 % de pureza o mayor supone un desafío. El hidrógeno almacenado dentro de la caverna de sal tiene tendencia a quedar contaminado por intrusión de diversos contaminantes, que pueden incluir, a modo de ejemplo, vapor de agua, hidrocarburos, compuestos que contienen azufre y/o dióxido de carbono. La contaminación del hidrógeno almacenado requiere la eliminación de uno o más contaminantes del hidrógeno almacenado cuando se extrae en forma de corriente de hidrógeno en bruto de la caverna de sal. Se han implementado métodos para garantizar que las impurezas transmitidas por la caverna de sal al hidrógeno almacenado no alteren negativamente el producto de hidrógeno en las conducciones. Por ejemplo, la patente US-7078011 retira al menos el dióxido de carbono y el agua de una corriente de hidrógeno en bruto procedente de una caverna de sal para producir una corriente de producto de hidrógeno que tiene un nivel de impurezas en o por debajo de una norma de pureza del producto. La publicación de patente US-2013/0213.479 retira hidrógeno en bruto de una caverna de sal y después diluye el hidrógeno en bruto con hidrógeno de pureza superior procedente de una conducción de hidrógeno para formar una corriente de producto de hidrógeno resultante en o por debajo de una norma de pureza del producto. Las patentes US-8425149 y US-8757926 mantienen una cantidad mínima de hidrógeno almacenado dentro de la caverna de sal para crear una capa estacionaria que tiene dióxido de carbono contenida en la misma. Una parte del hidrógeno almacenado se extrae de la caverna de sal sin perturbar la capa estacionaria para evitar que la contaminación de dióxido de carbono se extraiga hacia la corriente de hidrógeno almacenado, permitiendo de esta forma que la corriente de hidrógeno almacenado se reintroduzca en la conducción de hidrógeno sin eliminar el dióxido de carbono. Estos métodos divulgados en la publicación de patente US-2013/0213.479 y en las patentes US-7078011; US-8425149; y US-8757926 requieren etapas de procesamiento adicionales, que pueden agregar complejidad a la red de flujo de hidrógeno que está en comunicación con la caverna de sal, así como un aumento potencial en los gastos de capital y de funcionamiento.

Adicionalmente, la capacidad para utilizar una caverna de sal para ayudar en el suministro de hidrógeno de pureza superior sin fugas a través de las paredes de la caverna de sal es difícil debido a las propiedades del hidrógeno. El hidrógeno es el elemento más pequeño y ligero de la tabla periódica de los elementos, teniendo mediciones del radio atómico de 25 pm +/- 5 pm. Por consiguiente, el hidrógeno de pureza superior se considera, de forma típica, uno de los elementos más difíciles de contener dentro de las formaciones salinas subterráneas sin pérdidas mensurables a través de las paredes de la caverna de sal. Por ejemplo, el almacenamiento de grandes cantidades (p. ej., mayor de 2,8 millones de metros cúbicos estándar (100 millones de pies cúbicos estándar) de hidrógeno gaseoso puro (p. ej., 99,99 %) en cavernas de sal subterráneas que consisten en una pureza de sal mínima de 75 % de halita (NaCl) o mayor sin pérdidas mensurables de hidrógeno almacenado de la caverna de sal puede suponer un desafío. Se han abordado métodos para contener hidrógeno dentro de una caverna de sal sin incurrir en fugas significativas. La patente US-8690476 crea una barrera de permeación a lo largo de las paredes de la caverna que permite almacenar en su interior hidrógeno de alta pureza. La publicación de patente US-2014/0161533 divulga la monitorización y la regulación de la presión del hidrógeno almacenado en la caverna de sal entre un límite inferior predeterminado y un límite superior predeterminado.

Como se analizará, entre otras ventajas de la presente invención, se describe un método y sistema mejorados para tratar el hidrógeno que se va a almacenar en una caverna de sal y el suministro desde la misma.

Sumario de la invención

La invención es un método para tratar un producto de hidrógeno que contiene humedad que se va a almacenar en una caverna de sal como se define en la reivindicación 1.

Breve descripción de los dibujos

Los objetivos y ventajas de la invención se comprenderán mejor a partir de la siguiente descripción detallada de las realizaciones preferidas de la misma en relación con las figuras adjuntas, en donde los números indican las mismas características en toda la descripción y en donde:

La Figura 1 muestra un esquema fragmentario incompleto de un protocolo para introducir y almacenar hidrógeno enfriado en una caverna de sal que incorpora los principios de la invención;

la Figura 2a es una vista lateral en despiece de las paredes de la caverna de sal y muestra una liberación representativa de los contaminantes desde las paredes hacia la cavidad salina cuando el hidrógeno almacenado no se ha enfriado;

la Figura 2b es una vista lateral en despiece de las paredes de la caverna de sal y muestra una liberación representativa de los contaminantes desde las paredes hacia la cavidad salina cuando el hidrógeno almacenado se ha enfriado hasta una temperatura comprendida en un intervalo de 21,1 a 47,2 °C (70 °F a 117 °F) antes de su introducción en la cavidad salina;

la Figura 2c es una vista lateral en despiece de las paredes de la caverna de sal y muestra una liberación representativa de los contaminantes hacia la cavidad salina cuando el hidrógeno almacenado se ha enfriado hasta una temperatura menor de 21,1 °C (70 °F) pero por encima de su temperatura de condensación, antes de su introducción en la cavidad salina; y

la Figura 3 muestra un gradiente geotérmico representativo en función de la profundidad de la caverna.

Descripción detallada de la invención

Tal como se utiliza en la presente memoria, todas las concentraciones se expresan en porcentajes volumétricos. La descripción se expone en la presente memoria en diversas realizaciones y con referencia a diversos aspectos y características de la invención. La descripción detallada contempla dichas características, aspectos y realizaciones en diversas permutaciones y combinaciones, como dentro del ámbito de la descripción. Por lo tanto, la descripción puede especificarse como que comprende, consiste o consiste esencialmente en, cualquiera de dichas combinaciones y permutaciones de estas características, aspectos y realizaciones específicas, o una o unas seleccionadas de las mismas.

Deberá entenderse que el término “suprime”, como se utiliza en la presente memoria, significa una reducción, inhibición o retraso en el inicio de la infiltración por uno o más contaminantes liberados desde las paredes salinas hacia la cavidad interior de la caverna de sal. Deberá entenderse que el término “enfriado intenso”, como se utiliza en la presente memoria, significa un enfriamiento del producto de hidrógeno extraído de una conducción de hidrógeno en el que el enfriamiento se produce antes de su introducción en una caverna de sal; o un enfriamiento de una corriente de hidrógeno que se extrae de una caverna de sal; o una combinación de un enfriamiento del producto de hidrógeno antes de su introducción en la caverna de sal y extracción de al menos una parte del hidrógeno almacenado de la caverna de sal en forma de una corriente de hidrógeno. La expresión “enfriado intenso” y el término “enfriado”, como se utilizan en la presente memoria, se utilizan indistintamente y se pretende que tengan el mismo significado. La expresión “hidrógeno en bruto” pretende referirse a uno o más de los contaminantes contenidos dentro de una caverna de sal que se infiltran a través de las paredes de la caverna de sal hacia el hidrógeno almacenado hasta un grado en el que se puede necesitar una purificación

posterior antes de su devolución a una conducción de hidrógeno para adquirir un nivel de pureza de hidrógeno en o por debajo de una especificación de pureza del producto. El término “condensado”, como se utiliza en la presente memoria, significa vapor de agua licuado y, opcionalmente, uno o más contaminantes adicionales contenidos dentro de una conducción de hidrógeno, red de flujo o formación de caverna salina, incluidos aunque no de forma limitativa, hidrocarburos, dióxido de carbono o compuestos que contienen azufre, que experimentan condensación.

Deberá entenderse que la presente invención, como se describirá en el presente documento, es de aplicación a cualquier tipo de caverna de almacenamiento subterráneo que se utiliza para el almacenamiento de gases, preferentemente hidrógeno. Los ejemplos de cavernas subterráneas para el almacenamiento de hidrógeno incluyen instalaciones geológicas para almacenamiento tales como cavernas de roca dura revestidas, depósitos de gas/petróleo agotados, acuíferos y cuencas sedimentarias. En una realización preferida, como se describirá en la presente descripción, la caverna subterránea para el almacenamiento de hidrógeno es una formación de caverna salina.

Como es conocido en la técnica, la caverna 3 de sal se forma mediante minería en solución en la que el agua se inyecta a través de un conducto conocido como cadena 10 de salmuera (Figura 1). El agua disuelve la sal para formar una solución de salmuera. La solución de salmuera durante la minería en solución retorna a través del espacio anular (no se muestra) formado por la tubería 12 de revestimiento del pozo final u otro conducto entre la pared interna de la tubería 12 de revestimiento del pozo final y la pared externa de la cadena 10 de salmuera. Después de completar la operación de minería en solución, la salmuera residual de la caverna 3 de sal se puede retirar mediante la cadena 10 de salmuera por desplazamiento de presión resultado de la inyección de hidrógeno a través de la tubería final 12 y otro conducto. Una vez que el nivel de salmuera alcanza la parte inferior de la cadena 10 de salmuera, una sección superior de la cadena 10 de salmuera se sella mediante la válvula 216 y una capa 201 de salmuera residual, también conocido como sumidero de salmuera, puede permanecer en la caverna 3 de sal en la parte 207 inferior de la caverna 3 de sal. La caverna 3 de sal resultante queda definida, al menos en parte, por una región o cavidad interior que está limitada por las paredes 203 de la caverna de sal.

