

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 824 676**

51 Int. Cl.:

**B01D 53/62** (2006.01)

**C01F 5/22** (2006.01)

**C01F 5/24** (2006.01)

**B01F 3/18** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **10.04.2015 PCT/EP2015/025018**

87 Fecha y número de publicación internacional: **15.10.2015 WO15154887**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.04.2015 E 15723131 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.07.2020 EP 3129125**

54 Título: **Método de activación de minerales de silicato mineral**

30 Prioridad:

**10.04.2014 GB 201406520**

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

**13.05.2021**

73 Titular/es:

**CAMBRIDGE CARBON CAPTURE LTD. (100.0%)  
3 Charles Babbage Road  
Cambridge, Cambridgeshire CB3 0GT, GB**

72 Inventor/es:

**PRIESTNALL, MICHAEL**

74 Agente/Representante:

**DEL VALLE VALIENTE, Sonia**

ES 2 824 676 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 de activación de minerales de silicato mineral

5 **Campo técnico**

La presente descripción se refiere a métodos para producir silicato mineral activado para su uso en el secuestro de dióxido de carbono, por ejemplo, a partir de gas de combustión, utilizando un proceso que implica la digestión de silicatos minerales metálicos. Además, la presente descripción también se refiere a sistemas para ejecutar los métodos anteriormente mencionados.

**Antecedentes**

Las crecientes concentraciones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera de la Tierra últimamente han causado preocupaciones, ya que las presentes concentraciones son sustanciales a 400 p.p.m. y aumentan a una velocidad de 4 p.p.m. al año. Un factor importante que contribuye a este aumento es la oxidación antropogénica de combustibles fósiles carbonosos, por ejemplo, carbón, petróleo y gas. En el mundo actualmente se consumen aproximadamente 100 millones de barriles de petróleo al día.

Ha habido recientes iniciativas para emplear sistemas de energía más renovables, por ejemplo, turbinas eólicas y sistemas generadores de energía de la marea, así como secuestro de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a partir de gases de combustión que se emiten a partir de plantas que generan electricidad con la combustión del carbón. Por tanto, las iniciativas primarias implican utilizar tecnologías de uso eficiente de energía, que aumentan la fiabilidad de las fuentes renovables y desarrollar tecnologías para el almacenamiento a largo plazo de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). El último campo de la tecnología se conoce como secuestro de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Existen avances significativos en el secuestro de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en los últimos años, y las tecnologías de secuestro de dióxido de carbono han despertado un considerable interés entre los gobiernos, industrias y comunidades científicas. Los métodos anteriores de secuestro de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) experimentaron varios inconvenientes, tales como riesgo de contaminación de agua y la ausencia de espacios de almacenamiento adecuados para recibir el dióxido de carbono secuestrado (CO<sub>2</sub>); un experto en la técnica está familiarizado con estos inconvenientes.

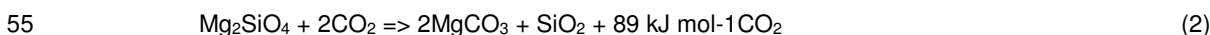
Ha habido un considerable interés en las tecnologías de carbonatación mineral para resolver los problemas mencionados anteriormente asociados con el secuestro de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) conocido. La tesis de máster de Mabell Delgado Torrontegui en ETH en Suiza, "Assessing the Mineral carbonation science and technology" (Evaluación de la ciencia y la tecnología de la carbonatación mineral) (2010), proporciona una visión general de la investigación actual en este campo de la tecnología de secuestro de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Un principio clave de la carbonatación mineral también se conoce como "tecnología de secuestro mineral", en donde el secuestro de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se logra mediante la captura de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en una forma de carbonatos minerales estables. Este secuestro emplea un proceso que es una reacción exotérmica de un óxido metálico y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para formar materiales de carbonato estables como se proporciona en una fórmula de reacción (1):



en donde M es un metal, preferentemente un metal alcalinotérreo tal como calcio o magnesio.

Las fuentes más adecuadas y naturalmente abundantes de estos óxidos metálicos son minerales de silicato de magnesio o calcio tales como olivino, wollastonita, y serpentina. Las reacciones de carbonatación de estos minerales son las siguientes:

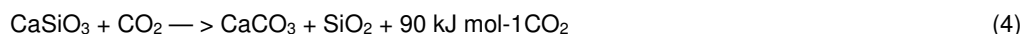
Olivino:



Serpentina:



Wollastonita:



Aunque las reacciones anteriores (2) a (4) son termodinámicamente favorables, las reacciones en la naturaleza tienen, sin embargo, velocidades de reacción relativamente lentas en una escala de tiempo geológica, y son inadecuadas para

procesos industriales. Se han realizado esfuerzos para intentar acelerar estas reacciones. Sin embargo, los esfuerzos tienen varias limitaciones, tales como desperdicio de energía y un alto coste de extracción y transporte de grandes cantidades de roca, así como ineficiencias industriales y medioambientales. Además, los silicatos minerales no se obtienen fácilmente en cantidades y formatos adecuados para permitir que se logre una carbonatación mineral satisfactoria.

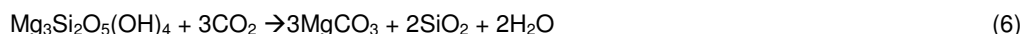
5 En una patente US-7604787B2 (MAROTO-VALER), "Process for sequestering Carbon Dioxide and Sulphur Dioxide" (Proceso para secuestrar dióxido de carbono y dióxido de azufre), se describe un método para reaccionar un material basado en silicato con un ácido para formar una suspensión, que luego se combina con dióxido de carbono para producir una sal metálica, sílice y regenerar ácido en solución. Este método tiene los inconvenientes de ser medioambientalmente agresivo e ineficaz. Además, se describen problemas similares con el enfoque en la solicitud de patente US-2004126293A1 (SHELL INTERNATIONAL RESEARCH), "Process for removal and Capture of Carbon Dioxide from Flue Gases" (Proceso para la eliminación y la captura de dióxido de carbono de los gases de combustión).

15 Aunque las descripciones de la técnica anterior han podido abordar algunos de los problemas de carbonatación mineral mediante sus procesos de secuestro indirectos, existen varios problemas restantes que aún están sin resolver. Estos problemas restantes se refieren a la escalabilidad industrial, la eficiencia medioambiental y el coste.

20 Últimamente, el esfuerzo de las investigaciones se ha enfocado en el secuestro del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) mediante carbonatación "directa" de olivino o serpentina. En estos métodos recientes, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se secuestra sin pretratamiento ácido de la materia prima de silicato. Una reacción de olivino es:



25 Además, para la serpentina, una reacción correspondiente es:



30 Los experimentos para determinar la cinética de estas reacciones (5) y (6) han demostrado que tales reacciones presentan, además, una pobre eficiencia de energía y un alto coste cuando se amplía a una planta industrial. Para acelerar las reacciones (5) y (6), se requieren temperaturas elevadas en un intervalo de 600 °C a 650 °C. En una central eléctrica industrial alimentada por combustible, la obtención de tales altas temperaturas se traduciría hasta una necesidad de aproximadamente 200 KW-h de electricidad por tonelada de materia prima de serpentina. Además, con un combustible fósil que contiene 1 tonelada de carbono, se producen casi 3,7 toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Cada tonelada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) consume más de 2 toneladas de serpentina durante la carbonatación. Combinado con un paso de precaptura para separar y presurizar CO<sub>2</sub> del gas de combustión, la energía requerida para la deshdroxilación de serpentina es de alrededor de 20-30 % de la salida de energía total de dicha central eléctrica industrial alimentada por combustible. Todas estas consideraciones provocan una enorme penalización energética que amenaza la viabilidad económica de este proceso de retención.

