

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 619 639**

51 Int. Cl.:

C01B 3/00 (2006.01)

C25B 1/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.03.2007 PCT/US2007/064129**

87 Fecha y número de publicación internacional: **18.10.2007 WO07117858**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.03.2007 E 07758658 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.12.2016 EP 2002032**

54 Título: **Almacenamiento y transporte de energía**

30 Prioridad:

29.03.2006 US 392149

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

26.06.2017

73 Titular/es:

**SAFE HYDROGEN, LLC (100.0%)
30 YORK STREET
LEXINGTON, MA 02420-2009, US**

72 Inventor/es:

**MCCLAIN, ANDREW W. y
BROWN, KENNETH**

74 Agente/Representante:

ILLESCAS TABOADA, Manuel

ES 2 619 639 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

Almacenamiento y transporte de energía

5 Esta descripción se refiere al almacenamiento y transporte de energía.

La energía en forma de electricidad se puede almacenar en forma de hidrógeno, por ejemplo, mediante la aplicación de la electricidad a un proceso de electrólisis para dissociar el hidrógeno del oxígeno en el agua. La energía en forma de calor también se puede almacenar en forma de hidrógeno mediante el uso de un proceso de conversión térmica para dissociar el hidrógeno del oxígeno en el agua.

El hidrógeno se puede transportar de forma segura y sencilla incorporándolo a un hidruro metálico. Más tarde, el hidrógeno puede liberarse mezclando agua con el hidruro metálico y utilizarse para proporcionar energía, por ejemplo, para un coche.

15 En un documento titulado "Magnesium-Hydride Slurry Technology for Hydrogen Storage", Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 837, 1 de diciembre de 2004, páginas 143-149, XP008158172, Materials Research Society, A. Krishnan et al. analizan el potencial de una suspensión en la que las partículas de hidruro de magnesio están suspendidas en un medio a base de aceite con dispersantes para la producción y el almacenamiento de hidrógeno. El hidrógeno se genera mediante la mezcla de la suspensión con agua en un mezclador, siendo el subproducto hidróxido de magnesio. La suspensión modera la reacción, permite la gestión térmica y es bombeable para que pueda ser transportada y dosificada como líquidos y para que se pueda utilizar la infraestructura de transporte existente. El documento explica que la viabilidad de emplear suspensión de hidruro de magnesio para transportar y almacenar hidrógeno depende de la capacidad para idear un sistema de reciclaje efectivo para el subproducto de hidróxido de magnesio, y propone un proceso de membrana de conducción de iones de oxígeno de óxido sólido.

De acuerdo con un aspecto de esta divulgación, se divulga un procedimiento, que comprende:

30 liberar el hidrógeno del agua en una primera ubicación utilizando la energía de una primera fuente de energía, preferentemente una fuente de energía renovable, más preferentemente una fuente de energía renovable seleccionada entre eólica, hidroeléctrica, geotérmica, energía oceánica, solar, y combinaciones de las mismas; almacenar el hidrógeno liberado, preferentemente en dicha primera ubicación, en una suspensión de hidruro metálico, comprendiendo la suspensión un medio de transporte líquido orgánico, comprendiendo preferentemente la suspensión magnesio, hidruro de magnesio, y aceite mineral, opcionalmente junto con un dispersante; y

35 transportar la suspensión de hidruro metálico a una segunda ubicación remota de la primera ubicación, preferentemente por medio de un medio de transporte seleccionado entre un vagón de ferrocarril, un camión, un camión cisterna, una tubería, una barcaza, y cualquier combinación de éstos; y liberar el hidrógeno de la suspensión de hidruro metálico mediante calentamiento en condiciones diseñadas para excluir el aire y el agua para formar hidrógeno, preferentemente para la utilización como fuente de energía, y una suspensión de hidruro metálico que está al menos parcialmente agotada.

De acuerdo con un segundo aspecto alternativo de esta divulgación, se divulga un sistema para realizar el procedimiento anterior, que comprende un electrolizador para liberar el hidrógeno del agua utilizando energía de la primera fuente de energía en la primera ubicación; un dispositivo de carga acoplado al electrolizador en la primera ubicación para recibir el hidrógeno liberado, el dispositivo de carga que comprende una entrada de suspensión de hidruro metálico, una salida de suspensión de hidruro metálico cargada, y un dispositivo de calentamiento capaz de calentar una suspensión en el dispositivo de carga a al menos aproximadamente 320°C; una suspensión de hidruro metálico, un recipiente de almacenamiento para almacenar la suspensión de hidruro metálico cargada, preferentemente en la primera ubicación; un medio de transporte, preferentemente seleccionado entre un vagón de ferrocarril, un camión, un camión cisterna, una tubería, una barcaza, y cualquier combinación de estos, para el transporte de la suspensión de hidruro metálico a una segunda ubicación; y un dispositivo de descarga adaptado para excluir el aire y el agua en la segunda ubicación que comprende un dispositivo de calentamiento capaz de calentar una suspensión de hidruro contenida en el dispositivo de descarga a al menos aproximadamente 370°C.

55 Las implementaciones pueden incluir una o más de las siguientes características.

En algunos modos de realización, el fluido inerte bombeable comprende un formador de hidruro reversible. En algunos modos de realización, el formador de hidruro reversible incluye un formador de hidruro metálico reversible (por ejemplo, magnesio) y/o un formador de hidruro de aleación metálica reversible.

60 En algunos modos de realización, los procedimientos incluyen el transporte de la suspensión de hidruro metálico parcialmente agotada desde la segunda ubicación a la primera ubicación, por ejemplo, para la recarga de la suspensión de hidruro metálico parcialmente agotada. Por ejemplo, la suspensión de hidruro metálico parcialmente agotada puede en algunos casos recargarse mediante la liberación de energía del agua en la primera ubicación utilizando energía de la primera fuente de energía, y almacenando el hidrógeno liberado en la suspensión de hidruro metálico agotada para formar la suspensión de hidruro metálico. La suspensión de hidruro metálico puede, en algunos

modos de realización, agotarse y recargarse durante al menos 50 ciclos.

5 En algunos modos de realización, la primera fuente de energía puede incluir una fuente de energía renovable (por ejemplo, eólica, hidroeléctrica, geotérmica, energía oceánica, solar, y/o combinaciones de las mismas). La primera fuente de energía puede ser usada en algunos modos de realización para liberar el hidrógeno del agua, y el hidrógeno se puede almacenar en una suspensión de hidruro metálico en la primera ubicación. En algunos modos de realización, la suspensión de hidruro metálico puede transportarse a través de un medio de transporte (por ejemplo, un vagón de ferrocarril, un camión, un camión cisterna, una tubería, y cualquier combinación de estos) desde la primera ubicación hasta una segunda ubicación. En algunos modos de realización, el hidrógeno que se libera de la suspensión de hidruro metálico (por ejemplo, en la segunda ubicación) puede ser utilizado como una fuente de energía (por ejemplo, en una célula de combustible). De esta manera, la energía de la primera fuente de energía se puede almacenar y transportar de manera efectiva hasta una segunda ubicación. En algunos modos de realización, la primera ubicación tiene una primera demanda de energía, la segunda ubicación tiene una segunda demanda de energía, y la primera demanda de energía es inferior a la segunda demanda de energía.

15 En algunos modos de realización, la suspensión de hidruro metálico comprende magnesio, hidruro de magnesio, y aceite mineral. En algunos modos de realización, la suspensión de hidruro metálico comprende además un dispersante.

20 En algunos modos de realización, los sistemas son capaces de mantener una presión en el dispositivo de carga de al menos aproximadamente 150 psia ($1,034 \cdot 10^6$ pascales). En algunos modos de realización, el dispositivo de carga comprende una bomba para bombear una suspensión desde el dispositivo de carga a través de la salida de suspensión, por ejemplo, a un recipiente de almacenamiento acoplado a la salida de suspensión del dispositivo de carga. En algunos modos de realización, el dispositivo de carga incluye un regulador para mantener una temperatura de una suspensión contenida en el dispositivo de carga a no más de aproximadamente 350°C.

25 En algunos modos de realización, el dispositivo de descarga incluye una salida de hidrógeno a través de la cual puede pasar hidrógeno desprendido de una suspensión de hidruro.

30 En algunos modos de realización, el primer dispositivo del sistema incluye un electrolizador.

35 En algunos modos de realización, los sistemas incluyen una bomba acoplada al recipiente de almacenamiento para transferir una suspensión desde el recipiente de almacenamiento de suspensión de hidruro metálico a un medio de transporte de suspensión (por ejemplo, un camión, un barco, un vagón de ferrocarril, una tubería, o cualquier combinación de estos).

40 En algunos modos de realización, los sistemas incluyen un dispositivo de descarga de suspensión de hidruro metálico que elimina el hidrógeno de una suspensión de hidruro metálico.

45 En general, otros aspectos incluyen las características anteriores y aspectos individuales y en otras combinaciones, expresados como procedimientos, aparatos, sistemas, productos de programa, y de otras formas.

Entre las ventajas de estas y otras características y aspectos hay una o más de las siguientes.

45 La energía puede ser almacenada en el hidrógeno en un lugar donde la energía esté fácilmente disponible, por ejemplo, a partir del viento y/o el sol, pero la demanda de energía sea relativamente baja, y ser transportada a un lugar donde la demanda de energía sea alta.

50 Otras características y ventajas serán evidentes a partir de la descripción y las reivindicaciones.

Descripción

La FIG. 1 es un diagrama esquemático de almacenamiento y transporte de energía.

55 La FIG. 2 es un diagrama esquemático de un dispositivo de carga de hidruro metálico.

La FIG. 3 es un diagrama esquemático de un dispositivo de descarga de hidruro metálico.

60 La FIG. 4 es un gráfico de temperatura y presión respecto al tiempo para cargar y descargar una suspensión de hidruro metálico.