Las paredes 203 de la caverna de sal de la caverna 3 de sal consisten en roca, sal o halita que tiende a depositarse en capas gruesas con el tiempo. Las capas depositadas quedan gradualmente cubiertas y enterradas por escombros de sedimentos. El peso o la presión de dichos escombros de sedimentos hace que las formaciones de sal formen estructuras densificadas y estratificadas, que tienen a experimentar deslizamiento o deformación visco plásticos, que puede llevar a la formación de microgrietas. El deslizamiento o deformación visco plásticos hace que los granos de las paredes 203 de la caverna de sal tengan una porosidad intrínseca. Dependiendo de la configuración estructural y de las propiedades de las paredes 203 de la caverna de sal, porciones localizadas de las paredes 203 de la caverna de sal pueden contener porosidades intrínsecas lo suficientemente grandes para que los contaminantes contenidos en las mismas pasen a su través y entren dentro de la cavidad interior de la caverna 3 de sal donde se mantiene el hidrógeno 4 almacenado. El resultado es una contaminación potencial de hidrógeno 4 almacenado de tal forma que se puede formar una corriente 21 de hidrógeno en bruto, que puede necesitar la posterior purificación o dilución antes de su introducción en la conducción 2 de producto de hidrógeno. Se contemplan diversos contaminantes que incluyen, a modo de ejemplo y sin pretender que sea una limitación, agua, vapor, dióxido de carbono, compuestos que contienen azufre o moléculas de hidrocarburos (p. ej., hidrocarburos ligeros tales como el metano).

A diferencia de las técnicas anteriores que han implementado la purificación o dilución de la corriente 21 de hidrógeno en bruto tras su retirada de la caverna 3 de sal, un aspecto de la presente invención ofrece un novedoso abordaje para suprimir la contaminación del hidrógeno 4 almacenado dentro de la caverna 3 de sal. En particular, la presente invención ha descubierto que un enfriamiento adecuado de una corriente 11 de producto de hidrógeno comprimido (Figura 1) antes de su introducción dentro de la caverna 3 de sal suprime el inicio de las infiltraciones de uno o más de los contaminantes procedentes de las paredes 203 de la caverna de sal hacia la cavidad interior de la caverna 3. El enfriamiento de la corriente 11 de producto de hidrógeno comprimido permite una eliminación selectiva de al menos el vapor de agua por enfriamiento de la corriente 11 de producto de hidrógeno comprimido hasta una temperatura a la cual el vapor de agua condensa a partir de la corriente 11 de gas comprimido (es decir, en o por debajo del punto de rocío del agua en la corriente 11 de gas comprimido) manteniendo al mismo tiempo el hidrógeno en la fase gaseosa. La eliminación del vapor de agua condensado crea una corriente de hidrógeno 16 enfriado y comprimido (Figura 1). De esta forma, se puede introducir una corriente de hidrógeno 16 suficientemente seco dentro de la caverna 3 de sal que tiene mayor capacidad de absorber cualquier vapor de agua contenido dentro de la caverna 3 de sal o las paredes 203 de sal de la misma, de forma que la cantidad de vapor de agua necesario a eliminar posteriormente tras la retirada del hidrógeno 4 almacenado de la caverna 3 como corriente 21 queda totalmente eliminado o sustancialmente reducido. Se deberá entender que el resto de contaminantes, si están presentes, también se pueden eliminar mediante enfriamiento de la corriente 11 de producto de hidrógeno comprimido hasta sus respectivas temperaturas de condensación.

Según una realización de la presente invención y con referencia específica a la Figura 1, se ilustra una instalación 1 para el almacenamiento y procesamiento de hidrógeno que está diseñada para retirar el producto 13 de hidrógeno desde una conducción 2 de hidrógeno durante periodos de baja demanda del cliente, comprimir el producto 13 de hidrógeno para formar un producto 11 de hidrógeno comprimido, enfriar el producto 11 de hidrógeno comprimido para formar un producto 16 de hidrógeno comprimido y enfriado y después introducir el e producto 16 de hidrógeno comprimido y enfriado dentro de la caverna 3 de sal como hidrógeno 4 almacenado. El enfriamiento se produce en un enfriador 35 donde la temperatura del producto 13 de hidrógeno comprimido es lo suficientemente reducida como

para condensar al menos una parte del vapor de agua contenido en el producto 11 de hidrógeno comprimido. El vapor de agua condensa y posteriormente se recoge como condensado en el separador 36 líquido-vapor.

5 Cuando baja la demanda que tienen los clientes de hidrógeno, suministrado mediante la conducción 2 de hidrógeno, o por cualquier motivo, la producción supera la demanda, la corriente de hidrógeno 13 se puede retirar de la conducción 2 de hidrógeno o, alternativamente, recibirse de otra instalación de producción o fuente de almacenamiento de hidrógeno (no se muestra) e introducirse dentro de la caverna 3 de sal. "Conducción de hidrógeno" o "conducción de producto de hidrógeno", como se utiliza en la presente memoria, pretende referirse a cualquier conducto o paso que se extiende entre la caverna 3 de sal y la instalación de producción o fuente de almacenamiento de hidrógeno. A este respecto, en referencia a la Figura 1, la válvula 24 se abre para permitir que una parte del producto de hidrógeno de la conducción 2 entre en la rama "A" de la red de flujo 5 en forma de una corriente 13 de producto de hidrógeno. Como se utiliza en la presente memoria y en las reivindicaciones, el término "rama" significa rutas de flujo dentro de la red de flujo 5 que está formada por conductos adecuados. Dichos conductos se colocarán para conducir el flujo de las corrientes de hidrógeno dentro de la red de flujo 5 como se ilustra en la Figura 1. La válvula 14 de derivación se coloca en una posición cerrada, la válvula 15 se coloca en posición abierta, las válvulas 20, 37 y 50 se cierran y la válvula 303, que puede dirigir salmuera hacia y desde un estanque de salmuera por una línea de retorno de salmuera, se coloca en una posición cerrada. La corriente 13 de hidrógeno se comprime en un compresor 7 de hidrógeno para producir una corriente 11 de hidrógeno comprimido. El compresor 7 de hidrógeno puede ser cualquier compresor conocido utilizado en la técnica y es, típicamente, un compresor que tiene un pistón de movimiento alternante. La cantidad de compresión será al menos parcialmente dependiente de la presión del hidrógeno 4 almacenado en la caverna 3 de sal. En una realización preferida, el compresor 7 de hidrógeno incorpora una primera etapa 8 y una segunda etapa 9 en serie con un enfriamiento intermedio entre las etapas y un enfriador posterior 10, que se utiliza preferiblemente para eliminar el calor de compresión. En un ejemplo, el enfriador posterior 10 es un intercambiador de calor de carcasa y tubos u otro intercambiador de calor convencional mediante el cual el calor de compresión de la corriente 11 de hidrógeno comprimido se elimina mediante intercambiado cruzado entre la corriente de hidrógeno 11 con un refrigerante, tal como agua enfriada u otro refrigerante enfriado adecuado.

Tras eliminar el calor de compresión, la corriente 11 de hidrógeno comprimido entra en un enfriador 35 para bajar lo suficiente la temperatura de la corriente 11 como para que se condense al menos una parte del vapor de agua. La unidad 35 de enfriado puede ser cualquier enfriador convencional conocido en la técnica, incluidos un enfriador por absorción o un enfriador de vapor. En términos generales, el enfriador tiene varios componentes que incluyen un compresor, evaporador y un condensador. Los componentes se comercializan como parte de una unidad de enfriamiento convencional para realizar un ciclo de compresión de vapor en una sola etapa. Cada uno de los componentes está diseñado y específicamente configurado para procesar un refrigerante adecuado que circula a través de los componentes como parte del ciclo de enfriamiento. La ilustración de la unidad 35 de enfriamiento de la Figura 1 se ha simplificado omitiendo diversos componentes para transmitir y describir mejor el proceso de la presente invención. La unidad 35 de enfriamiento realiza un ciclo de enfriamiento en condiciones tales que el refrigerante de la fase líquida experimenta un cambio de fase a la fase gaseosa mediante un evaporador. A medida que el refrigerante líquido pasa por los serpentines o tubos del evaporador, absorbe calor del vapor de agua contenido en la corriente 11 de hidrógeno comprimido, enfriando de esta forma al menos una parte del vapor de agua hasta una temperatura suficiente para que se produzca su condensación. En una realización, la corriente 11 de hidrógeno comprimido reduce su temperatura a menos de aproximadamente 93,3 °C (200 °F) pero más que la temperatura de licuefacción del hidrógeno, o preferiblemente en un intervalo comprendido entre 21,1 y 47,2 °C (70 °F y 117 °F) o más preferiblemente menor de aproximadamente 47,2 °C (70 °F) pero mayor que la temperatura de licuefacción del hidrógeno. Alternativamente, la corriente 11 de hidrógeno comprimido se puede enfriar hasta una temperatura que permite condensar una parte de uno o más contaminantes adicionales de la corriente 11 de hidrógeno comprimido. El calor extraído se arrastra por el gas refrigerante del evaporador en forma de un gas a baja presión a través de un conducto, tal como una manga o línea, hacia la parte baja del compresor de la unidad 35 de enfriamiento.