45 En una patente publicada con el n.º US-8114374B2 (BLENCOE), "Carbonation of metal Silicates for long-term CO<sub>2</sub> sequestration", se describe un método (en lo sucesivo "método de Blencoe") para hacer reaccionar un silicato con un hidróxido de metal alcalino en una solución acuosa. Después, la reacción con dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se usa para carbonatar el metal anteriormente contenido en el silicato de metal. Este método tiene desventajas de ineficacias y deficientes propiedades generales de captura de carbono. El método de Blencoe comprende tres pasos:

- (1) hacer reaccionar un silicato de metal con un hidróxido de metal alcalino cáustico para producir un hidróxido del metal anteriormente contenido en el silicato;
- 50 (2) hacer reaccionar dióxido de carbono con al menos uno de un hidróxido de metal alcalino cáustico y un silicato de metal alcalino para producir al menos un carbonato de metal alcalino y un bicarbonato de metal alcalino; y
- (3) hacer reaccionar el producto de hidróxido metálico del paso (a) con al menos uno del carbonato de metal alcalino y el bicarbonato de metal alcalino producido en el paso (b) para producir un carbonato del metal anteriormente contenido en el silicato de metal del paso (a).

55 En el primer paso (1) de Blencoe, el hidróxido de metal alcalino está en una solución acuosa que limita la temperatura de reacción máxima a la presión de vapor de la solución acuosa a la presión en la cual se lleva a cabo la reacción. Una temperatura de reacción baja limita la velocidad de la reacción a la presión atmosférica, mientras que el uso de un recipiente presurizado aumenta los costes del proceso. Los hidróxidos de metal alcalino, tales como NaOH y KOH, utilizados en los pasos (1) y (2) son productos químicos de energía intensiva y costosos de fabricar. En el segundo paso (1) de Blencoe, se usa hidróxido de metal alcalino, adicional al que se usa en el paso (1), para reaccionar con el dióxido de carbono. En el segundo y tercer pasos (2) y (3) de Blencoe, se requiere una presión elevada, concretamente que tiene los costes implícitos de un recipiente a presión, en el intervalo entre la presión de vapor de agua a la temperatura y bares de la reacción. Es dudoso que el proceso general descrito pueda secuestrar más dióxido de carbono como un carbonato de metal que se genera como consecuencia de la producción de los hidróxidos de metal alcalino consumidos en el proceso, o que el proceso

sea cualquier proceso más económico de operar que los procesos de secuestro de dióxido de carbono descritos en la técnica anterior.

5 Por lo tanto, existe una necesidad urgente de desarrollar un proceso que sea eficaz energéticamente, que tenga un alto rendimiento y que sea más rentable que el estado de la técnica, de modo que pueda utilizarse industrialmente.

10 A partir de lo anterior, se apreciará que los métodos conocidos para procesar y los sistemas para la carbonatación mineral y el secuestro de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), no son ni óptimos por su forma de operación ni adaptables a aplicaciones más amplias de una manera rentable.

### Resumen

15 La presente invención busca proporcionar un método mejorado de activación de minerales de silicato de magnesio mediante conversión en hidróxido de magnesio.

Esta realización de la invención permite un método de uso industrial a gran escala y carbonatación continua sin cámaras o equipos de presión avanzados.

20 La presente invención proporciona un método para la activación de minerales de silicato de magnesio mediante conversión en hidróxido de magnesio, en donde el método comprende:

a. mezclar un polvo seco de roca de silicato de magnesio con un polvo seco de al menos un compuesto de metal alcalino seleccionado de un grupo que comprende hidróxido, carbonatos, bicarbonatos de metal alcalino, para formar una mezcla sólido-sólido en seco con una relación molar en el intervalo de 1-3 moles de metal alcalino por mol de silicio en la mezcla;

25 b. calentar la mezcla sólido-sólido en seco a una temperatura inferior a 300 °C en un recipiente no presurizado por un tiempo inferior a 4 horas para formar un producto sólido de vidrio que comprende predominantemente una mezcla de hidróxido de magnesio y silicato de metal alcalino; y

30 c. disolver el producto sólido de vidrio en solución acuosa para formar una suspensión acuosa líquida alcalina, que comprende productos de fase sólida y acuosa.

Opcionalmente, el método incluye la suspensión líquida del paso c que se separa en productos de fase sólida y de solución acuosa.

35 Opcionalmente, el método incluye hacer reaccionar cualquiera de las fases acuosas a presión atmosférica con un gas que comprende 0,04 %-100 % de CO<sub>2</sub>.

Opcionalmente, el método incluye mezclar el producto en fase sólida con agua y hacer reaccionar a presión atmosférica con un gas que comprende 0,04 %-100 % de CO<sub>2</sub>.

40 Opcionalmente, el método incluye aire o gas de combustión como el gas en la reacción. Esto permite una solución muy simple y rentable que utiliza lo que está disponible en el lugar de operación.

Opcionalmente, el método incluye el uso de un hidróxido o un carbonato de sodio o un potasio como el compuesto de metal alcalino en la reacción.

45 Opcionalmente, el método incluye una serpentina o una roca de olivino como el mineral de silicato de magnesio en la reacción. Además, opcionalmente, el método incluye calentar el recipiente no presurizado en el paso (b) a una temperatura en el intervalo de 140 °C - 220 °C.

50 Opcionalmente, el método incluye la adición continua del mineral de silicato de magnesio y el compuesto de metal alcalino del paso (a), permitiendo a la vez la reacción continua de este en las condiciones del paso (b) y además eliminando continuamente el producto del paso (b).

55 Opcionalmente, el método incluye la relación molar de sustancialmente 2 moles de metal alcalino por mol de silicio en la mezcla.

60 Se deducirán otros aspectos, ventajas, características y objetos de la presente invención a partir de los dibujos y la descripción detallada de las realizaciones ilustrativas interpretadas junto con las reivindicaciones anexas que siguen. Se apreciará que las características de la presente invención son susceptibles de combinarse en varias combinaciones de diferentes realizaciones sin abandonar el alcance de la presente invención definido por las reivindicaciones anexas.

### Descripción de los dibujos:

65 El sumario anterior, así como la siguiente descripción detallada de realizaciones ilustrativas, se comprende mejor al leerlo junto con los dibujos anexas. Para ilustrar la presente invención, se muestran estructuras ilustrativas de

la descripción en los dibujos. Sin embargo, la presente invención no se limita a métodos y aparatos específicos descritos en la presente descripción. Además, los expertos en la técnica entenderán que los dibujos no están a escala. En la medida de lo posible, los elementos similares se han indicado con números idénticos.