65 En general, se proporcionan sistemas y procedimientos en los que la energía se almacena y/o transporta en forma de hidrógeno. Por ejemplo, la energía en forma de hidrógeno se puede almacenar mediante la incorporación del hidrógeno en una suspensión de hidruro metálico reversible, que es una suspensión que incluye un componente (por ejemplo, un metal o aleación metálica) que puede aceptar átomos de hidrógeno (se puede hidrurar) y puede renunciar a los átomos de hidrógeno (se puede deshidrurar) de una manera reversible, dependiendo de las condiciones (por

ejemplo, calor y/o presión) a las que está sujeta la suspensión. Las suspensiones que incluyen una componente reversible hidrurable en general se pueden describir como "cargadas", en las que una cantidad sustancial (por ejemplo, un 80% o más) de la componente hidrurable está hidrurada; "agotadas", en las que una cantidad sustancial (por ejemplo, un 80% o más) de la componente hidrurable no está hidrurada; o "parcialmente cargadas", en las que la suspensión contiene ambos componentes hidruradas y no hidruradas, con la componente hidrurada estando en general presente en una cantidad entre aproximadamente un 20% y un 80% de la cantidad total de la componente hidrurable. Típicamente de un 85% a un 95% de la cantidad de la componente hidrurable está hidrurada cuando está cargada y de un 5% a un 15% está hidrurada cuando está agotada. En un caso peor aceptable, probablemente al menos un 70% estaría hidrurada al cargarse y un 5% al descargarse. En general, una suspensión "cargada" puede incluir un cierto nivel de componente hidrurable que no está hidrurada, y una suspensión "agotada" puede incluir un cierto nivel de componente hidrurable que está hidrurada. Para determinar si una suspensión se considera cargada o agotada, pueden considerarse factores comerciales; por ejemplo, una suspensión se puede considerar "cargada" cuando tiene suficiente material hidrurado para proporcionar una cantidad deseada de energía a partir de ese hidrógeno cuando está sujeta al desprendimiento de hidrógeno. Se pueden determinar factores tales como el coste y el tiempo de hidruración de la suspensión, el coste de transporte de la suspensión hasta el sitio de desprendimiento de hidrógeno, y el coste de fuentes alternativas de energía en el sitio de desprendimiento de hidrógeno en la determinación de cuándo se carga una suspensión.

En el ejemplo de almacenamiento y transporte de la energía 10 que se muestra en la figura 1, la energía disponible en una primera ubicación 12 (en este caso, una granja de molino de viento en Kansas) se almacena en un medio transportable seguro, de fácil manejo (en este caso, hidrógeno en una suspensión recargable de hidruro metálico) llevándola hasta una segunda ubicación (en este caso, Nueva York), donde se utiliza la energía, por ejemplo, en coches que son capaces de quemar el hidrógeno como combustible.

En una primera posición 12, el viento hace que los rotores 19 de los molinos de viento 15 giren, accionando los generadores 17 para producir electricidad. La electricidad se conduce en los cables 16 hasta los terminales eléctricos 18 de un electrolizador 20. El electrolizador es parte de un sistema de carga de energía 13, que también incluye un dispositivo de carga 30.

Usando la electricidad, el electrolizador 20 separa el agua en gas hidrógeno 23 y gas oxígeno 25. El agua se proporciona desde una fuente 21 a través de una tubería 22. El gas hidrógeno 23 se hace pasar a través de una salida de gas hidrógeno 24 y una tubería 26 hacia el dispositivo de carga 30. El gas oxígeno 25 se ventila desde el electrolizador 20 a través de una salida de gas oxígeno 28, donde puede recogerse para su uso posterior o ventilarse a la atmósfera.

En algunos ejemplos, el electrolizador 20 bombea el gas hidrógeno 23 hacia el dispositivo de carga 30 bajo presión (por ejemplo, al menos aproximadamente 50 psia [libras por pulgada cuadrada absoluta] - $3,45 \cdot 10^5$ pascales) y el contenido del dispositivo de carga se mantiene bajo presión. La presión podría estar en un intervalo de aproximadamente 100 psia ($6,89 \cdot 10^5$ pascales) o más, 150 psia ($1,034 \cdot 10^6$ pascales) o más, 200 psia ($1,379 \cdot 10^6$ pascales) o más, 250 psia ($1,724 \cdot 10^6$ pascales) o más, 500 psia ($3,45 \cdot 10^6$ pascales) o más, 1000 psia ($6,89 \cdot 10^6$ pascales) o más, o 1.500 psia ($1,034 \cdot 10^7$ pascales) o más. El nivel de presión se establece en base a la capacidad del dispositivo de carga para soportar la presión y manejar el calor generado por la reacción. La reacción entre el hidruro metálico y el hidrógeno producirá calor e hidruro metálico cargado. La velocidad de reacción del hidruro metálico agotado con hidrógeno es típicamente más alta con presión más alta. Un sistema óptimo podría usar una presión de hidrógeno que maximiza la velocidad de producción del sistema al mismo tiempo que minimiza el coste del sistema. Una mayor velocidad de producción requerirá típicamente un dispositivo de carga más pequeño y, posiblemente, menos costoso. Por otra parte, una velocidad de reacción rápida puede producir tanto calor que el sistema de eliminación de calor se vuelve costoso. Un sistema óptimo podría equilibrar los costes para producir un diseño de coste mínimo. Una de las ventajas del hidruro metálico que está en forma de suspensión es que la suspensión se puede agitar para facilitar la transferencia de calor.

En algunos ejemplos, que no se ilustran en la figura 1, el gas hidrógeno 23 se recoge en un depósito de gas hidrógeno en el que se presuriza antes de ser entregado al dispositivo 30 de carga. Por ejemplo, si el coste de presurizar el hidrógeno a una presión particular es menor que el coste de utilización de un dispositivo de electrólisis que funciona a esa presión, o si la fuente de hidrógeno está a una presión más baja que la requerida por el dispositivo de carga, un depósito de hidrógeno presurizado puede proporcionar hidrógeno a la presión necesaria.

Además del hidrógeno, el dispositivo 30 de carga presurizado recibe un flujo de suspensión 34 de hidruro metálico reversible agotada. Una suspensión de hidruro metálico reversible agotada puede ser una suspensión que aún no ha sido hidrurada (por ejemplo, una suspensión recién formada) y/o una suspensión que ha sido deshidrurada, al menos parcialmente. Cada uno de los casos se describe con más detalle a continuación. La suspensión de hidruro metálico reversible agotada, a veces llamada simplemente una suspensión agotada, suspensión de hidruro metálico, o suspensión, incluye tanto hidruro metálico como metal elemental en una forma que es capaz de aceptar hidrógeno adicional para formar hidruro metálico. La proporción de hidruro metálico a metal elemental en la suspensión puede ser 1,2% o más en peso.

En la suspensión de hidruro metálico agotada pueden incluirse otros componentes, por ejemplo, un medio de transporte líquido, tal como un medio de transporte orgánico, y/o un dispersante para estabilizar la suspensión, tal como un triglicérido o ácido poliacrílico (~ 1%) o ácido oleico (~ 0,125%). La suspensión agotada se extrae por una bomba 40 a través de una tubería 42 desde una fuente de suspensión de hidruro metálico reversible agotada (por ejemplo, un dispositivo 46 de almacenamiento de suspensión de hidruro metálico agotada) y se hace pasar a través de una entrada 31 de suspensión de hidruro metálico agotada hacia el dispositivo 30 de carga.

A continuación, se calienta la suspensión en el dispositivo 30 de carga a presión mediante serpentines 36 de calentamiento. Cuando se calienta la suspensión, el hidruro metálico en la suspensión es capaz de cargarse adicionalmente con gas hidrógeno 23, con lo que se aumenta la cantidad de hidrógeno en la forma de un hidruro metálico en la suspensión de hidruro metálico. Para hidruro de magnesio, las velocidades de reacción son muy bajas hasta que la temperatura del hidruro es superior a aproximadamente 280°C, por lo que el calentamiento del hidruro de magnesio a esta temperatura puede acelerar la reacción inicial. A continuación, aumenta, en general, la velocidad, y la temperatura y/o presión se pueden bajar para controlar la velocidad de reacción. Mediante este proceso, la suspensión de hidruro metálico agotada se convierte en una suspensión 38 de hidruro metálico cargada, como se describe a continuación. La temperatura a la que se calienta la suspensión presurizada para la carga puede estar dentro de un amplio intervalo, por ejemplo, en el intervalo de aproximadamente 50°C a aproximadamente 350°C, dependiendo del hidruro metálico utilizado en la suspensión. Para hidruro de magnesio, el intervalo de carga es de aproximadamente 250°C a aproximadamente 400°C (por ejemplo, de aproximadamente 260°C a aproximadamente 300°C). El intervalo de temperatura preferido dependerá, en general, de la velocidad de reacción entre el hidrógeno y el hidruro metálico agotado.

En general, la temperatura y la presión para la hidruración de la suspensión dependerán una de la otra, y dependerán del tipo de metal que se utilice en la suspensión. Por ejemplo, el hidruro de magnesio requiere temperaturas y presiones relativamente altas para hidrurar la suspensión a una velocidad aceptable; la temperatura de equilibrio de hidruro de magnesio a 1 atmósfera es de 279°C. Otros hidruros metálicos típicamente pueden alcanzar velocidades de reacción similares a temperaturas y/o presiones inferiores.

Después de la carga, la suspensión 38 de hidruro metálico reversible cargada se enfría, por ejemplo, a temperatura ambiente. La suspensión 38 de hidruro metálico cargada enfriada no libera una cantidad importante de hidrógeno, mientras que su temperatura se mantiene dentro de un intervalo frío, y por lo tanto es segura para el almacenamiento y/o transporte. Una "cantidad significativa" de hidrógeno es una cantidad lo suficientemente grande para afectar de forma significativa a la cantidad de energía disponible en el sitio de desprendimiento de hidrógeno o la relación coste-efectividad de la utilización de la suspensión como fuente de energía, o suficiente como para crear dificultades de almacenamiento y/o transporte, por ejemplo, debido a aumentos en la presión resultantes de la producción de hidrógeno. Por ejemplo, en algunos modos de realización, la suspensión de hidruro metálico cargada enfriada libera no más de aproximadamente un 1% de su total de hidrógeno (por ejemplo, no más de aproximadamente un 10%, no más de aproximadamente un 1%, o no más de aproximadamente un 0,1% de su total de hidrógeno). En algunos casos, se cree que la cantidad de liberación de hidrógeno sería menor (incluso considerablemente menor que) un 0,1%. El intervalo disponible de temperaturas a las que la suspensión de hidruro metálico cargada no libera una cantidad significativa de hidrógeno depende del hidruro metálico utilizado en la suspensión. Para hidruro de magnesio, la suspensión no producirá unas cantidades significativas de hidrógeno a temperaturas por debajo de aproximadamente 200°C (por ejemplo, por debajo de aproximadamente 100°C, por debajo de aproximadamente 80°C, por debajo de aproximadamente 60°C o por debajo de aproximadamente 40°C). Otros hidruros reversibles típicamente deben mantenerse más fríos.