El gas refrigerante se comprime a continuación mediante el compresor de la unidad 35 de enfriamiento hasta un vapor supercalentado que tiene una temperatura y presión a la cual se puede enfriar en el condensador. El vapor supercalentado se dirige al condensador donde se reduce hasta una baja presión para convertir el gas refrigerado en un líquido refrigerado, que está disponible para enfriar más la corriente 11 de hidrógeno comprimido y condensar el vapor de agua y el resto de posibles contaminantes. Antes de introducirse en el evaporador, el líquido refrigerante puede pasar a través de una válvula de expansión que evapora parcialmente de forma súbita una porción del líquido para producir una mezcla refrigerante de líquido y vapor para garantizar que el refrigerante alcanza una temperatura que es más fría que la temperatura de la humedad y/o del resto de contaminantes a condensar. Este ciclo de compresión de vapor puede repetirse según sea necesario para disminuir la temperatura de la corriente 11 de hidrógeno comprimido.

El nivel de enfriamiento necesario para condensar la humedad se basará, al menos en parte, en el punto de rocío del agua en el hidrógeno. El punto de rocío del agua dependerá de diversos factores entre los que se incluyen el contenido de humedad de la conducción y la presión de la corriente 11 de hidrógeno comprimido. Por ejemplo, a 19,9 MPa (2000 psig) y 10 ppmv de agua, el punto de rocío es de aproximadamente 28,9 °C (-20 °F). A 19,9 MPa (2000 psig) y 1 ppmv de agua, el punto de rocío del agua es de aproximadamente -123,3 °C (-190 °F). Se deberá entender que la presente invención se puede llevar a cabo con cualquier nivel de humedad contenido en la corriente de hidrógeno 11. En un ejemplo, el nivel de humedad es del 1 % o menos. En otra realización, el nivel de humedad es de 1000 ppm o menos.

Aún en referencia a la Figura 1, el condensado entra en un separador 36 de vapor líquido donde se separa y se extrae de la corriente 11 de hidrógeno comprimido. Se puede utilizar cualquier tipo de separador de vapor líquido adecuado. Por ejemplo, se puede utilizar un sistema de coalescencia comercial mediante el cual las gotículas de condensado entran en una carcasa y fluyen a través de una matriz de medio filtrante, pasando de dentro hacia afuera o viceversa. Tras la coalescencia, el condensado se une o se aglomera en gotículas más grandes a medida que pasan por la una o más capas de matriz de medio filtrante del sistema de coalescencia. Tras atravesar la una o más capas de la matriz de medio filtrante, las gotículas más grandes se separan de la corriente 11 de hidrógeno comprimido por gravedad. La corriente 11 de hidrógeno comprimido sale de la carcasa del sistema de coalescencia a través de un puerto de salida que preferiblemente está sustancialmente desprovisto de condensado contaminante. Una corriente 16 de hidrógeno suficientemente enfriado y comprimido que está suficientemente seco se puede introducir ahora en la caverna 3 de sal.

A este respecto, la corriente 16 de hidrógeno enfriado y comprimido sigue fluyendo a través de la primera rama "A". Después de eso, la corriente 16 de hidrógeno enfriado y comprimido entra en la tubería de revestimiento del pozo o conducto 12 (Figura 1), que está conectado a un conjunto 202 de cabezal de transferencia del pozo, y posteriormente dentro de una zona de flujo anular (no se muestra) dentro de la tubería 12 de revestimiento del pozo (entre el interior de la tubería 12 del pozo final y la cadena 10 de salmuera) desde la que la corriente 16 de alimentación de hidrógeno enfriado y comprimido entra en la caverna 3 de sal. Se puede usar un orificio 17 de medición de caudal, un transmisor 18 de presión y un transmisor 19 de temperatura para determinar la cantidad de corriente 16 de hidrógeno comprimido que se introduce en la caverna 3 de sal.

En referencia a la Figura 1, la corriente 16 de hidrógeno enfriado y comprimido entra en la caverna 3 de sal para formar hidrógeno 4 almacenado en un estado enfriado o muy frío. El hidrógeno 4 almacenado presenta propiedades refrigerantes que la presente invención reconoce que se pueden utilizar para enfriar las paredes 203 de la caverna de sal. Al menos una parte del hidrógeno 4 almacenado y enfriado se pone en contacto con una parte localizada de las paredes 203 de la caverna de sal cuyo calor se extrae para reducir su temperatura. Como se explicará con referencia a las Figuras 2B y 2C, la una o más capas 204 de la porción localizada de las paredes 203 alcanza un estado estabilizado mediante el cual se suprime la liberación de contaminantes desde las paredes 203.

Las Figuras 2A-2C muestran una región o sección localizada de las paredes 203 de la caverna 3 de sal de la Figura 1. Las paredes 203 de la caverna 3 de sal se pueden caracterizar por una o más capas 204 que están estratificadas. El hidrógeno 4 almacenado y enfriado absorbe calor desde al menos una parte de las capas 204, reduciendo de esta forma la temperatura de la una o más capas 204. La reducción de temperatura suprime la infiltración de contaminantes hacia el hidrógeno 4 almacenado.

La temperatura de la una o más capas 204 es lo suficientemente reducida como para que esto pueda suponer una restricción. La restricción se puede producir en un punto donde algunas regiones localizadas de las paredes 203 adquieren una porosidad intrínseca entre las capas que tienen un tamaño demasiado pequeño para que contaminantes tales como los hidrocarburos, vapor de agua y dióxido de carbono se infiltren a su través. Alternativamente, o como adición a lo anterior, el deslizamiento viscoplástico de las capas 204 se reduce después de su enfriamiento mediante el hidrógeno 4 gaseoso almacenado enfriado de forma que se suprime el movimiento relativo de las capas 204. Se produce menos movimientos de las capas 204, lo que se puede traducir en menor liberación de contaminantes desde las capas 204 al interior de la caverna 3 de sal. La reducción en el movimiento puede hacer que una parte sustancial de los contaminantes quede atrapado entre las mismas.

El fenómeno por el cual el hidrógeno 4 almacenado enfriado puede suprimir la liberación de contaminantes se explicará junto con las Figuras 2A-2C. Cada una de las Figuras 2A-2C representa una porción de la vista en despiece lateral de la pared 203 de la caverna de sal que abarca una profundidad de la caverna en particular. La profundidad de la caverna, designada como "d", se muestra como creciente en la dirección de la flecha vertical descendente. Para la comparación, se pretende que las Figuras 2A, 2B y 2C muestren una vista lateral de las paredes 203 de sal junto con el mismo intervalo de profundidad de la caverna, d. La Figura 2A pretende mostrar una cantidad representativa de los contaminantes contenidos en la caverna 3 cuando el hidrógeno 4 almacenado no enfriado se ha introducido en la misma. Las Figuras 2B y 2C pretenden mostrar una cantidad representativa de los contaminantes contenidos en la caverna 3 después de haberse aplicado diferentes grados de enfriamiento a las paredes 203 de la caverna cuando el hidrógeno 4 almacenado y enfriado se ha introducido en la misma. Así, cada una de las Figuras 2A-C representa un escenario diferente que se produce dependiendo de si el hidrógeno 4 almacenado se ha enfriado antes de introducirse dentro de la caverna 3 de sal. La presencia de líneas representa la pared 203 de la caverna de sal como una serie de capas 204 individuales que están estratificadas. Aunque se muestran como líneas continuas, deberá entenderse que cada capa 204 contiene cierto grado de porosidad que se puede alterar, al menos en parte, tras el contacto con el hidrógeno 4 almacenado y enfriado, y el grado de enfriamiento recibido por las paredes 203 de la caverna de sal mediante el hidrógeno 4 almacenado y enfriado. Sin embargo, por claridad e ilustración de los principios de la presente invención, las paredes 203 de la caverna de sal se han mostrado intencionalmente simplificadas con la omisión de algunos rasgos y detalles estructurales. El número de líneas curvas pretende mostrar el grado de movimiento de las capas 204. A este respecto, la Figura 2A pretende indicar más movimiento de las capas 204 que la Figura 2B. Análogamente, la Figura 2B pretende indicar más movimiento de las capas 204 que la Figura 2C.

Se utiliza una leyenda con las diferentes formas para representar los diversos tipos de contaminantes dentro de la caverna 3 de sal. Se deberá entender que esta leyenda no es una lista exhaustiva de todos los posibles contaminantes que pueden aparecer durante el almacenamiento del hidrógeno 4 en la caverna 3 de sal. Adicionalmente, los tamaños relativos de los diferentes contaminantes no se muestran a escala.

La Figura 2A representa un caso inicial en el que el hidrógeno 4 almacenado no se ha enfriado después de la compresión. Como resultado, el hidrógeno 4 almacenado resultante puede tener una temperatura que está bastante por encima de 47,2 °C (117 °F). No se produce enfriamiento de las paredes 203 de sal. Como resultado, las paredes 203 de la caverna de sal se muestran como inestables. Específicamente, se puede producir el movimiento de una o más capas 204 unas respecto a otras por un mecanismo tal como el deslizamiento viscoplastico que induce la liberación de los contaminante a través de las capas 204 hacia la caverna 3. Para ilustrar este concepto. La Figura 2A muestra una molécula de metano, diseñada de forma circular, atrapada dentro de una de las capas 204 que puede atravesar la porosidad que aumenta como resultado del movimiento relativo de las capas 204. La flecha discontinua designada "L" pretende mostrar la ruta de migración de la molécula de metano a través de los poros agrandados de las capas 204 hacia la cavidad interior de la caverna 3. Los poros agrandados son lo suficientemente grandes para que el metano pase a su través. Las moléculas a la derecha de la pared 203 de la caverna de sal representan el número total de contaminantes que se han filtrado a través de las capas 204 a una profundidad de la caverna en concreto una vez que el hidrógeno 4 almacenado se ha inyectado dentro de la caverna 3.