5 La Fig. 1 es una ilustración de un diagrama de flujo de un paso 1 de digestión que implica la digestión alcalina de serpentina u olivino para convertirlos en brucita y sílice;

la Fig. 2 es una ilustración de un diagrama de flujo de un paso 2 de carbonatación que implica la carbonatación  
10 directa de brucita, concretamente hidróxido de magnesio, con gas de combustión para formar carbonato de magnesio;

las Figs. 3a y 3b son ilustraciones de patrones XRD de muestras seleccionadas, en donde los productos sólidos de la disolución de dunita, concretamente una forma de olivino, usando una solución de hidróxido de sodio (NaOH) en un intervalo de 15 a 40 mol/kg (izquierda) de concentración, y usando una solución de hidróxido de sodio (NaOH) de  
15 soluciones de 50 mol/kg (derecha) de concentración. En las ilustraciones, se emplean las siguientes abreviaturas: Fo = forsterita, Brc = brucita, Clc = clinocloro, En = enstatita, Srp = serpentina, Tic = talco, Spl = espinela;

las Figs. 4a y 4b son ilustraciones de curvas de TG (4a) y DTG (4b) de muestras seleccionadas: productos sólidos a partir de la disolución de dunita a una temperatura de 180 °C durante 15 durante 6 horas con diferentes  
20 concentraciones de solución de hidróxido sódico (NaOH);

la Fig. 5 es un gráfico en donde se muestran concentraciones de  $Mg(OH)_2$  en productos sólidos en base a los resultados de la TG: La dunita se disolvió a una temperatura de 180 °C con diferentes concentraciones de solución de hidróxido sódico (NaOH), concretamente medido como moles de NaOH por kg de agua. A partir del gráfico, se  
25 apreciará que la proporción de dunita, concretamente silicato de magnesio, convertido a brucita, concretamente hidróxido de magnesio, aproximadamente aumenta linealmente con un aumento en la concentración de NaOH; la extrapolación de este gráfico indica que la proporción de brucita en el producto sólido debería aproximarse al 100 % por encima de una concentración de  $NaOH > 70$  mol/kg, de manera concreta, equivalente a una relación de  $NaOH:H_2O > 1,26$ ;

la Fig. 6 es una ilustración de patrones XRD de productos sólidos a partir de la disolución de dunita a 180 °C con solución de hidróxido sódico (NaOH) que tiene una concentración molar de 40 mol/kg de solución, para diferentes  
30 duraciones temporales;

las Figs. 7a y 7b son ilustraciones de curvas de TG (7a) y DTG (7b) de productos sólidos a partir de la disolución de dunita a una temperatura de 180 °C con solución de hidróxido sódico (NaOH) que tiene una concentración molar de 40 mol/kg para diferentes duraciones temporales;

la Fig. 8 es un gráfico en el que se muestra la concentración de hidróxido de magnesio  $Mg(OH)_2$  en productos sólidos basado en los resultados de TG: La dunita se disolvió a una temperatura de 180 °C con una  
40 concentración molar de solución de hidróxido sódico (NaOH) de 40 mol/kg para diferentes duraciones;

la Fig. 9 es una ilustración que muestra el QPA por refinado de Rietveld de dunita en bruto, en donde: perfil de puntos de datos = patrón experimental; perfil continuo = modelo calculado (arriba); gráfico de diferencia (abajo);  
45

la Fig. 10 es una ilustración que muestra el QPA por refinado de Rietveld de dunita disuelta mezclada con 10 % en peso de silicio, en donde: perfil de puntos de datos = patrón experimental; perfil continuo = modelo calculado; y

las Figs. 11a y 11b son ilustraciones que muestran la cuantificación de brucita con el refinado de Rietveld y TGA (Fig. 11a), en donde las concentraciones de forsterita y brucita se obtuvieron a través del QPA por refinado de Rietveld de muestras seleccionadas (Fig. 11b).  
50

Las Figs. 12a y 12b representan datos experimentales relativos a la eliminación de  $CO_2$  por medio de brucita en polvo en suspensión acuosa, específicamente, el nivel de  $CO_2$  resultante para un gas de salida monitorizado después del procesamiento.  
55

En los dibujos adjuntos, se emplea un número subrayado para representar un elemento sobre el que se coloca el número subrayado o un elemento al que está adyacente el número subrayado. Un número no subrayado se refiere a un elemento identificado por una línea que vincula el número no subrayado al elemento. Cuando un  
60 número no está subrayado y está acompañado por una flecha asociada, el número no subrayado se utiliza para identificar un elemento general al que la flecha apunta.

### Descripción detallada de las realizaciones

65 La siguiente descripción detallada ilustra realizaciones de la presente descripción y formas en las que pueden implementarse.

En la Fig. 1, se muestra un proceso de digestión **100**, en donde tiene lugar la digestión alcalina de un material basado en silicato, una materia prima de origen natural que contiene silicato de magnesio o de calcio, tal como serpentina, olivino, dunita, y/o wollastonita **101**. El proceso **100** produce productos de reacción generados, concretamente una conversión en brucita y sílice en un caso de olivino **101** que es un mineral de materia prima empleado. En la reacción, el olivino **101** es alimentado a un reactor con agitación continua **102** junto con un álcali **103** y se proporciona calor desde una fuente de calor **104**. El álcali se selecciona de forma ventajosa a partir de un hidróxido mineral. Entre los muchos hidróxidos metálicos que pueden encontrar utilidad en esta reacción, un álcali preferible utilizado es hidróxido de sodio (NaOH).

La mezcla de reacción del proceso de digestión **100** comprende una relación estequiométrica entre el material basado en silicato soluble y el hidróxido sólido del compuesto alcalinotérreo de aproximadamente 1:2. Esta relación estequiométrica tiene como objetivo minimizar la entrada del compuesto alcalino, tal como hidróxido de sodio (NaOH), en la mezcla de reacción inicial. Esto limita la regeneración de hidróxido de sodio (NaOH) a partir de carbonatos al final de la reacción, lo cual es costoso y consume mucho tiempo. La mezcla de reacción es una mezcla en seco.

Según otra realización, la mezcla de reacción es una mezcla en estado sólido en seco de un polvo del silicato de alcalinotérreo y el compuesto de metal alcalino, en la relación estequiométrica de un mol de silicio, concretamente en el silicato, por dos moles de metal alcalino. Los compuestos de metal alcalino sólidos, tales como NaOH, KOH y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , tienen puntos de fusión altos, concretamente 318 °C, 406 °C y 851 °C, respectivamente. Se podría esperar que utilizar un sistema acuoso, tales como los descritos por Blencoe, es esencial para conseguir una mezcla y reacción a temperaturas inferiores a 300 °C. Sorprendentemente, en experimentos con el uso de NaOH y serpentina, concretamente silicato de magnesio, se ha descubierto que una mezcla en estado sólido en seco de los dos se funde, se mezcla y reacciona rápidamente para formar hidróxido de magnesio en un recipiente no presurizado a temperaturas tan bajas como 180 °C, específicamente por debajo de la temperatura de fusión del NaOH, concretamente 318 °C, o de la serpentina, concretamente >1700 °C. A diferencia del olivino, la serpentina tiene una estructura cristalina que contiene grupos hidróxido químicamente unidos, y se cree que estos grupos pueden facilitar la reacción estequiométrica en seco para formar hidróxido de magnesio.

La dunita también se puede utilizar para producir  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  mediante reacción en estado sólido, con una relación preferida de dunita a NaOH en una relación molar de 1:2, a una temperatura de alrededor de 180 °C. Los experimentos realizados con un intervalo de proporciones molares de dunita:NaOH de 1:0,5, 1:1, 1:0,5 y 1:2, donde el polvo se ha formado en gránulos mediante compactación con una prensa manual (3 toneladas durante 1 minuto para compresión), dio resultados que indican un aumento lineal de producción de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  con el aumento de NaOH, hasta un porcentaje en peso máximo de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  en los productos de reacción de alrededor de 46,7 %. Reducir la cantidad de NaOH disminuyó significativamente la eficiencia de extracción del proceso.