Una vez que la suspensión se ha cargado, una bomba 48 bombea la suspensión cargada 38 desde una salida 37 de suspensión de hidruro metálico cargada a través de una tubería 50 hasta un dispositivo 52 de almacenamiento de suspensión cargada, donde la suspensión de hidruro metálico cargada se puede almacenar indefinidamente. El dispositivo 52 de almacenamiento de suspensión cargada tiene una salida 56 para permitir la retirada de la suspensión mediante una bomba 58 hacia un medio 60 de transporte de suspensión, en este caso un camión cisterna. El medio 60 de transporte de suspensión puede ser cualquier cosa capaz de mover un fluido una distancia, tal como vehículos automóviles, vagones de ferrocarril, barcos, barcas y tuberías u otros conductos. El medio de transporte puede ser un camión del tipo que se utiliza para el transporte de gasolina. La bomba 58 puede ser parte de una estación de servicio que se dedica a servir a camiones desde un solo distribuidor o pueden estar disponibles para servir a camiones de varios distribuidores.

El medio de transporte 60 de suspensión transporta la suspensión 38 de hidruro metálico cargada, incluida la energía almacenada en el hidruro en la forma de hidrógeno, desde la primera ubicación 12 a la segunda ubicación 62.

En la segunda ubicación, una estación para la descarga de la suspensión transportada incluye una tubería 76 a través del cual una bomba 73 retira la suspensión del transportador y la bombea a un depósito 75 de almacenamiento de suspensión cargada. Cuando se necesita hidrógeno, la suspensión cargada es bombeada por la bomba 74 desde el depósito 75 de almacenamiento de suspensión cargada a través de la tubería 77 hacia una entrada 72 de suspensión y hacia un dispositivo 70 de descarga.

El dispositivo de descarga contiene un calentador 78 (por ejemplo, una bobina de calentamiento) para calentar la suspensión a una temperatura a la que el hidruro metálico de la suspensión libera hidrógeno. La temperatura de calentamiento depende de las características de descarga del hidruro metálico en la suspensión. Para hidruro de magnesio, la temperatura de calentamiento es de aproximadamente 250°C a aproximadamente 400°C (por ejemplo, de aproximadamente 290°C a aproximadamente 370°C o de aproximadamente 320°C y 360°C). Otros hidruros pueden tener diferentes temperaturas a las que liberan hidrógeno. En general, la temperatura será al menos de aproximadamente 150°C (por ejemplo, al menos aproximadamente 80°C, al menos aproximadamente 100°C, al menos aproximadamente 125°C, al menos aproximadamente 175°C, al menos aproximadamente 200°C, al menos aproximadamente 225°C, al menos aproximadamente 250°C, al menos aproximadamente 275°C, al menos aproximadamente 300°C, al menos aproximadamente 325°C, al menos aproximadamente 350°C, al menos aproximadamente 375°C, o al menos aproximadamente 390°C) y/o como máximo aproximadamente 400°C (por ejemplo, como máximo aproximadamente 39°C, como máximo aproximadamente 375°C, como máximo aproximadamente 350°C, como máximo aproximadamente 325°C, como máximo aproximadamente 300°C, como máximo aproximadamente 275°C, como máximo aproximadamente 250°C, como máximo aproximadamente 225°C, como máximo aproximadamente 200°C, o como máximo aproximadamente 175°C).

El dispositivo de descarga normalmente funcionará a una presión determinada por las características de descarga del hidruro metálico y la economía del sistema. Para el hidruro de magnesio, las velocidades de descarga más altas se producen a una presión cercana a la presión atmosférica o inferior. Sin embargo, los compresores de hidrógeno típicamente cuestan menos si se proporciona el hidrógeno a una presión que varía de 30 psia ($2,07 \cdot 10^5$ pascales) a 100 psia ($6,89 \cdot 10^5$ pascales). En este caso, el dispositivo de descarga puede accionarse en el intervalo de 30 a 100 psia para reducir el coste del compresor de hidrógeno. El intervalo de presión típicamente se selecciona para minimizar el coste del sistema. Por ejemplo, si el hidrógeno tiene que ser consumido por una célula de combustible, la presión requerida puede ser solo de 16 a 20 psia ($1,10 \cdot 10^5$ a $1,38 \cdot 10^5$ pascales). En este caso, el dispositivo de descarga es probable que se haga funcionar a una presión de 16 a 20 psia para eliminar la necesidad de un compresor de hidrógeno.

El dispositivo de descarga está diseñado para excluir el aire y el agua, en concreto oxígeno y agua. El dispositivo de carga también está diseñado para excluir el aire y el agua ya que estos materiales pueden reaccionar con el hidruro metálico y evitar que absorba o desorba hidrógeno.

Cuando la suspensión 38 de hidruro metálico cargada se calienta y el gas hidrógeno 23 se descarga, la suspensión se convierte en una suspensión 34 de hidruro metálico agotada (una suspensión de hidruro metálico que incluye menos de una cantidad significativa de hidrógeno, por ejemplo, porque parte del hidrógeno se ha desprendido de la suspensión o porque la suspensión se ha formado recientemente y no ha sido hidrurada). La suspensión reversible agotada se retira mediante una bomba 84 a través de una salida 80 de gas hacia un medio 60 de transporte de suspensión (que podría ser, por ejemplo, los mismos camiones utilizados para transportar la suspensión cargada) para el transporte de regreso a la primera ubicación 12 (u otra instalación de recarga) para la recarga.

El gas hidrógeno 23 que se descarga de la suspensión 38 de hidruro metálico cargada se ventila a través de una salida 80 de gas y se recoge, por ejemplo, envasado en una botella 90 de hidrógeno. El hidrógeno embotellado se puede utilizar posteriormente como una fuente de energía, transportando de manera efectiva la energía a partir de, por ejemplo, el parque eólico en Kansas a, por ejemplo, New York, donde la demanda de energía es mayor que en Kansas. El hidrógeno embotellado se podría utilizar, por ejemplo, para células de combustible de energía en un vehículo. Por ejemplo, el hidrógeno puede descargarse de la botella en una célula de combustible en un vehículo en una estación de servicio, o la propia botella puede colocarse en un vehículo y se puede alimentar de forma incremental en una célula de combustible en el vehículo. El hidrógeno puede embotellarse como un gas o como un líquido. En algunos casos, el hidrógeno se puede utilizar de forma distinta a como fuente de energía. Por ejemplo, el hidrógeno se puede utilizar en el trabajo de laboratorio como un medio de transporte gas para un cromatógrafo de gases, como un reactivo en una reacción química que requiere hidrógeno, o como un gas de soldadura, por ejemplo, para reemplazar acetileno.

En algunos modos de realización, la suspensión de hidruro metálico recargable se puede utilizar como fuente de energía para un vehículo directamente, en lugar de como una fuente de hidrógeno embotellado. Por ejemplo, la suspensión de hidruro metálico recargable se puede bombear directamente en un vehículo, por ejemplo, en un depósito de almacenamiento en un vehículo. El vehículo puede tener un dispositivo de descarga situado dentro del vehículo, lo que permite el desprendimiento de hidrógeno para su uso como fuente de combustible en el vehículo. En algunos modos de realización, el vehículo también podría tener un dispositivo de carga, de manera que la suspensión de hidruro metálico recargable se pueda recargar en el propio vehículo. El hidrógeno de una fuente de hidrógeno puede bombearse hacia el dispositivo de carga en el vehículo para hidrurar la suspensión.

En algunas implementaciones, la suspensión de hidruro metálico reversible se puede formar inicialmente en la primera ubicación 12, por ejemplo, en el dispositivo de carga 30. A tal efecto, un líquido inerte 105 (por ejemplo, aceite mineral) puede ser retirado por una bomba 104 desde un depósito 100 de líquido inerte a través de una tubería 102 de líquido inerte y en el dispositivo 36 de carga. También se incluye un recipiente 106 de almacenamiento para almacenar un formador 107 de hidruro metálico, por ejemplo, un metal elemental en forma de polvo. El recipiente 106 de

almacenamiento se acopla al dispositivo 30 de carga a través de un conducto para la transferencia hacia el dispositivo 30 de carga. De forma alternativa, el recipiente 106 de almacenamiento y/o el dispositivo 100 de líquido inerte se pueden desacoplar del dispositivo de carga; a continuación, el líquido inerte 105 y/o el formador 107 de hidruro pueden añadirse, a mano, al dispositivo 30 de carga 30. Otros componentes en suspensión, tales como, por ejemplo, un dispersante y/o un catalizador de hidruro, se pueden almacenar y añadir al dispositivo 30 de carga para formar la suspensión. El formador 107 de hidruro, el líquido inerte 105, y los ingredientes adicionales opcionales se pueden combinar en el dispositivo 30 de carga para formar una suspensión inicial agotada 34.

En algunos ejemplos la suspensión de hidruro metálico reversible inicialmente se puede formar en otro lugar y transportarse hasta la primera ubicación 12 para su uso.

Aunque solo una primera ubicación que tiene un dispositivo y una segunda posición que tiene un dispositivo de descarga de carga se muestran en la figura 1, la primera ubicación puede incluir múltiples dispositivos de carga, la segunda ubicación puede incluir múltiples dispositivos de descarga, y puede haber varias primeras ubicaciones y segundas ubicaciones que forman una red de distribución para energía obtenida en algunos lugares y utilizada en otras ubicaciones.