Similarmente, las moléculas de dióxido de carbono diseñadas con forma rectangular también pueden migrar a través de las capas 204 y hacia la cavidad interior de la caverna 3. La Figura 2A muestra tres moléculas de dióxido de carbono atrapadas dentro de las capas 204. La migración de las moléculas de dióxido de carbono a través de las capas 204 (diseñadas con las flechas punteadas "H", "I" y "J") se puede inducir mediante poros agrandados que se crean tras el movimiento de las capas individuales 204. El movimiento de las capas 204 hace que las moléculas de metano atrapadas se liberen o se desplacen y después migren a través de los poros agrandados de las capas 204 hacia la cavidad interior de la caverna 3.

Adicionalmente, la temperatura de la caverna 3 de sal puede aumentar como resultado de la introducción de hidrógeno. El hidrógeno, debido a su coeficiente de Joule Thompson negativo, puede aumentar la temperatura de la caverna 3 tras su expansión hacia la región interna de la caverna 3. El aumento de la temperatura puede producir choque o tensiones térmicas. Las tensiones térmicas pueden inducir fracturas y grietas a lo largo de las capas de las paredes 203 de la caverna de sal que pueden inducir poros de nueva creación para que los contaminantes pasen a su través y/o agrandar poros existentes. A este respecto, otra molécula de dióxido de carbono que se muestra situada dentro de la parte interna de las paredes 203 de la caverna 3 de sal migra a través de los poros agrandados que se pueden crear como resultado de las fracturas y grietas inducidas por tensiones. La molécula de dióxido de carbono se filtra a través de las capas 204 como se muestra mediante la flecha discontinua designada "K". La porosidad de las fracturas puede proporcionar permeabilidad suficiente para que el contaminante se desplace y se libere hacia la región interior de la caverna 3. La Figura 2B muestra el hidrógeno 4 almacenado que se ha enfriado moderadamente antes de su introducción dentro de la caverna 3. El enfriamiento, como se ha descrito en la presente memoria, se realiza para disminuir la temperatura de la corriente 16 de hidrógeno comprimido hasta un intervalo de 21,1 °C a 47,2 °C (70 °F a 117 °F). Se espera que se produzca el enfriamiento de al menos una parte de las paredes 203 de sal, creando de esta forma paredes 203 de la caverna de sal que restringen y consiguen menos movimiento de sus capas individuales con respecto al de la Figura 2A. Como puede observarse, en la Figura 2B se ha producido menos infiltración del contaminante global tras el enfriamiento en comparación con la Figura 2A. El número total de contaminantes globales mostrado en la Figura 2B dentro de la cavidad interior de la caverna 3 de sal es menor que el de la Figura 2A.

Las capas 204 de las paredes 203 de la caverna de sal son menos susceptibles al movimiento y, por tanto, tienen tendencia a presentar un movimiento suave en comparación con la Figura 2A. A este respecto, la Figura 2B muestra una molécula de dióxido de carbono que atraviesa los poros de las capas individuales 204 de las paredes 203 de la caverna de sal que tienen una ruta de migración designada "M". Sin embargo, las capas 204 situadas más cerca del hidrógeno 4 almacenado y enfriado presentan mayores efectos de enfriamiento que las capas 204 que se extienden más lejos del hidrógeno 4 almacenado y enfriado. Las capas 204 refrigerantes pueden experimentar menos movimiento que las capas 204 que se extienden más lejos del hidrógeno 4 almacenado y enfriado. Como resultado, el grado de restricción y la porosidad resultante asociada con estas capas 204 puede ser demasiado pequeño para que la molécula de dióxido de carbono continúe su migración. La molécula de dióxido de carbono puede quedar atrapada entre las capas 204 como se muestra mediante la flecha desviada de la Figura 2B designada "M".

Otras regiones localizadas de las capas 204 de la Figura 2B pueden ser más susceptibles al movimiento de las capas a medida que el hidrógeno 4 almacenado y enfriado ocupa y presuriza la cavidad interior de la caverna 3. Esto se puede atribuir como resultado de que las capas 204 de una región localizada en particular tengan una formación geológica intrínseca con mayor porosidad o fracturas más intensamente agrietadas que potencialmente pueden causar fisuras agrietadas. Alternativamente, o además de esto, las regiones localizadas pueden conseguir menos enfriamiento como resultado de estar situadas a mayor profundidad en la caverna, mediante lo cual, la temperatura de la caverna aumenta al aumentar la profundidad de la caverna (Figura 3), en virtud de l gradiente geotérmico creado por el propio planeta. El resultado neto es potencialmente mayor inestabilidad en esta región dentro de la caverna 3 donde una molécula de dióxido de carbono a la mayor profundidad de la caverna "d" puede atravesar las capas 204 y hacia la cavidad interior de la

caverna 3 de sal, como se muestra mediante la flecha discontinua designada "N" asociada con la ruta de migración del dióxido de carbono que atraviesa totalmente las capas 204 de la pared 203 de la caverna hacia la cavidad interior de la caverna 3 de sal. Similarmente, una molécula de metano a la mayor profundidad de la caverna puede atravesar las capas 204 y hacia el interior de la caverna 3, como se muestra mediante la flecha discontinua designada "O".

La Figura 2C muestra el hidrógeno 4 almacenado que se ha enfriado antes de su inyección dentro de la caverna 3. Se realiza el enfriamiento tal como se ha descrito para disminuir la temperatura de la corriente 16 de hidrógeno comprimido hasta un intervalo muy por debajo de 21,1 °C (70 °F) pero por encima de la temperatura de licuefacción del hidrógeno. En comparación con la Figura 2B, se espera que se produzca una mayor cantidad de enfriamiento de las paredes 203 de sal, creando de esta forma paredes 203 de la caverna de sal que experimentan más limitación y quedan en el estado limitado durante un periodo de tiempo más prolongado. Como resultado, las paredes 203 consiguen menor movimiento de sus capas individuales 204 durante un periodo de tiempo más prolongado, como se muestra por el menor número de líneas en la Figura 2C. A este respecto, la Figura 2C muestra una molécula de dióxido de carbono y una molécula de metano atrapado sin ninguna tendencia a desalojarse o migrar a través de las capas 204. El número total de contaminantes globales mostrado en la Figura 2C dentro de la cavidad interior de la caverna 3 de sal es menor que el de la Figura 2B como resultado de menos infiltración global de los contaminantes que se produce tras el enfriamiento de la Figura 2C en comparación con la Figura 2B. Las capas 204 de la Figura 2C representan regiones de porosidad sustancialmente reducida debido a su mayor enfriamiento en comparación con la Figura 2B. La porosidad reducida a lo largo de las regiones de las paredes 203 de sal también se puede producir en un grado en el que el confinamiento de las moléculas del hidrógeno 4 almacenado dentro de la caverna 3 se consigue sin fugas notables a través de las paredes 203 de la caverna de sal.

Aunque se ha producido una reducción notable de las infiltraciones de contaminantes, se puede seguir produciendo cierta infiltración de contaminantes hacia la cavidad interior de la caverna 3 de sal, como se muestra por la presencia de contaminantes a la derecha de la pared 203 de la caverna de sal en la Figura 2C. Sin embargo, la presente invención ofrece la capacidad de reducir sustancialmente la velocidad y la cantidad global de infiltración de contaminantes mediante enfriamiento de al menos una parte de las paredes 203 de la caverna de sal. Se deberá indicar que la cantidad exacta de calor que debe absorber el hidrógeno 4 almacenado enfriado de las paredes 203 de la caverna de sal puede variar por numerosos factores entre los que se incluyen la configuración específica de las capas individuales 204 de las paredes 203 de la caverna de sal, tales como la composición de sal y el grado de estratificación de las capas 204 y la tendencia de las capas a experimentar movimiento en respuesta a, por ejemplo, el desplazamiento viscoplastico y los cambios en la temperatura.

La Figura 2A indica que, en ausencia de enfriamiento, el hidrógeno 16 comprimido que se introduce en la caverna 3 de sal puede aumentar la temperatura de la caverna 3 como resultado del coeficiente de Joule Thompson negativo (es decir, la temperatura aumenta tras la expansión del hidrógeno) del hidrógeno. Los cambios de temperatura se intensifican cuando se tiene en cuenta que el gradiente geotérmico natural tiene tendencia a aumentar linealmente en función de la mayor profundidad de la caverna (Figura 3). La presente invención reconoce que dichos cambios de temperatura pueden tener un efecto perjudicial sobre la estabilidad de la caverna. La sal tiene un coeficiente de expansión térmica varios factores mayor que el de la mayoría de las rocas, por tanto, los cambios de temperatura en la caverna de sal pueden imponer aumentos de las tensiones de tracción debido a dicha expansión térmica. El choque o tensiones térmicas que se generan pueden inducir fracturas y grietas a lo largo de las capas de las paredes de la caverna de sal que pueden inducir poros de nueva creación para que los contaminantes pasen a su través. En consecuencia, la inyección de hidrógeno dentro de la caverna 3 sin enfriamiento puede disminuir la estabilidad de la caverna.