En contraste, los resultados de los experimentos no inventivos, como se proporcionan en las Figs. 3a, 3b, 5, con NaOH acuoso y olivino muestran que las condiciones de reacción mínimas de una temperatura de 180 °C y una concentración de NaOH de 40 mol/kg se requieren sustancialmente para formar hidróxido de magnesio; este sistema requiere un recipiente a presión para alcanzar una temperatura de reacción requerida.

Para el caso de las muestras de dunita, la comparación de los resultados citados anteriormente con digestión alcalina de dunita con 50 mol/kg de sistema acuoso de NaOH a 180 °C en un periodo de tiempo similar, muestra que el rendimiento de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  mediante reacción en estado sólido (55 % a 62 %) estaba a la par con el producido usando el sistema acuoso (entre 58 % y 66 %). La digestión alcalina con 50 mol/kg de NaOH requirió significativamente más NaOH por 1 gramo de dunita procesada de manera que la reacción en estado sólido alcanzó un 97 % a 99 % de reducción del consumo de NaOH. Más adelante se detallan resultados experimentales adicionales que comprenden dunita como un componente de la muestra.

Generalmente, se ha demostrado que es posible extraer  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  a partir de magnesio que contiene minerales de silicato a través de una reacción en estado sólido con NaOH y que el consumo del reactivo alcalino se puede reducir, logrando un rendimiento significativo de la reacción. Una ventaja adicional es la reducción del consumo de agua que sería necesario para un proceso acuoso.

Además, los resultados también han mostrado, concretamente en la Fig. 5, que sin agua, la concentración de NaOH (mol/kg) se acerca eficazmente al infinito y, por lo tanto, podría esperarse que se aproxime al 100 % de conversión de silicato de magnesio en hidróxido de magnesio. En comparación con el sistema de reacción acuoso, como se ejemplifica por Blencoe, los beneficios claros de la mezcla en seco no acuosa y el sistema estequiométrico que usan serpentina son los siguientes:

- (i) no se requiere un recipiente a presión;
- (ii) la fusión y el mezclado ocurren, sorprendentemente, a 180 °C, para permitir una reacción rápida a una velocidad similar a un sistema acuoso;
- (iii) se permite una concentración y actividad lo más alta posible de NaOH, lo que conduce a una reacción más rápida y más completa que la posible en un sistema acuoso a una temperatura similar;

(iv) el NaOH se consume totalmente en una reacción con silicato para formar silicato sódico sólido, de manera que no se requiere un proceso subsiguiente para la recuperación del exceso de NaOH de los productos de reacción;

(v) la serpentina proporciona cualquier agua requerida para la conversión estequiométrica en hidróxido de magnesio de sus grupos hidróxido estructurales, de manera que no es necesario añadir agua libre al sistema de reacción;

(vi) los productos de reacción, que no contienen NaOH en exceso, son un vidrio solidificado que es sustancialmente menos cáustico que en el proceso acuoso y, por lo tanto, son mucho más seguros de manipular;

(vii) el silicato de sodio está fácilmente separado de los productos de la reacción mediante disolución y filtración, y está disponible sin contaminación con NaOH; y

(viii) el proceso puede llevarse a cabo de forma más fácil y económica en yacimientos mineros remotos de serpentina u olivino donde el agua puede no estar disponible.

Además, en la técnica anterior de Blencoe se describe cómo el paso inicial (a) se puede realizar a una presión ligeramente por debajo de la presión de vapor del agua pura para la temperatura de ese paso. Blencoe no reivindica una temperatura o presión o composición de solución acuosa preferida para el paso inicial (a), pero en una tabla de resultados experimentales muestra que todas las reacciones en las cuales se convierten serpentina u olivino en una fase importante de brucita se hacen en una solución acuosa en un recipiente a presión a una temperatura de 200 °C y una presión <0,51 MPa (15 atm). Un experimento realizado a una temperatura de 22 °C y una presión de 0,10 kPa (1 atm) durante 72 horas resulta en la conversión a una fase menor de brucita; posteriormente, la reacción adicional subsiguiente a 200 °C y < 1500 kPa (15 bar) se convierte, sustancialmente, en brucita con una fase residual menor de serpentina. A pesar de la afirmación de Blencoe de la ventaja tecnológica y comercial de evitar un equipo intensificador de la presión, a la temperatura de reacción efectiva de 200 °C para el paso (a) de Blencoe, la presión de vapor del agua pura está justo por encima del bar, lo que indica que se debe usar en este paso un recipiente a presión. La presente invención permite que el método y sistema funcionen sin un equipo costoso y complicado usado en Blencoe para funcionar a una presión superior a la atmosférica.

En el ejemplo de carbonatos de magnesio producidos según el método descrito, se produce un amplio intervalo de compuestos que incluyen bicarbonato de magnesio  $Mg(HCO_3)_2$  soluble, pero no genera agua separada en la reacción de carbonatación:



El álcali **103** preferido para este proceso de digestión es de forma ventajosa hidróxido de sodio o hidróxido de potasio. También es posible usar carbonato de sodio, bicarbonato de sodio, carbonato de potasio y bicarbonato de potasio como el álcali durante el proceso de digestión.

La fuente de calor **104** se emplea para elevar una temperatura del proceso de digestión, mientras se implementa la agitación de la mezcla, a una temperatura inferior a 250 °C y durante un período temporal inferior a 6 horas. Un intervalo preferido de temperatura es de 140 °C a 220 °C. La reacción se puede realizar mejor con la temperatura inferior a 200 °C y, con máxima preferencia, alrededor de 180 °C, durante todo el proceso, como se muestra en los resultados de la Fig. 4 a la Fig. 8. Los recipientes de digestión usados son el Teflon (PTFE) más adecuado para soportar el NaOH concentrado y caliente con la temperatura máxima de operación habitualmente especificada a 220 °C. Los experimentos con materias primas minerales de silicato de magnesio han demostrado excelentes resultados para este proceso.

Este proceso de digestión se lleva a cabo, preferentemente, a una presión inferior al bar, en donde 100 kPa (1 bar) corresponde a la presión atmosférica nominal a nivel de mar. La reacción se puede llevar a cabo con mayor preferencia a una presión inferior a 1000 kPa (10 bar). La reacción se puede llevar a cabo, además, preferentemente, en condiciones de presión menores que la presión de vapor del agua pura a la temperatura de reacción. El beneficio de no tener que usar recipientes de alta presión para llevar a cabo reacciones hidrotérmicas ahorra costes y también mejora las aplicaciones de la tecnología en aplicaciones industriales en volúmenes muy altos e instalaciones a gran escala.