En algunos ejemplos, la suspensión incluye en general un medio de transporte líquido, tal como un medio de transporte orgánico, un dispersante, tal como un triglicérido, para la estabilización de la suspensión, y un hidruro metálico reversible y/o formador de hidruro metálico reversible (es decir, el metal y/o la aleación de hidruro metálico en forma elemental) dispersado en el medio de transporte líquido. La concentración del hidruro y/o formador de hidruro en la suspensión está típicamente en el intervalo de 40 a 80% en peso (por ejemplo, de 50 a 70% en peso o un 55-60% en peso). La concentración depende en general del hidruro metálico seleccionado para su uso en la suspensión. El uso de hidruros metálicos más densos dará lugar a concentraciones más altas de hidruro metálico que harán uso de hidruros metálicos menos densos. Los hidruros metálicos densos son los hidruros metálicos que tienen una densidad de al menos aproximadamente 1 g/ml, e incluyen, por ejemplo, lantano penta-níquel, mientras que los hidruros metálicos menos densos tienen una densidad de no más de aproximadamente 1 g/ml, e incluyen, por ejemplo, hidruro de litio. Las suspensiones de hidruro de magnesio pueden tener concentraciones de hidruro de al menos aproximadamente un 50% en peso (por ejemplo, al menos aproximadamente un 55% en peso, al menos aproximadamente un 60% en peso, al menos aproximadamente un 65% en peso, al menos aproximadamente un 70% en peso, o al menos aproximadamente un 75% en peso), y/o como máximo aproximadamente 80% en peso (por ejemplo, como máximo aproximadamente un 75% en peso, como máximo aproximadamente un 70% en peso, como máximo aproximadamente un 65% en peso, como máximo aproximadamente un 60% en peso, o como máximo aproximadamente un 55%). En general, los porcentajes más altos producen densidades de energía más altas (es decir, la cantidad de energía que se puede obtener a partir de volúmenes dados de suspensión) siendo al mismo tiempo en general suspensiones más viscosas y puede requerirse más fuerza para bombear, mientras que porcentajes más bajos producen suspensiones típicamente menos viscosas, lo cual requiere menos fuerza para bombear, pero produciendo una densidad de energía más baja.

La suspensión se puede almacenar y transportar de manera segura, y el hidrógeno se puede extraer fácilmente para su uso como combustible. La suspensión no es en general altamente inflamable o combustible y puede manejarse, almacenarse y transportarse con seguridad. La suspensión es estable a temperaturas y presiones ambientales normales, por ejemplo, de forma que el hidrógeno no se disocia del hidruro y se desprende. Debido a que es un líquido, la suspensión puede bombearse fácilmente a través de conductos y hacia los depósitos de almacenamiento, dispositivos de transporte y/o dispositivos de carga y descarga.

La suspensión incluye un medio de transporte líquido, por ejemplo, un líquido inerte en el que está suspendido el hidruro metálico y/o el formador de hidruro metálico reversible. Un "líquido inerte" incluye un líquido que no reacciona químicamente con H₂, ni con el hidruro metálico y/o formador de hidruro metálico reversible a las temperaturas y presión a las que será utilizado, y que no desactivará la superficie del hidruro o el formador de hidruro en relación con su capacidad catalítica para disociar la molécula de H₂ en átomos o para evitar la recombinación de los átomos en la molécula de H₂. El líquido inerte tiene la capacidad de disolver cantidades medibles de hidrógeno.

El medio de transporte líquido en algunos ejemplos es un medio de transporte líquido orgánico, tal como aceite mineral o un hidrocarburo de bajo peso molecular, por ejemplo, un alcano (por ejemplo, pentano o hexano). Otros medios de transporte líquidos pueden incluir hidrocarburos fluorados, tales como perfluorodecano, disolventes con base de silicona, líquidos orgánicos saturados, tales como undecano, isooctano, octano y ciclohexano, o mezclas de hidrocarburos de alto punto de ebullición tales como queroseno, y mezclas de los mismos.

En algunos ejemplos, el medio de transporte líquido inerte es un aceite ligero mineral no tóxico que exhibe un alto punto de inflamación, en el intervalo de aproximadamente 154°C a aproximadamente 177°C y una viscosidad en el intervalo de aproximadamente 42 segundos Saybolt Universal (SUs) a aproximadamente 59 Sus. El aceite mineral no es químicamente reactivo con hidruros metálicos, produce una presión de vapor relativamente baja, y sigue siendo líquido a través de un intervalo de temperaturas de aproximadamente -40°C a 200°C. El medio de transporte líquido produce la suspensión bombeable y, como un líquido seguro, es sencillo de almacenar o transportar. El medio de transporte puede actuar como una barrera entre el hidruro y el agua atmosférica, reduciendo la reacción de los dos

para formar un hidróxido, lo cual puede reducir la capacidad de la suspensión para almacenar y liberar hidrógeno. El uso de una suspensión permite un fácil repostaje, como al llenar un depósito. Otros medios de transporte pueden funcionar bien, incluidos los medios de transporte que no tienen enlaces con agua y preferentemente no tienen enlaces con OH. Los medios de transporte con base de silicona también pueden trabajar para suspensiones.

En algunos casos, la suspensión incluye un dispersante. El dispersante puede ser, por ejemplo, un dispersante de triglicéridos, que estabiliza estéricamente la suspensión. El dispersante de triglicéridos puede ser, por ejemplo, triglicéridos de ácido oleico, o trioleína. Otros dispersantes que pueden usarse incluyen dispersantes poliméricos, por ejemplo, Hypermer™ LP1. El dispersante puede ser dispersante polimérico. También se puede utilizar una combinación de dispersante polimérico y de triglicéridos y puede ser particularmente útil si el hidruro es hidruro de magnesio. Otros dispersantes incluyen ácido oleico, ácido poliacrílico, y bromuro de hexadeciltrimetilamonio (CTAB). El dispersante puede en algunos casos estar presente a concentraciones de al menos aproximadamente un 0,05% (por ejemplo, al menos aproximadamente un 0,1%, al menos aproximadamente un 0,5%, al menos aproximadamente un 0,75%, al menos aproximadamente un 1,0%, al menos aproximadamente un 1,5%, en menos aproximadamente un 2,0%, al menos aproximadamente un 2,5%, al menos aproximadamente un 3,0%, o al menos aproximadamente un 3,5%) y/o como máximo aproximadamente un 4,0% (por ejemplo, como máximo aproximadamente un 3,5%, como máximo aproximadamente un 3,0%, como máximo aproximadamente un 2,5%, como máximo aproximadamente un 2,0%, como máximo aproximadamente un 1,5%, como máximo aproximadamente un 1,0%, como máximo aproximadamente un 0,75%, como máximo aproximadamente un 0,5%, o como máximo aproximadamente un 0,1%). Por ejemplo, una mezcla que incluye hidruro de magnesio, aceite mineral ligero, y una mezcla de 0,0625% CTAB con un 1% de ácido poli(acrílico) forman una suspensión estable. El CTAB hace la suspensión más fluida y el ácido poli(acrílico) ayuda a mantener las partículas de hidruro de magnesio en suspensión. Una función del dispersante es para unir a las partículas de hidruro, aumentando la resistencia de la partícula en el medio de transporte fluido, ayudando de esta manera a evitar la sedimentación. El dispersante también ayuda a evitar que las partículas se aglomeren. El dispersante promueve la formación de la suspensión y la estabilización del hidruro en el aceite mineral. Los dispersantes también pueden tener, en ciertos modos de realización, propiedades tensoactivas que también pueden ser útiles en la formación de la suspensión.

El hidruro metálico es típicamente un hidruro metálico reversible, por ejemplo, un hidruro metálico o de aleación metálica reversible. Un formador de hidruro reversible, por ejemplo, un formador de hidruro metálico reversible, es cualquier cosa (por ejemplo, cualquier metal o aleación) que sea capaz de reaccionar con el hidrógeno de forma reversible para formar un hidruro (es decir, que sea capaz de pasar de forma reversible de forma de hidruro a forma distinta a hidruro, dependiendo, en general, de las condiciones a las que la suspensión está sujeta). La reacción, en una forma simple, implica poner hidrógeno gaseoso en contacto con el formador de hidruro. En el caso de un formador de hidruro metálico, esta reacción se puede representar de la forma siguiente:



donde M es el formador de hidruro metálico y X es el número de átomos de hidrógeno en el producto hidruro final. Esta reacción a veces se describe como un proceso de adsorción en lugar de un proceso de unión.

La dirección de la reacción se determina mediante la presión del gas hidrógeno y/o la temperatura de la reacción. En algunos ejemplos en los que se utiliza hidruro de magnesio, se requiere una temperatura de aproximadamente 250°C a aproximadamente 400°C (por ejemplo, de aproximadamente 280°C a aproximadamente 350°C, o de aproximadamente 290°C a aproximadamente 320°C) para la hidruración del metal, mientras que una temperatura de aproximadamente 280°C a aproximadamente 400°C (por ejemplo, desde aproximadamente 300°C a aproximadamente 380°C, de aproximadamente 320°C a aproximadamente 360 °C, o de aproximadamente 310°C a unos 340°C) da como resultado la deshidruración del metal. Otros hidruros pueden operar con temperaturas y presiones significativamente inferiores, por ejemplo, temperaturas de absorción y desorción de no más de aproximadamente 250°C (por ejemplo, no más de aproximadamente 225°C, no más de aproximadamente 200°C, no más de aproximadamente 175°C, no más de aproximadamente 150°C, no más de aproximadamente 125°C, no más de aproximadamente 100°C, o no más de aproximadamente 80°C). En ciertos modos de realización, las aleaciones y/o mezclas de hidruros pueden mejorar tanto la cinética como los intervalos de temperatura de uso. A continuación, se proporcionan ejemplos de ello. En general, para la hidruración del metal, un aumento de la presión de hidrógeno da como resultado una reacción de hidruración más rápida y/o que se requiera una temperatura más baja para la hidruración. En algunos casos, la presión de hidrógeno es al menos aproximadamente 15 psia ($1,03 \times 10^5$ pascales) (por ejemplo, al menos aproximadamente 50 psia ($3,45 \times 10^5$ pascales), al menos aproximadamente 100 psia ($6,89 \times 10^5$ pascales), al menos aproximadamente 150 psia ($1,034 \times 10^6$ pascales), al menos aproximadamente 200 psia ($1,379 \times 10^6$ pascales), o al menos aproximadamente 250 psia ($1,724 \times 10^6$ pascales)) y/o como máximo aproximadamente 300 psia ($2,068 \times 10^6$ pascales) (por ejemplo, como máximo aproximadamente 250 psia ($1,724 \times 10^6$ pascales), como máximo aproximadamente 200 psia ($1,379 \times 10^6$ pascales), como máximo aproximadamente 150 psia ($1,034 \times 10^6$ pascales), como máximo aproximadamente 100 psia ($6,89 \times 10^5$ pascales), o como máximo aproximadamente 50 psia ($3,45 \times 10^5$ pascales)). La presión en general dependerá parcialmente de la temperatura (y viceversa). Por ejemplo, mientras que las suspensiones de hidruro de magnesio producen una absorción relativamente rápida de hidrógeno a 300°C a una presión de 150 psia ($1,034 \times 10^6$ pascales), una temperatura más baja podría proporcionar una reacción más rápida.