Las Figuras 2B y C indican que, dependiendo del grado de enfriamiento, la una o más capas 204 de las paredes 203 de la caverna de sal pueden experimentar un menor movimiento relativo entre las misma como una forma de reducir el tamaño de los poros de forma que al menos parte de los contaminantes no puedan migrar a su través y liberarse dentro de la cavidad interior de la caverna 3 para contaminar el hidrógeno 4 almacenado. Además, el estado limitado de las capas enfriadas 204 hace que los contaminantes queden atrapados entre las mismas.

La eficacia del enfriamiento se puede evaluar con mediciones de la temperatura. La colocación de medidores de temperatura a diferentes profundidades dentro de la caverna 3 proporciona la capacidad de evaluar la suficiencia del enfriamiento. Medidores de temperatura en la parte inferior del foso que se extiende a través de la tubería de revestimiento del pozo o conducto 12 del conjunto de cabezal 202 del pozo de la caverna se pueden situar a varias profundidades de la caverna 3 para medir la temperatura del hidrógeno 4 almacenado. Varios medidores de temperatura en la parte inferior del foso se pueden extender a lo largo del conducto 12 y colocarse en una ubicación predeterminada dentro del hidrógeno 4 almacenado. Las mediciones de temperatura determinan si las paredes 203 de sal a una profundidad de la caverna en particular, d, se han enfriado lo suficiente mediante el hidrógeno 4 almacenado y enfriado. Alternativamente, los dispositivos de medición de temperatura en el cabezal del pozo, que se pueden situar dentro del conjunto de cabezal 202 del pozo se pueden utilizar para detectar la temperatura de la caverna 3. De esta forma, se pueden utilizar las mediciones de temperatura para ajustar el grado de enfriamiento de la corriente 11 de hidrógeno comprimido necesaria para transmitir el necesario enfriamiento a las paredes 203 de la caverna de sal antes de su introducción en la caverna 3. Adicionalmente, los medidores de temperatura se pueden utilizar para detectar fugas de hidrógeno sobre la base de cualquier cambio de temperatura en la caverna 3.

La caverna 3 se puede definir como una colección de zonas discretas en las que colocar selectivamente medidores de temperatura hacia la parte inferior del foso a profundidades crecientes dentro de la caverna 3 para obtener mediciones de temperatura en tiempo real dentro de las zonas. En su conjunto, las mediciones definen una distribución en tiempo real de la temperatura en la caverna 3. Por ejemplo, un medidor de temperatura a una profundidad específica de la caverna puede definir una zona en la caverna 3. Cada zona se extenderá por una profundidad predeterminada y tiene un medidor de temperatura colocado en la misma. Se deberá entender que se puede colocar más de un medidor de temperatura a la misma profundidad de la caverna para obtener una temperatura promedio de esa zona en particular. Una variación de temperatura detectada por un medidor de temperatura en particular dentro de cierta zona puede revelar fugas de una parte del hidrógeno 4 almacenado a través de las capas 204 (Figura 2A) en dicha zona como resultado del coeficiente de Joule Thompson negativo del hidrógeno. En respuesta a la variación de temperatura, la temperatura de salida del enfriador 35 se puede ajustar para aumentar el enfriamiento de la corriente 11 de hidrógeno comprimido. Se produce una corriente 16 de hidrógeno comprimido más frío que después se inyecta dentro de la caverna 3 para enfriar el hidrógeno 4 almacenado. La inyección de la corriente 16 de hidrógeno comprimido más frío puede continuar hasta que se produce una cantidad suficiente de enfriamiento en la zona específica que se ha detectado como susceptible a fugas del hidrógeno 4 almacenado. El enfriamiento estabiliza la zona hasta un grado en el que la estabilidad o la restricción de las capas 204 de la zona se consigue como se ha explicado en la Figura 2b y, con máxima preferencia, en la Figura 2c. Como resultado, la fuga del hidrógeno 4 almacenado en una zona en particular se reduce sustancialmente o se elimina (Figura 2B o 2C). De esta manera, la presente invención ofrece un método *in situ* para detectar fugas de hidrógeno 4 almacenado dentro de cierta zona de la caverna 3 y, posteriormente, en respuesta a dicha detección, un aumento en el enfriamiento del hidrógeno 4 almacenado y de las paredes 203 de la caverna 3 puede alcanzar estabilidad de la caverna y por tanto arreglar o reparar la caverna 3 en la zona específica.

De forma alternativa o adicional a lo anterior, se puede usar un banco 25 de analizadores para ayudar a detectar si la caverna 3 tiene una o más zonas susceptibles a fugas de hidrógeno detectando mediciones de concentraciones de contaminantes en la corriente 21 de hidrógeno en bruto que se extrae de la caverna 3 para determinar si es necesaria la extracción del contaminante. El banco 25 de analizadores mide el nivel de pureza de hidrógeno y la concentración de impurezas (p. ej., CH₄, CO₂, H₂O, H₂S, CO, N₂ y O₂) dentro de la corriente 21 de hidrógeno en bruto. El muestreo de la corriente 21 de hidrógeno en bruto pretende ser una medición representativa de la composición del hidrógeno y de cualesquiera contaminantes contenidos en el hidrógeno 4 almacenado. Alternativamente, una sonda analizadora (no se muestra) u otra instrumentación adecuada como es conocido en la técnica se puede introducir directamente en la tubería 12 de revestimiento del pozo para medir el nivel de pureza de hidrógeno y el resto de contaminantes del hidrógeno 4 almacenado dentro de la caverna 3 de sal. La medición de cualesquiera niveles de contaminante que superan una especificación de pureza del producto se puede eliminar dirigiendo la corriente 21 de hidrógeno en bruto a través del enfriador 35 y/o el separador líquido-vapor 36. Alternativamente, la corriente de hidrógeno 21 se puede devolver a la conducción 2 de hidrógeno sin dirigirlo a la unidad 35 de enfriamiento y/o al separador líquido-vapor 36 cuando las mediciones indican que cada uno de los niveles de contaminantes está en o por debajo de una especificación de pureza del producto.

Cuando el banco 25 de analizadores detecta que uno o más contaminantes superan una especificación de pureza del producto, se realiza un aumento en el enfriamiento de la corriente 11 de hidrógeno comprimido antes de su inyección en la caverna 3, y se realiza un aumento en el enfriamiento de la corriente 21 de hidrógeno en bruto que se extrae de la caverna 3 para reducir la concentración de contaminantes. Desde un punto de vista operativo, realizar el enfriamiento de la corriente 11 de hidrógeno comprimido antes de su inyección dentro de la caverna 3 y realizar el enfriamiento de la corriente 21 de hidrógeno en bruto tras su retirada de la caverna 3 puede ofrecer un método novedoso para garantizar que la concentración de contaminantes se puede disminuir y después mantenerse en o por debajo de una especificación de pureza del producto.

La presente invención reconoce que la eliminación del vapor de agua antes de introducir la corriente 16 de hidrógeno comprimido dentro de la caverna 3 de sal crea un hidrógeno 4 almacenado relativamente seco dentro del interior de la caverna 3 de sal que potencia las propiedades de enfriamiento del hidrógeno 4 almacenado y enfriado. A este respecto, la presencia de vapor de agua queda preferiblemente sustancialmente reducida o eliminada para evitar la degradación de las propiedades de enfriamiento del hidrógeno. Aún más, la reducción de vapor de agua también puede reducir el inicio de la fragilización debida al hidrógeno de la tubería 12 de revestimiento del pozo.

Otro beneficio potencial de la eliminación de vapor de agua antes de introducir la corriente 16 de hidrógeno comprimido dentro de la caverna 3 de sal es el aumento en la capacidad de absorción de vapor de agua del hidrógeno 4 almacenado y enfriado. El enfriamiento y eliminación del vapor de agua en forma de condensado antes de introducir la corriente 16 de hidrógeno comprimido y enfriado dentro de la caverna 3 de sal crea un hidrógeno 4 almacenado relativamente seco. Además del enfriamiento mejorado de las paredes 203 de la caverna de sal, el hidrógeno 4 almacenado y enfriado puede absorber más vapor de agua y seguir manteniendo la capacidad de permanecer en o por debajo de una especificación de pureza del producto de tal forma que la eliminación del vapor de agua no sea necesaria cuando se extraiga el hidrógeno almacenado. En la medida que el vapor de agua absorbido por el hidrógeno 4 almacenado supere la especificación de pureza del producto, se tendrá que eliminar menos vapor de agua en comparación con el hidrógeno que no se ha enfriado antes de su introducción dentro de la caverna 3. La necesidad de menos eliminación de vapor de agua puede disminuir los costes de capital y operativos asociados con el equipo de

purificación de la superficie. Por ejemplo, el dimensionamiento adecuado de los lechos adsorbentes de la presente invención potencialmente podría ser menor que el de las cavernas de almacenamiento convencionales, ya que se necesitaría retirar menos cantidad de vapor de agua (y potencialmente uno o más contaminantes) tras extraer el hidrógeno 4 almacenado de una caverna 3 de sal para conseguir una especificación de pureza del producto. En las cavernas de almacenamiento convencionales, la porosidad intrínseca de las paredes 203 de sal debido a la inestabilidad de la caverna puede contribuir a liberar y a la infiltración de una mayor cantidad de contaminantes desde las paredes 203 de sal hacia la cavidad interior de la caverna 3, necesitando de esta forma grandes unidades de purificación (p. ej., unidades de adsorción). En consecuencia, la presente invención ofrece una ventaja de proceso única con respecto a la cantidad de equipo de purificación de la superficie necesaria cuando el hidrógeno 4 almacenado se extrae de la caverna 3. Dicha ventaja de proceso se traduce en una instalación de procesamiento para almacenamiento de hidrógeno más económica, con respecto a instalaciones de almacenamiento de hidrógeno en una caverna de sal convencionales. De esta manera, la presente invención anticipa y planifica estratégicamente la intrusión de contaminantes desde una caverna 203 de sal permitiendo a la vez que el hidrógeno 4 almacenado y enfriado tenga mayor capacidad de adsorción de vapor de agua debido a entrar en la caverna 203 de sal en un estado más seco.