El proceso, después de la digestión de olivino, se muestra en la ecuación **112**. En este caso, la brucita ( $Mg(OH)_2$ ) **107**, fase sólida, se separa de una solución de silicato **108**. Después de eso, se lleva a cabo el proceso de precipitación de sílice como se representa en las ecuaciones **113** y **112**. El proceso, concretamente la precipitación ácida, se puede llevar a cabo mediante la adición de bien dióxido de carbono ( $CO_2$ ) o bien ácido **110**. El exceso de álcali **111** se recupera y se retroalimenta a una cámara del reactor **102**. Realizar el proceso de digestión en condiciones de presión atmosférica evita la necesidad de emplear un equipo para aumentar la presión, por ejemplo, un autoclave, y permite obtener un secuestro continuo a una gran escala de emisiones de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) industrial. Evitar el requisito de cualquier contención presurizada de los pasos de reacción, proporciona varios beneficios:

(i) se pueden usar recipientes de reacción mucho más económicos y sencillos;

(ii) es más fácil y más barato incorporar la mezcla, agitación y/o desgaste de partículas para mejorar las velocidades de reacción dentro de un recipiente de reacción no presurizado;

(iii) el uso de energía, concretamente la energía desperdiciada en la presurización/despresurización, es inferior;

(iv) el rendimiento de producto es más rápido, concretamente se evita una necesidad de tiempo para presurizar; y

(v) aunque los sistemas de reacción presurizados tienden a funcionar en modo discontinuo, es mucho más fácil configurar cada paso y también el proceso global, como una operación continua en un sistema no presurizado.

La operación continua es generalmente reconocida por los ingenieros de procesos como preferible para las operaciones discontinuas porque:

(a) los parámetros de reacción, tales como temperatura, pH y concentraciones de reactivos son más fáciles de mantener en niveles óptimos fijos; y

(b) los tiempos de permanencia son más cortos, lo que permite que el equipo de proceso sea más pequeño y más barato y un rendimiento del producto más alto.

En la Fig. 2, se proporciona una ilustración de los detalles de un proceso de carbonatación **200** como también se muestra en las ecuaciones **206** y **207**. El polvo de brucita ( $Mg(OH)_2$ ) **205** se alimenta a un reactor continuo **201**, junto con un gas de combustión **204**. El gas de combustión descarbonizado **202** y polvo de carbonato de magnesio ( $MgCO_3$ ) **203** son los productos de reacción de este proceso de carbonatación **200**.

En una realización adicional de la presente invención, el polvo de  $Mg(OH)_2$  (Brucita) se proporciona como añadido al agua para formar una suspensión acuosa que se usa posteriormente a temperatura y presión ambientes para depurar  $CO_2$  de una mezcla gaseosa de nitrógeno ( $N_2$ ) y  $CO_2$ . El proceso de depuración que usa brucita húmeda que elimina simultáneamente el  $CO_2$  de la mezcla de gas y convierte la brucita en carbonatos de magnesio. Se puede lograr una eliminación y conversión sustancial de tal manera que la mayoría, si no todo, del  $CO_2$  se extrae de la mezcla de gas y la mayoría, si no toda, la brucita se convierte.

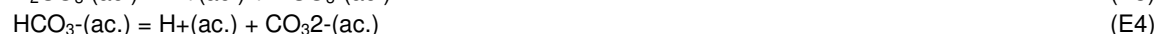
Después de un ejemplo particular de esta realización adicional de la invención, se considera el siguiente experimento:

Una mezcla de gas de (nitrógeno)  $N_2$  que contiene 4-5 % de  $CO_2$  (dióxido de carbono, premezcla de cilindro) se burbujeó continuamente a un caudal fijo (alrededor de 2,25 litros/minuto) a través de un volumen circulante fijo (alrededor de 10 litros) de agua (presaturada antes del experimento con  $CO-N_2$  al 5 %) que contenía una suspensión de polvo de hidróxido de magnesio (0,871 mol, 50,8 gramos). La concentración de  $CO_2$  en el gas de salida fue inicialmente cero (a medida que se eliminó completamente mediante la reacción con brucita) y se monitoreó al consumirse las partículas de brucita suspendidas en la reacción para formar bicarbonato de magnesio disuelto. Se tomaron muestras periódicas del líquido circulante para monitorear el cambio en el pH y la concentración de iones magnesio. El experimento concluyó cuando la concentración de  $CO_2$  en el gas de salida había aumentado hasta igualar el de la concentración de entrada, lo que indica que no se estaba produciendo ninguna reacción adicional. El experimento tardó aproximadamente 12 horas en completarse y se ejecutó a lo largo de dos días con una noche de apagado.

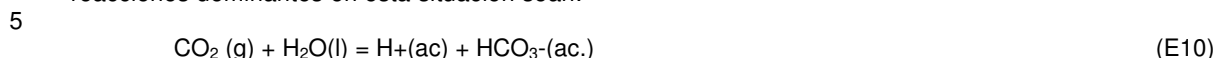
Se usó un Down-flow Gas Contactor (interruptor de gas de flujo descendente - DGC, WRK Design & Services Ltd) con un volumen de líquido de alrededor de 10 litros como reactor de gas-líquido. En este reactor, la mezcla de gas a presión atmosférica se introdujo en la parte superior de una columna de burbujas, se arrastró en un flujo de líquido circulante descendente. La velocidad de recirculación de líquido en el reactor DGC (alrededor de 10 litros/min) se ajustó para mantener una interconexión líquido-burbuja estable. El gas agotado de  $CO_2$  salió del fondo de la columna después de la reacción y de la separación de la fase líquida recirculante. Se midió el caudal de gas mediante rotámetro de tubo de vidrio calibrado a 2,25 litros/minuto fijo (presión atmosférica).

La concentración de  $CO_2$  se midió mediante el uso de un registrador de datos infrarrojo en línea calibrado (intervalo: 0-5 % de  $CO_2$  medido hasta lo más próximo de 0,25 %). La temperatura era ambiente, en un intervalo de 9,5-11 °C. El pH de la solución estaba en un intervalo de pH 8.2-8.9.

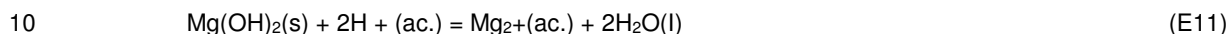
El reactor DGC proporciona un área interfacial grande y dinámica entre las burbujas de gas y el líquido circulante. Durante el transcurso del experimento, el  $CO_2$  se disuelve del gas (g) en la fase líquida (l) (o fase acuosa, ac.) y las reacciones se producen con las partículas de brucita suspendidas (fase sólida que se etiqueta como s):



En solución alcalina, la solubilidad de la brucita es muy conocida por ser insignificante mientras que el CO<sub>2</sub> se disuelve fácilmente. En el intervalo de pH del experimento, el pH cae dentro del intervalo de 8.2-8.9, la forma predominante de carbono en solución es el ion bicarbonato HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (ac). Por lo tanto, se puede esperar que las reacciones dominantes en esta situación sean:



y



15 A un pH más alto, donde los iones carbonato dominan, se esperaría la formación de fases de carbonato de magnesio sólido y, además, podrían precipitarse sobre la superficie de las partículas de brucita suspendidas, bloqueando la brucita para una reacción adicional con CO<sub>2</sub>. A un pH inferior, se inhibiría la disolución del CO<sub>2</sub>. Sin embargo, a un pH de 8-9, en donde los iones bicarbonato se encuentran bastante en exceso de iones carbonato, la formación de las fases de carbonato de magnesio sólido debe ser mínima, con el resultado de que las partículas de brucita suspendidas deberían reaccionar totalmente con CO<sub>2</sub>, idealmente en una relación molar de 1:2, para formar una solución acuosa de bicarbonato de magnesio.

20 Las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el gas de salida fueron registradas con registradores de datos en forma continua. Se tomaron mediciones ocasionales de la concentración de CO<sub>2</sub> de entrada (fija). Los datos resultantes se muestran en los dos diagramas: uno para el día 1 que detalla los resultados 1200 (Fig. 12a) y uno para el día 2 que detalla los resultados 1201 (Fig. 12b), 5 que muestra la concentración de CO<sub>2</sub> (% de CO<sub>2</sub>) frente al tiempo.