En general, es deseable una reacción rápida para reducir los costes. Durante la absorción, sin embargo, se produce calor y debe eliminarse del sistema. Las altas velocidades de liberación de calor podrían descomponer, potencialmente, el aceite en la suspensión. En ciertos modos de realización, se puede utilizar una combinación de parámetros de temperatura y presión para controlar la dirección y la velocidad de la reacción, y por lo tanto el calor producido. Por ejemplo, la presión puede ser inicialmente relativamente baja, y a continuación se puede aumentar cuando el proceso continúa.

Dado que la reacción de hidruro es reversible, una suspensión de un formador de hidruro puede funcionar, repetidamente, para el transporte de energía en forma de hidrógeno, cargándose y descargándose muchas veces (por ejemplo, al menos aproximadamente 5 veces, al menos aproximadamente 10 veces, al menos aproximadamente 20 veces, al menos aproximadamente 25 veces, al menos aproximadamente 50 veces, al menos aproximadamente 75 veces, al menos aproximadamente 100 veces, al menos aproximadamente 125 veces, al menos aproximadamente 150 veces, al menos aproximadamente 250 veces, al menos aproximadamente 500 veces, al menos aproximadamente 1000 veces, o al menos aproximadamente 2000 veces). En general, cuanto mayor es el número de ciclos de carga/descarga, más rentable es el sistema. Por ejemplo, a gran escala, una suspensión de hidruro de producto químico utilizada de una manera no reversible (por ejemplo, en la que el hidrógeno se desprende mediante la mezcla de un hidruro metálico con agua para formar hidrógeno y un hidróxido de metal; tal como se divulga en, por ejemplo, la solicitud de Estados Unidos n.º de serie 10/044 813, titulada "Storage, Generation, and Use of hydrogen", presentada el 14 de noviembre de 2002) debe ser capaz de entregar hidrógeno a un coste de aproximadamente 4 \$/kg de hidrógeno. Si una suspensión de hidruro de magnesio reversible lleva solo la mitad de hidrógeno en el punto de entrega, el coste de hidrógeno para un solo uso sería de aproximadamente 8 \$/kg de hidrógeno. Si la suspensión de hidruro de magnesio reversible puede ser ciclada 100 veces, sin embargo, el coste del hidrógeno se reducirá a aproximadamente hasta el coste del hidrógeno utilizado en la suspensión y el coste de transporte de la suspensión (por ejemplo, $1,65 \$ + 0,10 \$ + 8 \$/100 = 1,83 \$/\text{kg}$). Cualquier reutilización de la suspensión de hidruro en un sistema reversible reducirá el coste del hidrógeno. En algunos ejemplos, un factor de limitación en el número de veces que la suspensión puede cargarse y descargarse es la lenta formación del óxido o hidróxido a partir del formador de hidruro químico, por ejemplo, debido a la exposición a la humedad atmosférica o aire. Otro problema que puede limitar la vida de una suspensión de hidruro metálico podría ser el daño a los aceites y dispersantes. Estos problemas pueden influir en la frecuencia con que la suspensión de hidruro debe volver a la fábrica para ser reciclada. Para reciclar la suspensión de hidruro, los aceites se separan primero de los sólidos. A continuación, los sólidos se reforman en metales puros. A continuación, los metales se alean para formar formador de hidruro puro y el formador de hidruro puro se hace reaccionar con hidrógeno para formar suspensión de hidruro puro.

En general, cualquier formador de hidruro reversible sería adecuado, incluyendo formadores de hidruro metálico y/o de aleación metálica, por ejemplo, magnesio, vanadio, FeTi, CaNi₅, MgNi₂, NaAl u otros formadores de hidruro metálico, tanto si es un metal elemental, una aleación metálica o un material intermetálico. Entre los formadores de hidruros intermetálicos se incluyen LaNi_{4,5} Al_{1,5}, LaNi₅ y TiFe_{0,7} Mn₂. Entre los formadores de hidruros metálicos se incluyen los metales de transición (grupos de tabla periódica IIIA a VIIIA), incluyendo la serie de los lantánidos y actínidos. Tienen una gran capacidad de almacenamiento de hidrógeno junto con la liberación inmediata de hidrógeno a temperaturas y presiones moderadas y una capacidad de someterse a muchos ciclos de absorción y desorción con poca disminución de la capacidad.

Entre los metales y aleaciones metálicas conocidos por formar hidruros reversibles para la captura reversible de hidrógeno se incluyen las aleaciones de titanio, como se expone en la patente de Estados Unidos 4 075 312, las aleaciones de lantano, como se divulga en la patente de Estados Unidos. 4 142 300, y otras aleaciones, como se muestra en la patente de Estados Unidos. 4 200 623. Los metales elementales conocidos por formar hidruros metálicos se describen en "Metal Hydrides" de WM Mueller, J.P. Blackledge y G.G. Libowitz, Academic Press, N.Y. 1968.

La suspensión se forma inicialmente añadiendo un formador de hidruro reversible y opcionalmente un dispersante en un medio de transporte líquido. El formador de hidruro reversible se muele finamente, en general, antes de mezclarse con los otros componentes de la suspensión. En algunos casos, el polvo de formador de hidruro reversible se combina primero con una mezcla de aceite mineral y dispersante, que a continuación se muele (por ejemplo, en un triturador o molino) para reducir aún más el tamaño de las partículas. En algunos casos, las partículas finales son principalmente de aproximadamente 1 micrómetro a aproximadamente 200 micrómetros (por ejemplo, de aproximadamente 1 micrómetro a aproximadamente 100 micrómetros o de aproximadamente 1 micrómetro a aproximadamente 50 micrómetros) de tamaño a través de su dimensión más pequeña. En algunos casos, se añade a la suspensión una pequeña cantidad de hidruro (por ejemplo, se añade a la suspensión un hidruro que incluye el mismo formador de hidruro reversible) antes de cargar la suspensión. La cantidad de hidruro añadido al formador de hidruro en algunos modos de realización es de aproximadamente un 1% a aproximadamente un 50% (por ejemplo, de aproximadamente un 3% a aproximadamente un 20%). El intervalo más rentable dependerá, típicamente, de la velocidad de reacción y el coste del formador de hidruro. Para hidruro de magnesio, el hidruro puede funcionar como un catalizador, aumentando la velocidad de formación de hidruro mediante el formador de hidruro reversible, por ejemplo, como se describe en la patente de Estados Unidos 5 198 207. En algunos casos, como cuando la suspensión agotada es una que se había cargado y ya se había descargado posteriormente, se ha planteado la hipótesis de que algunos de los restos de hidruro permanezcan en forma de hidruro y proporcionen la función de catalizador sin la necesidad de la

adición de un hidruro químico como catalizador.

Los ejemplos de las suspensiones pueden tener una característica de flujo tipo líquido que pueden permitir el uso de una infraestructura de combustible líquido existente, de almacenamiento y transporte de la suspensión. La naturaleza del medio de transporte líquido, la cantidad del dispersante, y el tamaño de las partículas de hidruro afecta a la viscosidad de la suspensión. El aceite en la suspensión puede proteger el hidruro contra un contacto accidental con la humedad en el aire. La suspensión puede servir como un camino para la disipación del calor generado por la reacción exotérmica de carga. El dispersante mantiene las partículas de hidruro en suspensión. El dispersante se une a las partículas y rechaza las partículas adyacentes para evitar la aglomeración de las partículas.

La suspensión arde solo si se aplica y se mantiene un calor alto, como mediante un soplete. Tras la eliminación del calor, la combustión de la suspensión cesa y las llamas se extinguen.

La suspensión es, en general, capaz de mantener entre aproximadamente un 3% y aproximadamente un 6% en peso de hidrógeno. La suspensión en algunos modos de realización puede absorber hasta un 100% de la cantidad teórica de hidrógeno que puede ser absorbida. La suspensión en ciertos modos de realización puede liberar desde aproximadamente un 70% a aproximadamente un 98% del hidrógeno especialmente captado (por ejemplo, de aproximadamente un 80 a un 98% o de un 90 a un 98% del hidrógeno especialmente captado). El hidruro residual que queda puede, a continuación, funcionar como un catalizador para la recarga de la suspensión.

El dispositivo de carga incluye un recipiente de retención de suspensión y un dispositivo de calentamiento (por ejemplo, serpentines de calentamiento, un intercambiador de calor, un enchufe de calentamiento, y/o un intercambiador de calor a reflujo) para el calentamiento de la suspensión en el mismo, a la temperatura de carga. El dispositivo de carga también incluye una entrada de gas hidrógeno y, opcionalmente, un regulador de presión para mantener la presión de carga dentro del recipiente. Dado que la reacción de carga es exotérmica, el dispositivo de carga puede incluir un aparato de eliminación de calor (por ejemplo, una bomba de calor, un intercambiador de calor, y o un tapón) para mantener la suspensión cargada dentro de un intervalo de temperaturas deseado. El dispositivo de carga también puede incluir componentes de agitación o mezcla para crear una distribución de temperatura más uniforme a lo largo de la suspensión y para facilitar la distribución del hidrógeno a través de la suspensión.

El dispositivo de carga puede suministrarse con suspensión recién creada, suspensión agotada o una combinación de las dos.

En algunos casos, como se muestra en la FIG. 1, el dispositivo de carga funciona sobre una base de lote por lote. La suspensión agotada se bombea en el dispositivo, que se calienta y se suministra con gas hidrógeno hasta que se carga la suspensión. La presión se ventila, la suspensión se enfría, y la suspensión se bombea desde el dispositivo (por ejemplo, a un depósito de almacenamiento). A continuación, se repite el proceso.

En otras implementaciones, el dispositivo de carga funciona de forma continua a medida que la suspensión se bombea, calienta, carga, enfría y elimina continuamente.