También se describe un proceso para enfriar la corriente 16 de hidrógeno comprimido, pero no en la medida en la que la humedad se condense. Las ventajas del enfriamiento para estabilizar una o más capas 204 de la porción localizada de las paredes 203 se pueden conseguir sin eliminar la humedad. A este respecto, se describe un proceso para enfriar la corriente 16 hasta una temperatura por encima del punto de rocío del agua antes de introducir la corriente 16 dentro de la caverna 3. El fenómeno que se explica en la Figura 2C tiene lugar, pero se produce en menor grado en comparación con una corriente 16 que se enfría hasta una temperatura inferior a su punto de rocío del agua.

Puede haber periodos en los que la demanda de producto de hidrógeno supera las capacidades de la conducción 2 de hidrógeno para suministrar producto de hidrógeno a los clientes. Por ejemplo, puede haber casos, cuando una instalación de generación de hidrógeno se pone fuera de línea o cuando la demanda de hidrógeno de los clientes supera las capacidades de producción disponibles. En dichos escenarios, al menos una parte del hidrógeno 4 almacenado y enfriado se puede eliminar de la caverna 3 de sal, y se reintroduce dentro de la conducción 2 de hidrógeno para ayudar a satisfacer la demanda de los clientes. Según los principios de la presente invención, el hidrógeno 4 almacenado y enfriado suprime la liberación de contaminantes de las paredes 203 de la caverna hasta un grado en el que la purificación del hidrógeno 4 ya no es necesaria tras su retirada de la caverna 3. Al menos una parte del hidrógeno 4 almacenado y enfriado de la caverna 3 se puede extraer y devolver a la conducción 2 de producto de hidrógeno. En referencia a la Figura 1, las válvulas 15, 37 y 50 se cierran y la válvula 20 se abre para permitir que al menos una parte del hidrógeno 4 almacenado y enfriado se descargue desde la caverna 3 como corriente de hidrógeno 21. Puesto que la presión del hidrógeno 4 almacenado y enfriado es mayor que la de la conducción 2 en este ejemplo particular, la corriente de hidrógeno 21 fluye fácilmente a través de la segunda rama "B" de la red de flujo 5. Cuando la cantidad adecuada del hidrógeno 4 almacenado y enfriado se ha extraído, la válvula 20 se cierra para aislar la caverna 3.

En una realización, el hidrógeno 4 almacenado (que se ha enfriado antes de su introducción dentro de la caverna 3) se puede extraer de la caverna 3 de sal y después purificarse antes de su introducción en la conducción 2 de hidrógeno. Dicho modo de operación se prefiere cuando contaminantes como la salmuera se arrastran junto con el hidrógeno 4 almacenado. Dependiendo de la presión y la temperatura, otros contaminantes se pueden disolver junto con la salmuera. Los contaminantes pueden incluir, aunque no de forma limitativa, dióxido de carbono, hidrocarburos (p. ej., metano), compuestos que contienen azufre y humedad. Se puede implementar cualquier equipo de purificación adecuado. En una realización, se utiliza un equipo de purificación en la superficie tales como un equipo de absorción por cambio de temperatura o por cambio de presión. En otra realización, el hidrógeno 4 almacenado se arrastra junto con la salmuera saturada y se extrae como una corriente 21 de hidrógeno en bruto y después se dirige al separador líquido-vapor 36 donde la salmuera saturada junto con los contaminantes disueltos en la misma se retiran de la corriente 21 de hidrógeno en bruto. En referencia a la Figura 1, la válvula 15 y 20 se cierran, la válvula 37 se abre y la válvula 50 se cierra. El hidrógeno 4 almacenado y enfriado con la salmuera saturada arrastrada junto con el anterior se retira como la corriente 21 de hidrógeno en bruto. La corriente 21 de hidrógeno en bruto fluye a través de una tercera rama de flujo "C" de la red de flujo 5. La corriente 21 de hidrógeno en bruto se dirige al separador líquido-vapor 36, que puede ser un sistema de coalescencia 36 líquido-vapor. Las gotículas de salmuera saturada con los contaminantes disueltos en la misma se unen y se aglomeran en gotículas más grandes a medida que pasan por la una o más capas de matriz de medio filtrante del sistema de coalescencia. Después de salir de la matriz del medio filtrante, la gravedad hace su efecto y las gotículas más grandes se retiran para producir una corriente de hidrógeno 39 que tiene contaminantes en o por debajo de una especificación de pureza del producto. La corriente de hidrógeno 39 fluye a través de una cuarta rama de flujo "D" de la red de flujo 5. La corriente entra en el recipiente 6 donde las posibles partículas de polvo o sal de roca se eliminan, y el producto de hidrógeno sale del recipiente 6 como la corriente 22, que está prácticamente exenta de cualquier residuo sólido. La corriente 22 fluye fácilmente a través de la segunda rama "B" de la red de flujo 5 y se exporta hacia la conducción 2 de producto con la válvula 23 configurada en la posición abierta.

Puede haber casos en los que la salmuera esté saturada con contaminantes liberados desde las paredes 203 de la caverna de sal de forma que se liberan contaminantes gaseosos adicionales desde las paredes 203 de la caverna de sal que se infiltran en el hidrógeno 4 almacenado y enfriado permaneciendo en la fase de vapor. En dicho escenario, una realización de la presente invención se puede llevar a cabo donde el hidrógeno 4 almacenado

arrastrado con salmuera saturada y contaminantes gaseosos se extrae como una corriente 21 de hidrógeno en bruto que se redirige al enfriador 35 para enfriar y condensar los contaminantes. En este caso, las válvulas 15 y 20 están cerradas, las válvulas 37 y 50 están abiertas. El hidrógeno 4 almacenado y enfriado se retira como una corriente 21 de hidrógeno en bruto y se dirige al enfriador 35. El enfriador 35 reduce la temperatura de la corriente 21 hasta una temperatura suficiente para que se produzca la condensación de los contaminantes en fase de vapor. La corriente de hidrógeno y el condensado (es decir, la salmuera saturada y los contaminantes condensados) entran después en el separador 36 vapor-líquido donde el condensado y la salmuera saturada se separan y se eliminan de la corriente 11 de hidrógeno comprimido. Por ejemplo, un sistema de coalescencia de líquidos puede utilizarse de forma que las gotículas de condensado se unen en gotículas más grandes a medida que pasan a través de una o más capas de matriz de medio filtrante del sistema de coalescencia. Después, las gotículas más grandes se separan del hidrógeno por gravedad. Los contaminantes condensados se pueden eliminar como una corriente de condensado separada de la salmuera que está saturada con contaminantes. Una corriente 39 de hidrógeno enfriado resultante sale por la salida del separador 36 líquido-vapor preferiblemente teniendo purezas en o por debajo de una especificación de pureza del producto. La corriente 39 de hidrógeno enfriado se exporta hasta la conducción 2 de hidrógeno con la válvula 23 en la posición abierta. La disminución de la temperatura y/o el aumento opcional de la presión en la unidad 35 de enfriamiento puede aumentar la capacidad de absorción de la salmuera de forma que más cantidad de contaminantes condensados se disuelven en solución con la salmuera antes de que la salmuera quede saturada.

También se describe un proceso en donde el hidrógeno 4 almacenado no se ha enfriado antes de su introducción dentro de la caverna 3. Cuando todos los contaminantes, tales como el dióxido de carbono y los hidrocarburos (p. ej., metano), se han disuelto en la salmuera, el hidrógeno 4 almacenado se extrae como una corriente 21 de hidrógeno en bruto y después se envía específicamente al separador 36 líquido-vapor donde la salmuera y los contaminantes de la misma se eliminan y se separan de la corriente 21 de hidrógeno en bruto de una forma que se ha descrito. Alternativamente, cuando los contaminantes están disueltos en la salmuera hasta su capacidad de saturación, la liberación adicional de los contaminantes desde las paredes 203 de la caverna de sal infiltra la cavidad interior de la caverna 3 y permanecen en la fase de vapor. El hidrógeno 4 almacenado con la salmuera saturada y contaminantes gaseosos se extrae en forma de una corriente 21 de hidrógeno en bruto que se redirige a la unidad 35 de enfriamiento para enfriar y condensar los contaminantes que después se pueden eliminar posteriormente junto con la salmuera saturada en el separador 36 líquido-vapor. La disminución de la temperatura y/o el aumento opcional de la presión en la unidad 35 de enfriamiento puede aumentar la capacidad de absorción de la salmuera de forma que una parte sustancial de los contaminantes condensados queda disuelta en solución con la salmuera. Una parte de los contaminantes condensados se pueden eliminar como una corriente de condensado separada de la salmuera saturada.