25 Análisis: La cantidad total de CO<sub>2</sub> eliminado del gas de entrada se calcula a partir del caudal de gas medido y la diferencia medida entre la concentración de entrada y de salida de gas:

$$\text{CO}_2 (\text{moles}) = \text{caudal (litros/min)} \times ([\% \text{ de CO}_2] \text{ dentro} - [\% \text{ de CO}_2] \text{ fuera}) / 22,4 (\text{litros/mol}) \times \text{tiempo (min)} \quad (\text{E12})$$

30 La indeterminación de la medición del caudal (rotámetro) se estima a partir de las especificaciones del rotámetro como 3 %. El medidor de CO<sub>2</sub> solo pudo medir al 0,5 % más cercano en un intervalo de concentración de CO<sub>2</sub> de 0-5 %. Además, la concentración de CO<sub>2</sub> del gas de entrada del cilindro de la premezcla se midió en momentos diferentes en el experimento como 4 % y 5 %. La indeterminación absoluta en el % de cambio de concentración de CO<sub>2</sub> medido se calcula al 0,7 % de CO<sub>2</sub>.

35 La cantidad total de CO<sub>2</sub> eliminada del gas de entrada durante el transcurso de las 12 horas del experimento se midió como 1,87 moles (± 0,2 moles). Dentro del error experimental, esta es la cantidad de CO<sub>2</sub> que se espera que se haya eliminado si todos los 0,871 moles de la brucita inicial reaccionaron con CO<sub>2</sub> para formar bicarbonato de magnesio disuelto según la reacción (E7) anterior. Dentro de los límites de los errores de medición, los resultados muestran que la utilización del 100 % (carbonatación) de brucita es factible al depurar en húmedo 5 % de la mezcla de gas CO<sub>2</sub>- N<sub>2</sub>.

45 Los resultados muestran también que para las primeras 3,5 horas del período experimental de 12 horas, la eliminación de CO<sub>2</sub> desde el 5 % de mezcla de gas CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> de entrada fue 100 %. Durante las primeras 6 horas (primer día), la eliminación de CO<sub>2</sub> promedia 93 % y sobre las 12 horas totales promediaron 62 %. Los resultados muestran que una suspensión de brucita - agua puede depurar completamente el CO<sub>2</sub> de mezclas de gas diluidas.

50 Puede esperarse que en un futuro sistema de depuración industrial de CO<sub>2</sub>, en el que las velocidades de adición de agua, brucita y CO<sub>2</sub> pueden controlarse para mantener el pH dentro de un intervalo de alrededor de pH 8 a pH 9, y en donde se elimina el bicarbonato de magnesio, la eliminación continua de CO<sub>2</sub>, controlable hasta 100 %, debe ser posible y/o simultánea con hasta 100 % de conversión de brucita en carbonatos de magnesio.

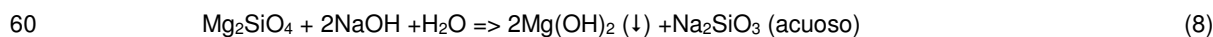
55 Haciendo referencia a “sin presurizar” mencionado anteriormente, es opcionalmente factible ventilar el aparato para implementar realizaciones de la presente descripción directamente a la atmósfera ambiental, concretamente, sustancialmente 100 kPa (1 bar) de presión, evitando así la necesidad de usar recipientes a presión caros. Sin embargo, opcionalmente, las realizaciones de la presente descripción se operan de manera sustancialmente no presurizada a presiones en un intervalo de 50 kPa (0,5 bar) a 1000 kPa (10,0 bar), más opcionalmente, en un intervalo de 80 kPa (0,8 bar) a 500 kPa (5,0 bar) y, aún más opcionalmente, en un intervalo de 90 kPa (0,9 bar) a 200 kPa (2,0 bar). Se apreciará que “sin presurizar”, en contraposición, se refiere a presiones, por ejemplo, en exceso de 2000 kPa (20 bar), en exceso de 5000 kPa (50 bar), o incluso en exceso de 10.000 kPa (100 bar).

65 Por ejemplo, los primeros pasos del proceso en los que un mineral de silicato de magnesio extraído se convierte en hidróxido de magnesio se pueden llevar a cabo en el yacimiento minero, mientras que, sin la necesidad de temperaturas o presiones elevadas para la reacción, el paso final en el cual el CO<sub>2</sub> en el gas de combustión reacciona con hidróxido de magnesio acuoso, se puede llevar a cabo a una fuente distante de las emisiones de CO<sub>2</sub>, tal como una estación de

energía o a bordo de un barco. Además, en comparación con el silicato de magnesio o la mezcla de reacción, el hidróxido de magnesio, que tiene una masa molar inferior y que es capaz de reaccionar más completamente con CO<sub>2</sub>, tiene una capacidad de secuestro de CO<sub>2</sub> mucho más alta, concretamente toneladas de CO<sub>2</sub> almacenado por tonelada de hidróxido de magnesio que es carbonatado; esto significa que se necesita transportar y utilizar menos material para secuestrar la misma masa de CO<sub>2</sub> y, por lo tanto, se requiere menos energía y coste en las tareas de transporte y manipulación. En una realización alternativa no inventiva, en la que se sustituye el polvo de hidróxido de magnesio con polvo de silicato de magnesio en suspensión acuosa, se ha descubierto sorprendentemente, según la presente descripción, que también es posible conseguir una carbonatación sustancial directa de fase acuosa de los polvos de serpentina y de olivino, y la depuración sustancial del CO<sub>2</sub> a partir de gas de combustión de presión ambiental. La técnica anterior enseña que la carbonatación sustancial y directa de los polvos de serpentina o de olivino es solo posible en condiciones de energía intensiva y costosas de temperatura o presión elevadas, o con un intenso procesamiento previo o con aditivos químicos. Según la presente descripción, se ha descubierto que se puede lograr la carbonatación directa no inventiva de alta eficacia y bajo coste de serpentina y olivino a presiones y temperaturas ambientales con solo agua o agua de mar y CO<sub>2</sub> como aditivos en un sistema reactor simple de carbonatación. El CO<sub>2</sub> puede ser puro o diluido, como en el gas de combustión o incluso en aire, y a cualquier presión o temperatura parcial. En una realización de la presente descripción, se inyecta gas de combustión simulado, concretamente una mezcla de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>, en una suspensión circulante del polvo mineral en agua y también en agua de mar. Muchas disposiciones de mezcla alternativas de gas - líquido son posibles, tales como la pulverización de gotitas de solución de suspensión en el gas. Del mismo modo, son posibles muchas disposiciones alternativas no inventivas para la mezcla de sólidos-líquidos, tales como un lecho fijo o agitado, o columna de partículas minerales a través de las cuales se hace circular agua o salmuera para disolver el mineral. Al controlar una velocidad a la que el CO<sub>2</sub> y/o mineral y/o agua y/o energía se añaden o eliminan a/desde el sistema, se ha descubierto sorprendentemente que se pueden mantener las condiciones en las que el mineral de silicato de magnesio se disuelve en forma continua y el CO<sub>2</sub> se depura continuamente del gas. Las mediciones de agua que contiene polvo en serpentina demuestran un pH alcalino por encima de pH8, e incluso por encima de pH9. La serpentina y el olivino y otros minerales de silicato de magnesio relacionados tales como crisotila, lizardita, antigorita, y forsterita están compuestos alternando capas cristalinas de óxido/hidróxido de magnesio y sílice. Se cree que el mecanismo mediante el cual la disolución mineral de silicato de magnesio y la carbonatación es posible en estas condiciones moderadas, es que se mantiene un pH adecuado en el intervalo de pH 8 a pH 9 mediante la adición de CO<sub>2</sub>, de manera que las capas cristalinas sucesivas de hidróxido de magnesio se disuelven directamente en la solución para formar una solución de bicarbonato de magnesio. En este intervalo de pH, la concentración de iones carbonato en solución tiene órdenes o magnitud menores que la concentración de iones de bicarbonato y por lo tanto se evita la formación de fases de carbonato de magnesio sólido pasivadas sobre la superficie de las partículas de silicato de magnesio. La disolución de las capas de óxido de magnesio es capaz de desestabilizar las sucesivas capas de sílice en el cristal de silicato de magnesio, de manera que la sílice se disuelve o se precipita como un sólido, posiblemente acelerado por desgaste superficial debido a la agitación o circulación de la solución. Las ventajas correspondientes a este sorprendente resultado beneficioso de poder carbonatar polvos minerales de silicato de magnesio según un proceso no inventivo, concretamente sin preprocesar ninguna otra operación de extracción y de trituración, directamente en condiciones ambientales con solo agua y CO<sub>2</sub> diluido son varias, principalmente:

- (i) los polvos minerales de silicato de magnesio son mucho más económicos como materias primas para la carbonatación que el hidróxido de magnesio, o los polvos minerales de silicato de magnesio activado térmica o químicamente;
- (ii) la carbonatación puede llevarse a cabo, potencialmente, directamente a gran escala en el sitio del depósito mineral de silicato de magnesio con el CO<sub>2</sub> disponible en el aire o CO<sub>2</sub> canalizado en el sitio y con la recirculación de agua no se necesita suministro de agua adicional;
- (iii) la recuperación y separación del gas CO<sub>2</sub> puro y el carbonato de magnesio sólido puro de la solución de bicarbonato mediante los procesos de envejecimiento, de cambio de temperatura o presión convencionales pueden proporcionar compatibilidad con otras opciones de transporte, almacenamiento o utilización de CO<sub>2</sub>;
- (iv) la separación de carbonato de magnesio sólido puro de una solución de bicarbonato proporciona una materia prima química e industrial vendible para otros procesos;
- (v) la separación de sólidos de sílice procedentes de la disolución/desintegración del mineral de silicato de magnesio proporciona además una materia prima industrial vendible; y
- (vi) el níquel y el hierro y otros constituyentes elementales minoritarios típicamente presentes en los minerales y residuos de silicato de magnesio pueden liberarse en el proceso y pueden recuperarse potencialmente de la solución o mediante purificación de los productos sólidos.

La eficacia de todo este proceso, como se ilustra en la Fig. 1 y la Fig. 2, ha sido analizada a través de varios experimentos de escalabilidad, en donde se ha descubierto que, para los silicatos minerales de magnesio, el tratamiento alcalino es atractivo ya que la reacción de carbonatación asociada es favorable químicamente a un pH más alto que da como resultado una mayor velocidad de reacción:



En una de las realizaciones, es factible convertir la dunita, una roca ultramáfica rica en minerales que contienen magnesio, en hidróxido de magnesio (Mg(OH)<sub>2</sub>) usando soluciones acuosas de hidróxido sódico (NaOH) altamente concentradas. El efecto del tiempo de reacción y la concentración de solución de hidróxido de sodio (NaOH) en el

proceso se estudiaron para determinar las condiciones óptimas para lograr una mayor velocidad de conversión de silicatos minerales de magnesio en hidróxido de magnesio ( $Mg(OH)_2$ ). Las fases de producto se identificaron mediante análisis por XRD y TG. La cuantificación cuidadosa de forsterita y brucita tanto en materias primas como en los productos se realizó con el uso de QPA por refinado de Rietveld y TG. Los resultados experimentales se han ilustrado en la Fig. 3a y 3b, la Fig. 4a y 4b, la Fig. 5, la Fig. 6, la Fig. 7a y 7b, la Fig. 8, la Fig. 9, la Fig. 10, la Fig. 11a y 11b; estos resultados se indican mediante **300, 301, 400, 401, 500, 600, 700, 701, 800, 900, 1000, 1100, 1101** respectivamente. Los resultados experimentales de estos dibujos se han dilucidado brevemente en lo anterior.

Las pruebas realizadas han demostrado que los silicatos minerales de magnesio que constituyen la dunita pueden ser casi completamente sustituidos con brucita en soluciones altamente concentradas de hidróxido de sodio (NaOH) y calentarse hasta una temperatura de sustancialmente 180 °C. De conformidad con los resultados experimentales, el aumento de la concentración de hidróxido de sodio (NaOH) y el tiempo de reacción son factores que afectan positivamente a la conversión de silicatos de magnesio en hidróxido de magnesio. Se produjo una mayor cantidad de hidróxido de magnesio ( $Mg(OH)_2$ ) usando o bien una solución de hidróxido de sodio (NaOH) que tiene una concentración molar de 50 moles/kg durante una duración temporal de 6 horas (73 % en peso), o bien, usando una solución de hidróxido de sodio (NaOH) que tiene una concentración molar de 40 mol/kg durante una duración temporal de 18 y 24 horas (79 - 80 % en peso). Se descubrió que los resultados de análisis de TGA se conformaron según los resultados de la XRD cualitativa y con el análisis de fase cuantitativa por refinado de Rietveld.

Durante nuestra exploración de condiciones experimentales óptimas para diferentes realizaciones de la reacción de olivino-NaOH, hemos descubierto que es posible lograr una conversión sustancial de olivino en brucita en recipientes abiertos a presión atmosférica ambiente mientras se calienta a temperaturas en el intervalo de 130-220 °C. A estas temperaturas elevadas la presión de vapor de agua excede significativamente la presión de la reacción. Este descubrimiento proporciona una ventaja significativa con respecto a los procesos descritos por sistemas de la técnica anterior, ya que la reacción se puede realizar a presiones mucho más bajas (e incluso a presión atmosférica ambiental) usando reactores industriales estándar de bajo coste que, por lo general, están diseñados para soportar presiones de operación de hasta 1000 kPa (10 bar).

Según otra realización de la presente invención, el polvo de dunita compactado puede calentarse en un recipiente sellado a una temperatura de alrededor de 180 °C, preferentemente durante aproximadamente seis horas, para producir un producto que comprende brucita.

Según otra realización de la presente invención, el olivino y/o la serpentina es un mineral de magnesio que son materiales de materia prima adecuados debido a su alto contenido de magnesio (Mg) y a la amplia abundancia y gran concentración en yacimientos de minerales.

A partir de la descripción anterior y del proceso reivindicado, se apreciará que se proporciona un proceso mejorado de digestión alcalina para la carbonatación mineral. El proceso puede encontrar utilidad en el secuestro de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), extracción de minerales valiosos y otros procesos conocidos por el experto en la técnica, lo que requiere la digestión de minerales para su carbonatación.