Como se muestra en la FIG. 2, en un aparato 150 de carga en modo continuo, la suspensión 152 de hidruro metálico agotada alimenta mediante una bomba 154 a una primera sección de tubería 156, donde se calienta a la temperatura de carga mediante serpentines 158 de calentamiento. Una vez calentado, el hidruro metálico agotado se bombea en una cámara 160 de presión que tiene un espacio superior 161 situado por encima de la suspensión 152. El gas hidrógeno 162 se introduce a través de entradas 163 de gas en el espacio superior 161, en el que está en contacto directo con una superficie 153 de la suspensión 152. El gas hidrógeno 162 se introduce a una presión suficiente, dada la temperatura seleccionada, para iniciar la reacción de hidruro. La cámara 160 de presión es de una longitud/suficiente, cuando se combina con la velocidad de flujo de la suspensión, para dar lugar a un tiempo de retraso de la suspensión en la cámara 160 de presión suficiente para completar sustancialmente la carga de la suspensión. A medida que el metal en la suspensión 152 de hidruro metálico agotado se hidrura para formar una suspensión 168 de hidruro metálico cargada, la suspensión emite calor. El intercambiador 166 de calor opcional recoge y transfiere el calor desde la suspensión a la primera sección de tubería 156, donde facilita el calentamiento de la suspensión de hidruro metálico agotada. Una vez que la suspensión está completamente cargada, sale de la cámara de presión 160 y entra en una tercera sección de tubería 172, en la que se enfría hasta aproximadamente la temperatura ambiente, por ejemplo, mediante el intercambiador 166 de calor. A continuación, la suspensión de hidruro metálico cargada se bombea fuera del dispositivo 150 de carga.

En una variación de esta disposición, el proceso se podría iniciar mediante el bombeo de un poco de suspensión descargada a través de un intercambiador de calor a reflujo y a continuación a través de un calentador (que aumentaría la temperatura de la suspensión descargada hasta la temperatura de funcionamiento, hasta que haya suficiente calor de la suspensión cargada saliendo de la sección de carga) y a continuación en el volumen de carga donde el hidrógeno se pondrá en contacto la suspensión. Una reacción entre el hidruro agotado y el hidrógeno producirá calor, una parte del cual debe eliminarse de forma activa para mantener la temperatura de la suspensión a la temperatura de reacción deseada. Después de estar en la sección de hidruración durante un par de horas, la hidruración debe ser completa y la suspensión de hidruro cargada pasará de nuevo a través del intercambiador de calor a reflujo y hacia un recipiente

independiente para la suspensión cargada. La suspensión caliente que pasa a través de un lado del intercambiador de calor a reflujo perderá su calor hacia la suspensión agotada fría que pasa a través del otro lado del intercambiador de calor a reflujo.

5 En general, el dispositivo de descarga es similar al dispositivo de carga. El dispositivo de descarga en general incluye un recipiente de retención de fluido y un dispositivo de calentamiento (por ejemplo, serpentines de calentamiento, un intercambiador de calor, y/o un tapón de calentamiento) para el calentamiento de la suspensión en el mismo a la temperatura de descarga. Cuando se utiliza hidruro de magnesio, la temperatura de descarga puede ser de al menos aproximadamente 280°C (por ejemplo, al menos aproximadamente 300°C, al menos aproximadamente 320°C, al menos 340°C, al menos aproximadamente 350°C, al menos aproximadamente 360°C, al menos aproximadamente 370°C, al menos aproximadamente 380°C, o al menos aproximadamente 390°C) y/o como máximo aproximadamente 400°C (por ejemplo, como máximo aproximadamente 390°C, como máximo aproximadamente 380°C, como máximo aproximadamente 370°C, como máximo aproximadamente 360°C, como máximo aproximadamente 350°C, como máximo aproximadamente 340°C, como máximo aproximadamente 320°C, o como máximo aproximadamente 300°C).
10 Otros hidruros pueden funcionar con temperaturas y presiones menores. El dispositivo incluye además una salida de gas hidrógeno para liberar gas hidrógeno desde el recipiente. El dispositivo de descarga opcionalmente incluye además un aparato de eliminación de calor (por ejemplo, una bomba de calor, un intercambiador de calor, o un intercambiador de calor a reflujo aislado) para reducir la temperatura de la suspensión una vez que se agota de hidrógeno liberable.

20 En algunos casos, como se muestra en la FIG. 1, el dispositivo de descarga funciona sobre una base de lote por lote. La suspensión cargada se bombea en el dispositivo y se calienta, momento en el cual se desprende el hidrógeno de la suspensión. A continuación, la suspensión agotada se enfría opcionalmente y se bombea desde el dispositivo (por ejemplo, a un depósito de almacenamiento). A continuación, se repite el proceso.

25 En algunos ejemplos, la suspensión cargada se bombea continuamente en el dispositivo de descarga, calienta, agota, enfría y elimina. La FIG. 3 ilustra un ejemplo de un dispositivo 200 de descarga de modo continuo, en el que la suspensión 202 de hidruro metálico cargado es alimentada por una bomba 204 a una primera sección de tubería 206, donde se calienta a la temperatura de desorción mediante serpentines 208 de calentamiento. Una vez calentada, la suspensión 202 de hidruro metálico cargada pasa a una cámara 210 de desorción que tiene un espacio superior 211 sobre una superficie 203 de la suspensión 202. El gas hidrógeno 212 se desorbe de la suspensión cargada 202 en el espacio superior 211, desde el cual se ventila a través de salidas de gas 212. Se puede utilizar una válvula 214 de presión para controlar la presión dentro del espacio superior 211. La longitud *l* de las tuberías de la cámara 210 de desorción es suficiente, cuando se toma en combinación con la velocidad de flujo de la suspensión, para permitir que se desorbe sustancialmente todo el hidrógeno disponible. La suspensión, que ahora es una suspensión 216 de hidruro metálico agotada, sale de la cámara 210 de desorción y entra en una tercera sección 220 de tubería, en la que se enfría hasta aproximadamente la temperatura ambiente, opcionalmente por medio de un intercambiador 222 de calor que se lleva el calor de la suspensión 216 de hidruro metálico agotada y la aplica a la suspensión 202 de hidruro metálico cargada que entra en el dispositivo 200 de descarga. A continuación, la suspensión 216 de hidruro metálico agotada se bombea hacia el exterior del dispositivo 200 de descarga, por ejemplo, para el almacenamiento y/o transporte.

45 La válvula 214 de presión puede en algunos casos acoplarse a un sistema 226 de refrigeración para enfriar el gas hidrógeno 212, y para condensar cualquier aceite 228 que se había volatilizado y ventilado junto con el gas hidrógeno 212. Cualquier aceite 228 tan condensado se podría añadir de nuevo a la suspensión 216 de hidruro metálico agotada. El gas hidrógeno 212 puede en algunos casos ejecutarse a través de un filtro 230, por ejemplo, un filtro de carbón, para eliminar cualquier resto de aceites u otras impurezas. El gas hidrógeno purificado ahora 212' puede a continuación alimentar un procesamiento adicional, tal como, por ejemplo, embotellado. De forma alternativa, el gas hidrógeno 212' puede ser suministrado a un proceso de consumo de hidrógeno tal como una célula de combustible o un sistema de soldadura.

50 En general, se utiliza una primera fuente de energía para formar o extraer el hidrógeno que se almacena en la suspensión de hidruro. La primera fuente de energía es, en ciertos ejemplos, una fuente de energía que está fácilmente disponible en un lugar determinado (por ejemplo, una primera ubicación) y/o no está fácilmente disponible en, y/o no es fácilmente transferible a, una segunda ubicación. Tales fuentes de energía incluyen fuentes de energía renovables, tales como, por ejemplo, eólica, geotérmica, hidroeléctrica, energía oceánica (por ejemplo, a partir de la energía de las olas del mar, las mareas, o en la energía térmica almacenada en el océano), la biomasa y la energía solar en forma de calor o electricidad. Tales fuentes de energía en general no producen gases de efecto invernadero y no están sujetas a agotamiento. La biomasa puede producir gases de efecto invernadero, pero típicamente no contribuye en cantidades sustanciales de gases adicionales de efecto invernadero a la atmósfera, ya que la biomasa utiliza los gases de efecto invernadero para crearse a sí misma. En algunos modos de realización, la energía nuclear se puede utilizar para producir hidrógeno. En otros modos de realización, los combustibles utilizados en general como fuentes de energía (por ejemplo, carbón, O₁₁, y/o gas natural) pueden ser utilizados para producir hidrógeno. El hidrógeno puede producirse en un pequeño número de lugares, donde puede prestarse atención para reducir la contaminación resultante de la combustión de estos combustibles.

Muchas de estas fuentes de energía no son en sí mismas fácilmente transportables de una forma sin usar y/o estable, en contraste con los combustibles fósiles. Además, muchas de estas fuentes de energía se encuentran en lugares en los que la demanda de energía es baja (por ejemplo, las zonas de baja densidad de población y/o poca industrialización). Por ejemplo, como se muestra en la FIG. 1, la primera ubicación 12, Kansas, tiene abundancia de energía eólica disponible, pero poca demanda de energía en comparación con otras partes del país. En algunos lugares, la energía disponible es mayor que la demanda de energía. Este exceso de energía puede ser almacenado y transportado a los lugares de mayor demanda de energía.

Ejemplo 1

Una mezcla de un 50% en peso de hidruro de magnesio y aceite de transferencia de calor Paratherm NF se colocó en un autoclave Parr, donde se sometió a las siguientes condiciones experimentales. Una gráfica de la temperatura y la presión del autoclave como una función del tiempo se encuentra en la FIG. 4.

El autoclave se purgó con hidrógeno cinco veces a una presión de 150 psia ($1,034 \times 10^6$ pascales) para reducir el contenido de oxígeno del gas en el recipiente a no más de aproximadamente 2 ppm. La presión en el recipiente se redujo a la presión atmosférica después de cada presurización y después de la presurización final. El recipiente se calentó a 140°C, una temperatura a la que el agua en el aceite habría reaccionado con el hidruro de magnesio para formar hidrógeno. El aumento de presión resultante habría hecho que el hidrógeno producido saliera del recipiente y fuera recogido en una botella invertida llena de agua; no se observaron burbujas, lo cual indica que no había agua presente en el aceite.