La presente invención se puede llevar a cabo para tratar cualquier concentración de contaminantes dentro de la corriente 21 de hidrógeno en bruto. De forma adicional, debe entenderse que los diversos métodos de la presente invención para tratar la corriente 21 de hidrógeno en bruto son aplicables a corrientes de hidrógeno extraídas de otros tipos de formaciones geológicas tales como, por ejemplo, cavernas de roca dura revestidas, yacimientos de gas/petróleo agotados, acuíferos, y cuencas sedimentarias.

Una porción del producto de hidrógeno que se retira de la conducción 2 puede estar suficientemente presurizada, eliminando de esta manera la necesidad de su compresión. Especialmente, una porción del producto de hidrógeno que se retira de la conducción 2 de hidrógeno puede derivar el compresor 7, y posteriormente enfriarse opcionalmente en la unidad 35 de enfriamiento y después introducirse dentro de la caverna 3 de sal. A medida que la presión de la cavidad 3 aumenta y comienza a desviarse de los requisitos de compresión predeterminados (p. ej., la presión de la caverna 3 se acerca o supera la presión de la conducción 2 de hidrógeno), producto de hidrógeno adicional que se retira de la conducción 2 de hidrógeno puede necesitar presurización y, por tanto, se puede comprimir mediante el compresor 7 antes de su introducción en la caverna 3 de sal. De forma adicional, deberá entenderse que el hidrógeno 4 almacenado se puede extraer de la caverna 3 y redirigirse al compresor 7, si es necesario presurizar el hidrógeno extraído hasta una presión suficiente igual o mayor que la presión de la conducción 2. De esta manera, el compresor 7 se puede utilizar selectivamente para introducir producto de hidrógeno en la caverna 3 y extraer el hidrógeno 4 almacenado de la caverna 3, según sea necesario durante la operación de la caverna 3. Aunque la invención se ha descrito con respecto a la capacidad de tratar hidrógeno con grados de pureza preferiblemente de aproximadamente un 95 % y superiores, se deberá entender que los principios de la presente invención también son aplicables en el tratamiento de hidrógeno de menores grados de pureza (es decir, menos de un 95 % de pureza) así como otros gases que no contienen hidrógeno, incluidos gases inertes, y cualquier combinación de los mismos.

La presente invención puede reducir sustancialmente la infiltración de contaminantes desde las paredes 203 de la caverna de sal de la caverna 3 de sal cuando el hidrógeno 4 gaseoso almacenado se ha enfriado antes de su introducción dentro de la caverna 3, mitigando de esta forma los problemas de contaminación que aparecen, de forma típica, cuando se mantiene gas almacenado dentro de cavernas de sal convencionales. La capacidad para reducir la contaminación del hidrógeno 4 gaseoso almacenado y enfriado como se muestra en las Figuras 2B y 2C puede eliminar, en algunos casos, la necesidad de implementar un equipo de purificación después de la extracción del hidrógeno 4 gaseoso almacenado y enfriado de la caverna 3 de sal. Como resultado, la presente invención ofrece una ventaja de proceso de una reducción sustancial en el coste y la complejidad del funcionamiento de la caverna 3 de sal.

Deberá entenderse que la presente invención contempla el producto de hidrógeno procedente de varias fuentes de hidrógeno. Como ejemplo, el producto de hidrógeno se puede extraer de una fuente de producción de hidrógeno, tal como uno o más sistemas de reformado de corrientes de metano, y después introducirse mediante una conducción de hidrógeno dentro de la caverna 3 de sal. En otro ejemplo, el producto de hidrógeno se puede retirar de una planta de recuperación de hidrógeno y dirigirse mediante una conducción de hidrógeno dentro de la caverna 3 de sal. De forma alternativa, el producto de hidrógeno se puede retirar de cualquier tipo de fuente de almacenamiento de hidrógeno y dirigirse mediante una conducción de hidrógeno dentro de la caverna 3 de sal. Aún más, además de las cavernas subterráneas para el almacenamiento de hidrógeno, deberá entenderse que los métodos de tratamiento que se describen en la presente invención pueden ofrecer ventajas de proceso en otras aplicaciones. Por ejemplo, la presente invención se puede utilizar para tratar una corriente de hidrógeno que tenga un nivel de pureza de 95 % o mayor con un contenido de humedad de 1 % o menos en la que la corriente de hidrógeno se deriva de varias fuentes tales como, a modo de ejemplo, una refinería de petróleo. A este respecto, se contempla un método para tratar una corriente de hidrógeno caracterizada por vapor de agua y uno o más contaminantes derivada de una fuente de hidrógeno en la cual el producto de hidrógeno se retira de la refinería de petróleo. El producto de hidrógeno se enfría hasta una temperatura suficiente para condensar al menos una porción del vapor de agua y al menos una porción del uno o más contaminantes. El vapor de agua condensado y el uno o más de dichos contaminantes se pueden después eliminar en un recipiente de separación, tal como un depósito de separación.

Aunque se ha mostrado y descrito lo que se consideran determinadas realizaciones de la invención, se entenderá, por supuesto, que pueden hacerse diversas modificaciones y cambios en la forma o en los detalles sin por ello abandonar el ámbito de la invención. Por ejemplo, deberá entenderse que la presente invención contempla otros medios para enfriar la corriente 11 de hidrógeno comprimido. Por ejemplo, la unidad de enfriamiento puede comprender un intercambiador de calor de carcasa y tubos, intercambiador de calor de placas, intercambiador de calor de aletas o cualquier otro intercambiador de calor adecuado que esté comercialmente disponible. Además, la presente invención contempla otros medios para eliminar el condensado. Por ejemplo, un depósito de separación vapor-líquido se puede usar para eliminar el condensado arrastrado. El depósito se puede configurar como un recipiente vertical al que se alimenta una mezcla de un líquido y vapor (o un líquido de evaporación ultrarrápida) y en donde el condensado se separa por gravedad, cae hasta el fondo del recipiente y se extrae. El vapor viaja hacia arriba a una velocidad predeterminada, que depende al menos del tipo de condensado y del tamaño de las gotículas de condensado. La velocidad predeterminada ayuda a minimizar el arrastre de las posibles gotículas de líquido en el vapor a medida que el vapor sale por la parte superior del recipiente. El depósito está preferiblemente diseñado para minimizar el incremento de temperatura como resultado de la expansión del hidrógeno dentro del tambor debido al coeficiente de Joule Thompson negativo del hidrógeno.

Por tanto, se pretende que la presente invención no esté limitada a la forma y detalles exactos mostrados y descritos en la presente memoria. Las realizaciones descritas en la presente memoria deben considerarse en todos los aspectos como meramente ilustrativas y no restrictivas, y el alcance de la invención, por tanto, es el indicado por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un método para tratar un producto de hidrógeno que contiene humedad que se va a almacenar en una caverna de sal, que comprende:
5 retirar el producto de hidrógeno de una conducción de hidrógeno;
 comprimir el producto de hidrógeno para producir un producto de hidrógeno comprimido;
 enfriar el producto de hidrógeno comprimido para condensar al menos una parte del vapor de
10 agua antes de que el producto de hidrógeno comprimido entre en la caverna de sal;
 eliminar el vapor de agua condensado para producir un producto de hidrógeno comprimido y
 enfriado; e
 introducir el producto de hidrógeno comprimido y enfriado en la caverna de sal para producir
 hidrógeno enfriado y almacenado dentro de la caverna de sal.
15 2. El método de la reivindicación 1, que además comprende las etapas de:
 reducir una temperatura de al menos una porción localizada de las paredes de la caverna de sal
 poniendo en contacto al menos una porción del hidrógeno enfriado y almacenado con la porción
 localizada de las paredes de forma que una o más capas de la porción localizada de las paredes alcance
20 un estado estabilizado mediante el cual se suprima la liberación de contaminantes desde dichas paredes.
3. El método de la reivindicación 1, que además comprende:
 extraer dicho hidrógeno enfriado y almacenado de la caverna de sal para producir un suministro de
 hidrógeno; e
25 introducir el suministro de hidrógeno en la conducción.
4. El método de la reivindicación 1, que además comprende:
 extraer dicho hidrógeno almacenado de la caverna de sal para producir un suministro de producto de
30 hidrógeno;
 enfriar el suministro de hidrógeno para eliminar el vapor de agua que tiene un nivel de
 impurezas de vapor de agua en o por debajo de una especificación de pureza del producto; e
 introducir el producto de hidrógeno en la conducción de hidrógeno.
35 5. El método de la reivindicación 1, que además comprende:
 poner en contacto al menos una porción del hidrógeno enfriado y almacenado con las paredes de
 la caverna de sal; y
40 reducir una temperatura de las paredes para disminuir la velocidad de infiltración de una porción
 de los contaminantes contenidos en la misma, en donde dichos contaminantes se seleccionan del
 grupo que consiste en vapor de agua, dióxido de carbono, hidrocarburos, compuestos que
 contienen azufre y cualquier combinación de los mismos.