El recipiente se calentó a 370°C, una temperatura a la cual el hidrógeno se desorbe a partir de hidruro de magnesio, y el hidrógeno se vio desprenderse durante un período de aproximadamente 2 horas, tiempo durante el cual se desprendió aproximadamente el 80% del hidrógeno teóricamente unido en el hidruro de magnesio. El hidrógeno desprendido se midió en una botella invertida que desplazó al agua en la botella.

A continuación, el autoclave se presurizó con gas hidrógeno a 150 psia, mientras que la temperatura se mantuvo a aproximadamente 370°C. La presión se redujo solo unos pocos psi en el transcurso de 1,4 horas, lo cual indica que poco hidrógeno fue absorbido por la suspensión. A continuación, la temperatura se redujo a aproximadamente 320°C. A esta temperatura, el hidrógeno se absorbió fácilmente (es decir, fue incorporado fácilmente en el hidruro de magnesio). El sistema se mantuvo en esta condición durante 1,5 horas, con una presurización de hidrógeno adicional, y luego se enfrió.

Como se puede ver en la FIG. 4, cuando se calentó inicialmente a aproximadamente 370°C, la suspensión no desprendió hidrógeno (indicado por la presión de casi 0 psia). Se introdujo una cantidad establecida de hidrógeno, indicada por el aumento de la presión hasta aproximadamente 150 psia ($1,034 \times 10^6$ pascales) a aproximadamente 10 000 segundos. A esta temperatura y presión, la suspensión no absorbió el hidrógeno (indicado por la presión restante a aproximadamente 150 psia con el paso del tiempo). Una vez que la temperatura se redujo hasta la temperatura de absorción de aproximadamente 320°C, la presión se redujo, indicando que el hidrógeno fue absorbido por la suspensión. La velocidad de la reducción de presión aumentó con el tiempo. Esto se cree que es una función del hidruro de magnesio formado inicialmente actuando como catalizador, acelerando la reacción del hidruro y utilizando el hidrógeno a un ritmo más rápido. Tras la adición de más hidrógeno en el sistema (indicado por el pico de presión al cabo de aproximadamente 18000 segundos), la velocidad o la reducción presión (indicativa de la velocidad de absorción de hidrógeno) aumentó de nuevo, reduciéndose solo cuando se redujo la temperatura al final de la experimentar.

Aunque los modos de realización descritos anteriormente se refieren en general a la formación de hidrógeno en o cerca del sitio de carga o formación de hidruro metálico, el hidrógeno puede ser almacenado y transportado por sí mismo hasta sitios de carga de hidruro metálico. Por ejemplo, el hidrógeno se puede transportar desde reformadores de vapor metano a gran escala a mercados remotos (por ejemplo, mercados a varios cientos de millas de distancia).

Otros modos de realización están dentro del alcance de las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento que comprende:

5 liberar hidrógeno del agua en un primer lugar utilizando energía de una primera fuente de energía, preferentemente una fuente de energía renovable, más preferentemente una fuente de energía renovable seleccionada entre eólica, hidroeléctrica, geotérmica, energía oceánica, solar, y combinaciones de las mismas;

10 almacenar el hidrógeno liberado, preferentemente en dicha primera ubicación, en una suspensión de hidruro metálico, comprendiendo la suspensión un medio de transporte líquido orgánico, comprendiendo la suspensión preferentemente magnesio, hidruro de magnesio, y aceite mineral, opcionalmente junto con un dispersante; y transportar la suspensión de hidruro metálico a una segunda ubicación remota respecto a la primera ubicación, preferentemente por medio de un medio de transporte seleccionado entre un vagón de ferrocarril, un camión, un camión cisterna, una tubería, una barcaza, y cualquier combinación de éstos; y liberar el hidrógeno de la suspensión de hidruro metálico mediante calentamiento en condiciones diseñadas para excluir el aire y el agua para formar hidrógeno, preferentemente para la utilización como fuente de energía, y una suspensión de hidruro metálico que está al menos parcialmente agotada.

20 2. El procedimiento de la reivindicación 1, que comprende además el transporte de la suspensión de hidruro metálico parcialmente agotada, desde la segunda ubicación, a la primera ubicación.

25 3. El procedimiento de la reivindicación 2, que comprende además la recarga de la suspensión de hidruro metálico agotada mediante la liberación de energía del agua en la primera ubicación, utilizando la energía de la primera fuente de energía, y el almacenamiento del hidrógeno liberado en la suspensión de hidruro metálico agotada para formar la suspensión de hidruro metálico, repitiéndose, preferentemente, durante al menos 50 ciclos del hidruro metálico.

30 4. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que la primera ubicación tiene una primera demanda de energía, la segunda ubicación tiene una segunda demanda de energía, y en el que la primera demanda de energía es inferior a la segunda demanda de energía.

5. Un sistema para llevar a cabo el procedimiento de la reivindicación 1, que comprende:

35 un electrolizador para liberar el hidrógeno del agua utilizando energía de la primera fuente de energía en la primera ubicación;

40 un dispositivo de carga acoplado al electrolizador en la primera ubicación para recibir el hidrógeno liberado, comprendiendo el dispositivo de carga una entrada de suspensión de hidruro metálico, una salida de suspensión de hidruro metálico cargada, y un dispositivo de calentamiento capaz de calentar una suspensión en el dispositivo de carga hasta al menos aproximadamente 320°C;

45 un recipiente de almacenamiento de suspensión de hidruro metálico para el almacenamiento de la suspensión de hidruro metálico cargada, preferentemente en la primera ubicación;

un medio de transporte, preferentemente seleccionado entre un vagón de ferrocarril, un camión, un camión cisterna, una tubería, una barcaza, y cualquier combinación de estos, para el transporte de la suspensión de hidruro metálico a una segunda ubicación; y

un dispositivo de descarga adaptado para excluir el aire y el agua en la segunda ubicación que comprende un dispositivo de calentamiento capaz de calentar una suspensión de hidruro contenida en el dispositivo de descarga hasta al menos aproximadamente 370°C.

50 6. El sistema de la reivindicación 5, en el que el sistema es capaz de mantener una presión en el dispositivo de carga de al menos aproximadamente 150 psia ($1,034 \cdot 10^6$ pascales).

55 7. El sistema de la reivindicación 5, comprendiendo adicionalmente el dispositivo de carga una bomba para el transporte de la suspensión de hidruro metálico, desde el dispositivo de carga, a través de la salida de suspensión.

8. El sistema de la reivindicación 5, comprendiendo adicionalmente el dispositivo de carga un regulador para mantener una temperatura de la suspensión contenida en el dispositivo de carga a no más de aproximadamente 350°C.

60 9. El sistema de la reivindicación 5, que comprende además un recipiente de almacenamiento acoplado a la salida de suspensión del dispositivo de carga.

65 10. El sistema de la reivindicación 5, comprendiendo adicionalmente el dispositivo de descarga una salida de hidrógeno a través de la cual puede pasar hidrógeno desprendido de una suspensión de hidruro.

11. El sistema de la reivindicación 5, que comprende además una bomba acoplada al recipiente de

almacenamiento para transferir una suspensión desde el recipiente de almacenamiento de suspensión de hidruro metálico al medio de transporte.

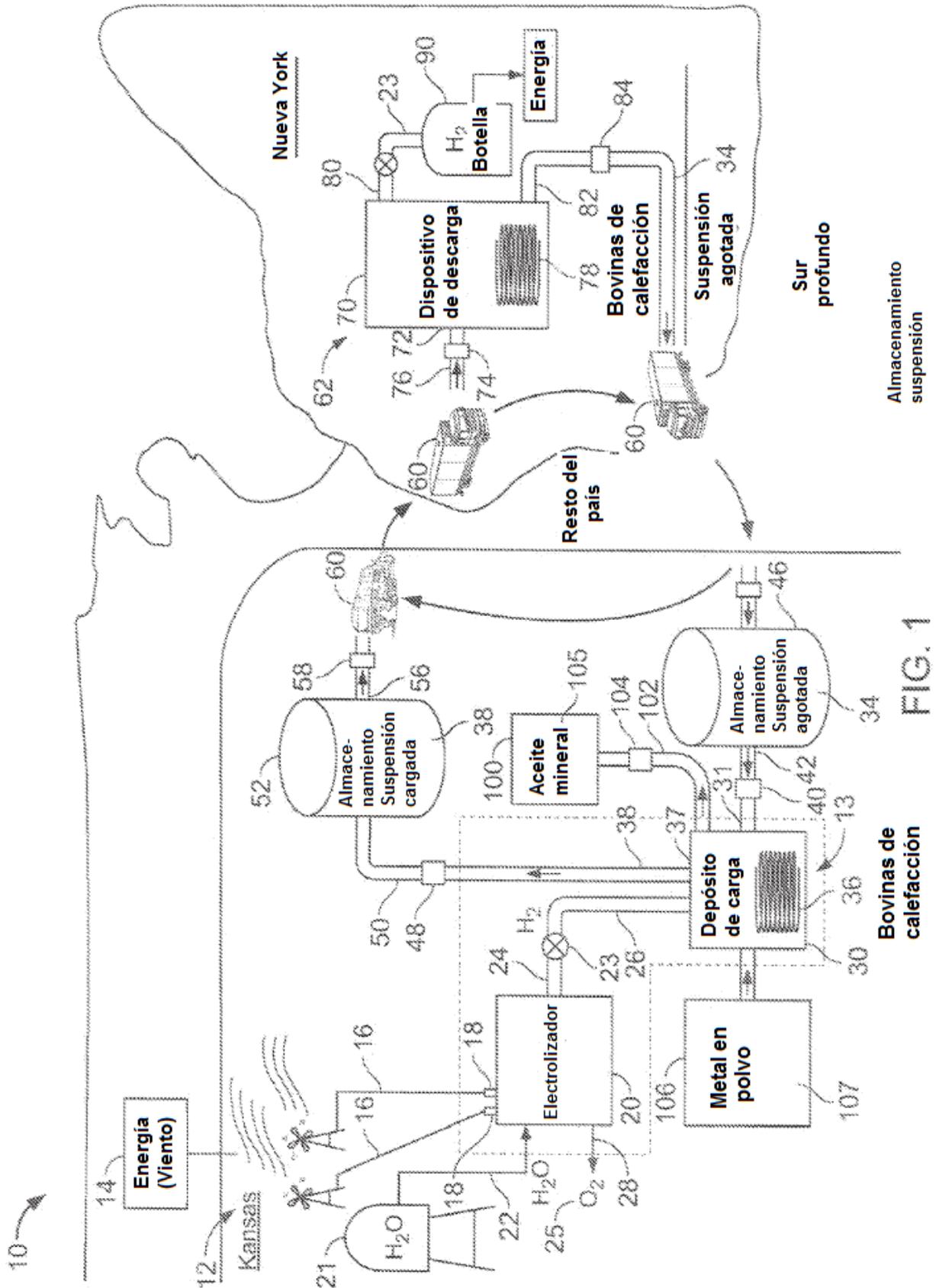


FIG. 1

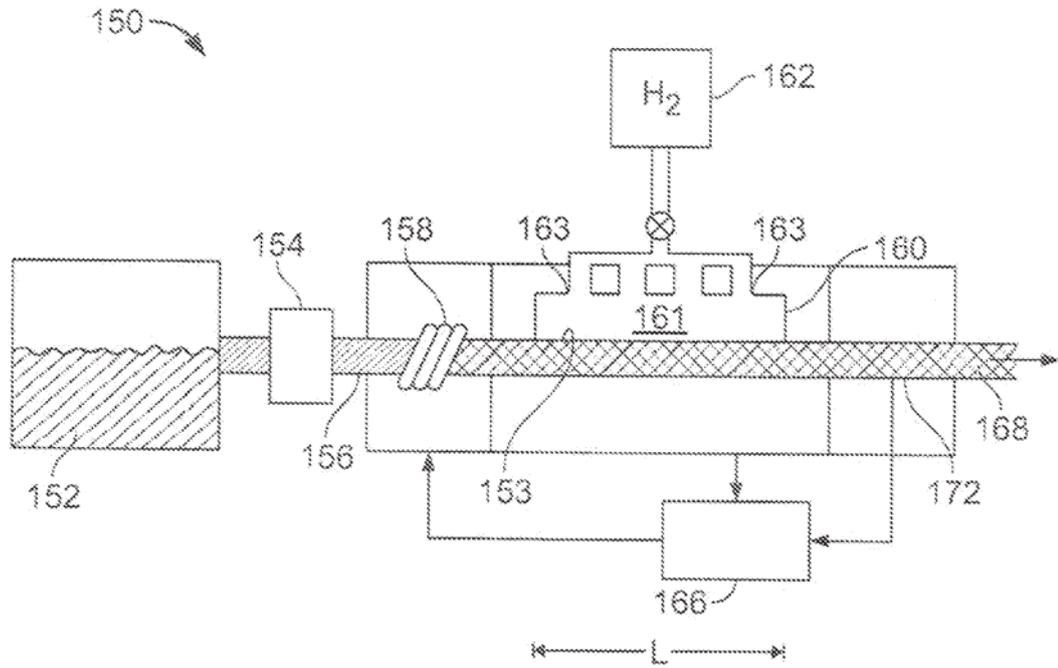


FIG. 2

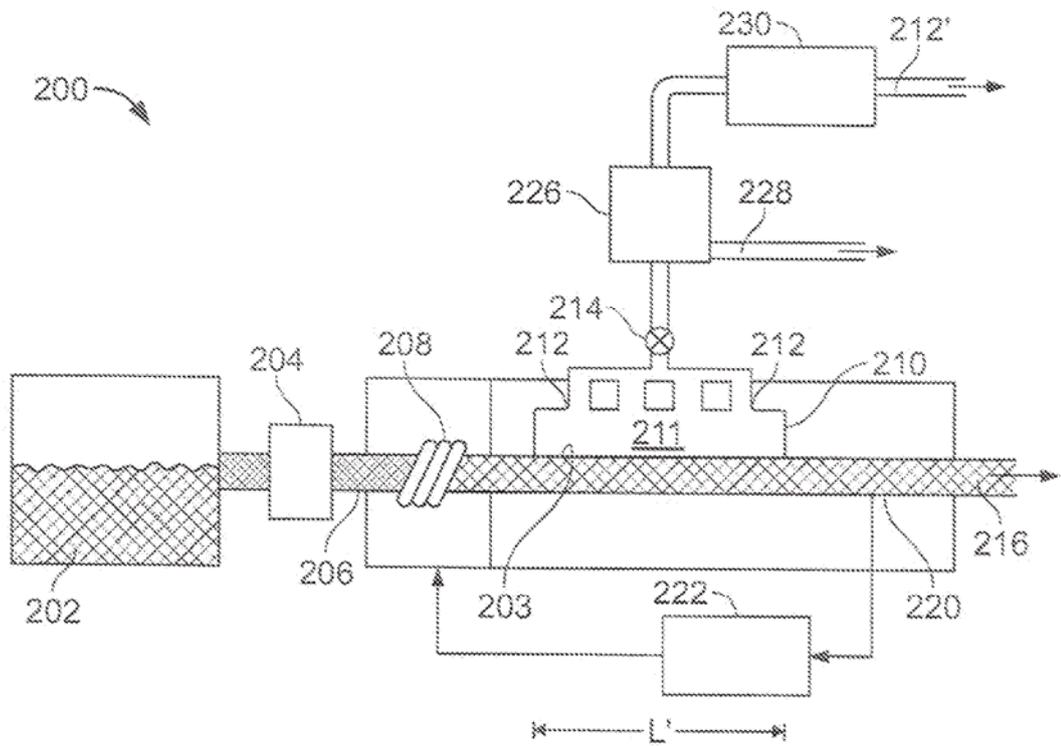


FIG. 3

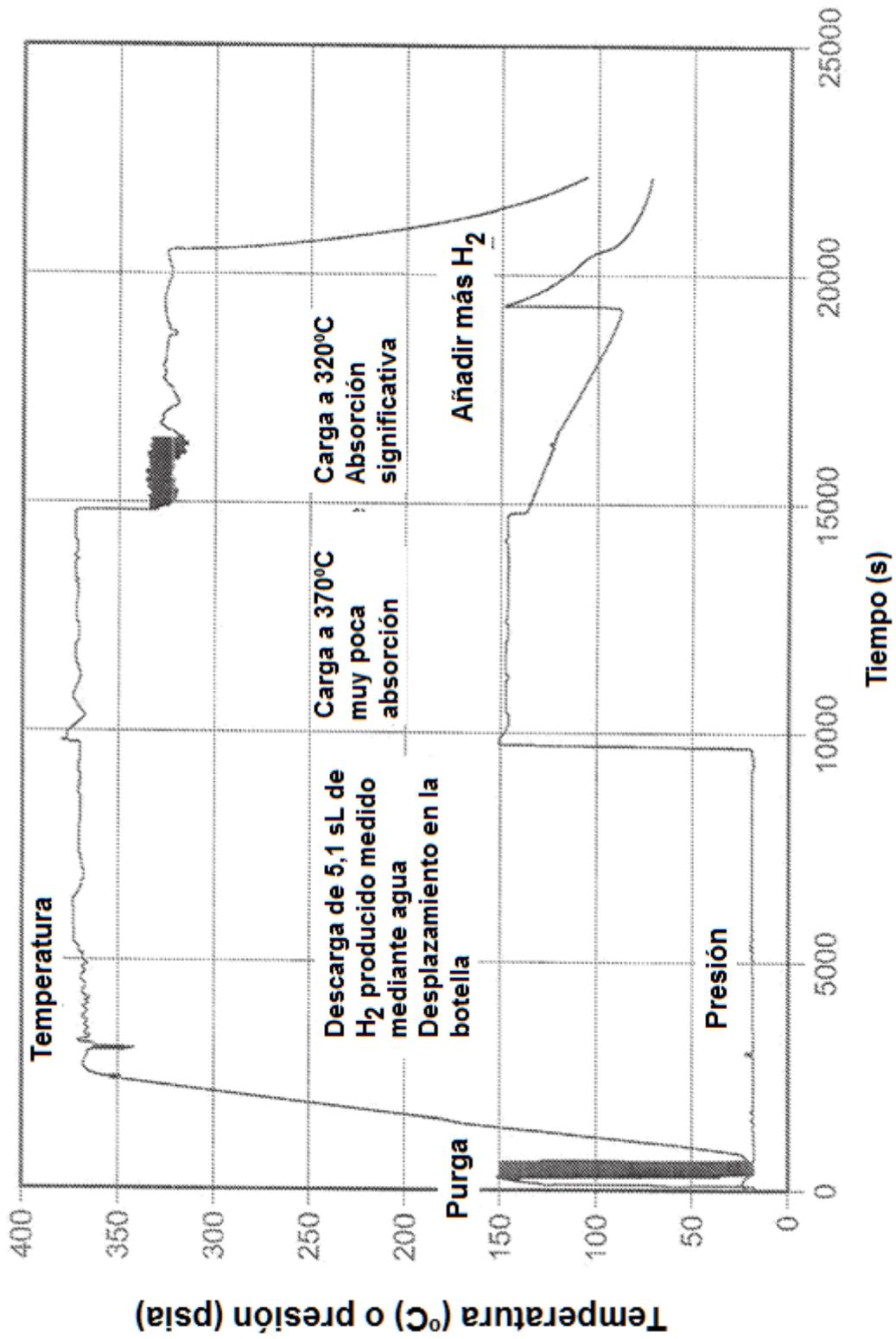


FIG. 4

REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN

La lista de referencias citadas por el solicitante es, únicamente, para conveniencia del lector. No forma parte del documento de patente europea. Si bien se ha tenido gran cuidado al compilar las referencias, no pueden excluirse errores u omisiones y la OEP declina toda responsabilidad a este respecto.

5 Documentos de patente citados en la descripción

- US 04481302 A [0054]
- US 4075312 A [0056]
- US 4142300 A [0056]
- US 4200623 A [0056]
- US 5198207 A [0057]

Literatura no patente citada en la descripción

- Magnesium-Hydride Slurry Technology for Hydrogen Storage. **A. KRISHNAN**. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Materials Research Society, 01 December 2004, vol. 837, 143-149 [0004]
- **W. M. MUELLER ; J. P. BLACKLEDGE ; G. G. LIBOWITZ**. Metal Hydrides. Academic Press, 1968 [0056]