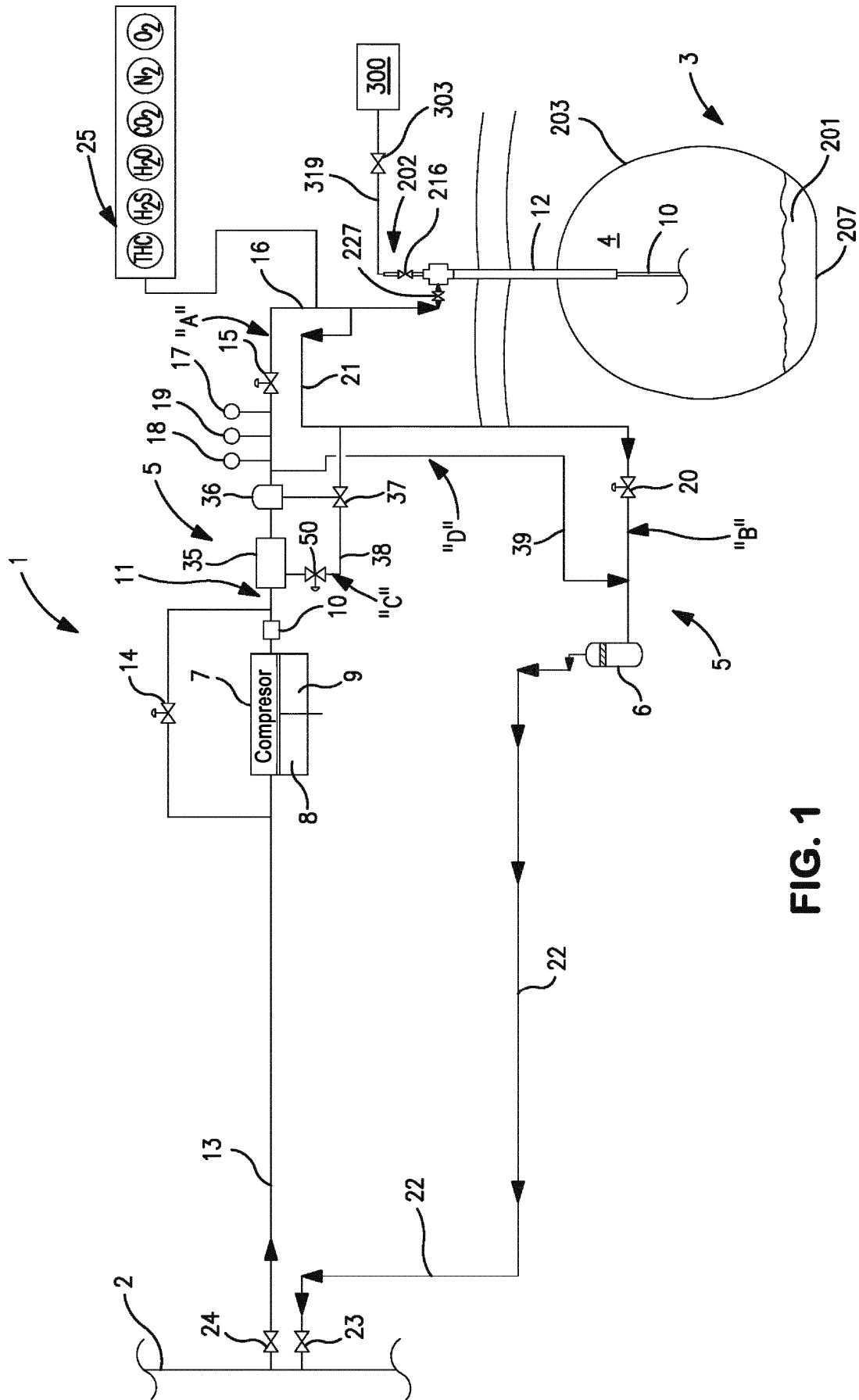
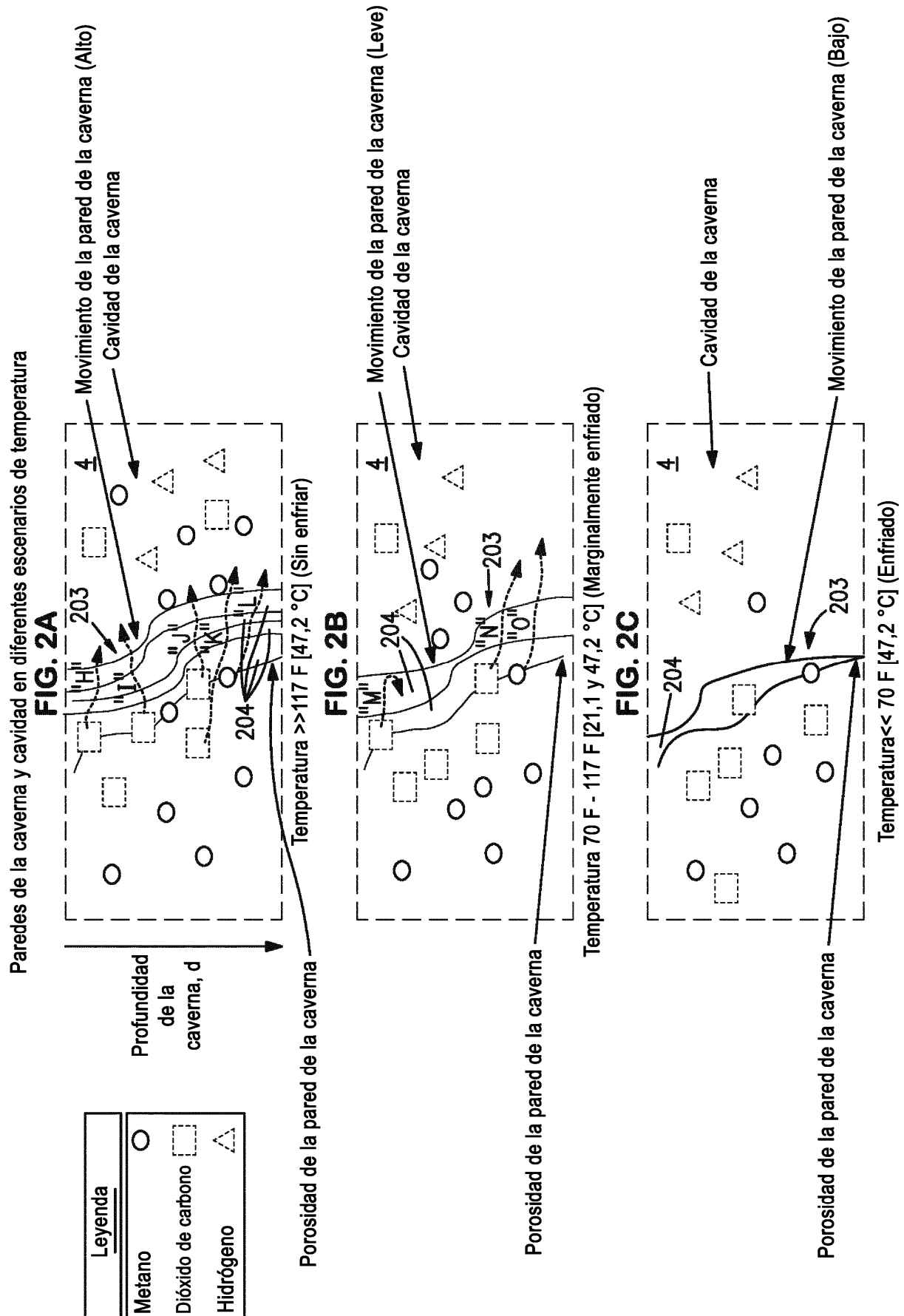


FIG. 1



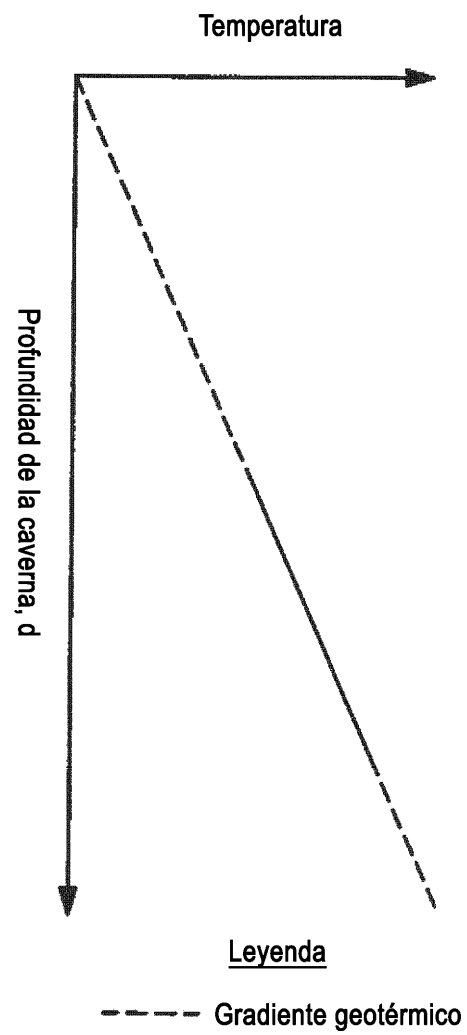


FIG. 3