Opcionalmente, un método no inventivo para secuestrar dióxido de carbono ( $CO_2$ ) comprende:

- hacer reaccionar un material basado en silicato de alcalinotérreo con un compuesto de alcalinotérreo para formar una mezcla que comprende un hidróxido de alcalinotérreo, en donde el metal alcalino se selecciona de sodio y/o potasio, y en donde el metal alcalinotérreo se selecciona de magnesio y/o calcio;
- hacer reaccionar la mezcla a una temperatura en el intervalo de 140-220 °C y a una presión inferior a 10 °C;
- separar el hidróxido de los alcalinotérreos de la mezcla; y
- combinar hidróxido de alcalinotérreo con una fuente de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) produciendo un carbonato o bicarbonato o el alcalinotérreo. Esto proporciona una producción y secuestro muy beneficiosos del hidróxido del alcalinotérreo.

Opcionalmente, un método no inventivo para secuestrar dióxido de carbono ( $CO_2$ ) como se describió anteriormente incluye reaccionar la mezcla en (b) a una presión inferior a la presión de vapor del agua pura a la temperatura de reacción.

Opcionalmente, un método no inventivo para secuestrar dióxido de carbono ( $CO_2$ ) como se describió anteriormente incluye el uso de la mezcla con una relación estequiométrica entre el Si en el material basado en silicato de alcalinotérreo y el metal alcalino en el compuesto alcalino en un intervalo de 1:1 a 1:2.

Opcionalmente, un método no inventivo para secuestrar dióxido de carbono ( $CO_2$ ) como se describió anteriormente incluye el uso de la mezcla en una forma de una solución acuosa con la molalidad de >30 moles de compuesto alcalino por litro de agua ( $H_2O$ ).

Opcionalmente, un método no inventivo para secuestrar dióxido de carbono ( $CO_2$ ) como se describió anteriormente incluye reaccionar la mezcla a presión atmosférica ambiental.

Opcionalmente, un método no inventivo para secuestrar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) como se describió anteriormente incluye ejecutar la reacción a una temperatura de aproximadamente 180 °C.

5 Opcionalmente, un método no inventivo para secuestrar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) como se describió anteriormente incluye el uso de gases de combustión con menos de 50 % en volumen de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) como parte de una mezcla de gas para carbonatación.

10 Opcionalmente, un método no inventivo para secuestrar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) como se describió anteriormente incluye llevar a cabo reacciones en un modo continuo no presurizado para lograr una carbonatación sustancialmente completa del hidróxido de magnesio o silicato de magnesio.

15 Opcionalmente, un sistema no inventivo para secuestrar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), en donde el sistema incluye una primera cámara de reacción que puede funcionar para recibir un material basado en silicato y un compuesto alcalino, y un aparato de mezclado para el mezclado de los contenidos de la primera cámara de reacción para producir una mezcla en el mismo.

20 Opcionalmente, el sistema no inventivo para secuestrar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) como se describió anteriormente es operable para ejecutar el método descrito anteriormente, método para secuestrar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

25 Es posible realizar modificaciones a las realizaciones de la presente invención descritas anteriormente sin salirse del alcance de la presente invención según se define por las reivindicaciones adjuntas. Por ejemplo, el compuesto en la reacción se puede seleccionar de cualquiera de un o una combinación de hidróxido, carbonato y/o bicarbonato según fuera adecuado para el experto en la técnica. Se prevé que expresiones tales como “que incluye”, “que comprende”, “que incorpora”, “que consiste en”, “tienen”, “se utiliza para describir y reivindicar la presente invención, se consideren de un modo no exclusivo, concretamente permitiendo que partes, componentes o elementos no descritos también estén presentes. También debe interpretarse que el singular se refiere al plural. Los números incluidos entre paréntesis en las reivindicaciones adjuntas están destinados a ayudar a entender las  
30 reivindicaciones y no deben considerarse de ninguna manera como limitantes del objeto reivindicado por estas reivindicaciones.

**REIVINDICACIONES**

1. Un método para la activación de minerales de silicato de magnesio mediante conversión en hidróxido de magnesio, que comprende:
- 5
- a. mezclar un polvo seco de roca de silicato de magnesio con un polvo seco de al menos un compuesto de metal alcalino seleccionado del grupo que consiste en hidróxido, carbonatos, bicarbonatos de metal alcalino, para formar una mezcla sólido-sólido en seco con una relación molar en el intervalo de 1-3 moles de metal alcalino por mol de silicio en la mezcla;
- 10
- b. calentar la mezcla sólido-sólido en seco a una temperatura inferior a 300 °C en un recipiente no presurizado por un tiempo inferior a 4 horas para formar un producto sólido de vidrio que comprende predominantemente una mezcla de hidróxido de magnesio y silicato de metal alcalino; y
- 15
- c. disolver el producto sólido de vidrio en solución acuosa para formar una suspensión acuosa líquida alcalina, que comprende productos de fase sólida y acuosa.
2. Un método según la reivindicación 1, caracterizado por que la suspensión acuosa líquida del paso c se separa en productos de fase sólida y de solución acuosa.
- 20
3. Un método según la reivindicación 1 o 2, caracterizado por que el método incluye hacer reaccionar cualquiera de las fases acuosas a presión atmosférica con un gas que comprende 0,04 %-100 % de CO<sub>2</sub>.
4. Un método según la reivindicación 2, caracterizado por que el método incluye mezclar el producto en fase sólida con agua y hacerlo reaccionar a presión atmosférica con un gas que comprende 0,04 %-100 % de CO<sub>2</sub>.
- 25
5. Un método según la reivindicación 3 o 4, caracterizado por que el método incluye aire como el gas en la reacción.
6. Un método según la reivindicación 3 o 4, caracterizado por que el método incluye un gas de combustión industrial en la reacción.
- 30
7. Un método según la reivindicación 1, caracterizado por que el método incluye el uso de un hidróxido o un carbonato de sodio o un potasio como el compuesto de metal alcalino en la reacción.
8. Un método según la reivindicación 1, caracterizado por que el método incluye una serpentina o una roca de olivino como el mineral de silicato de magnesio en la reacción.
- 35
9. Un método según la reivindicación 1, caracterizado por que el método incluye calentar el recipiente no presurizado en el paso (b) a una temperatura en el intervalo de 140 °C-220 °C.
- 40
10. Un método según la reivindicación 1, caracterizado por que el método incluye añadir continuamente el mineral de silicato de magnesio y el compuesto de metal alcalino del paso (a), permitiendo a la vez la reacción continua de los mismos en las condiciones del paso (b) y además eliminando continuamente el producto del paso (b).
- 45
11. Un método según la reivindicación 1, caracterizado por que el método incluye la relación molar de sustancialmente 2 moles de metal alcalino por mol de silicio en la mezcla.

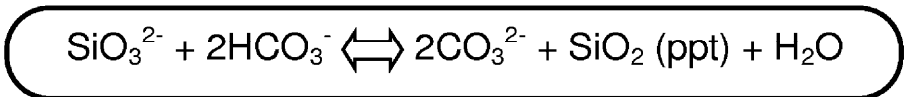
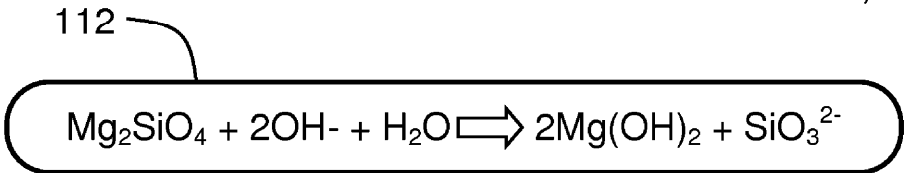
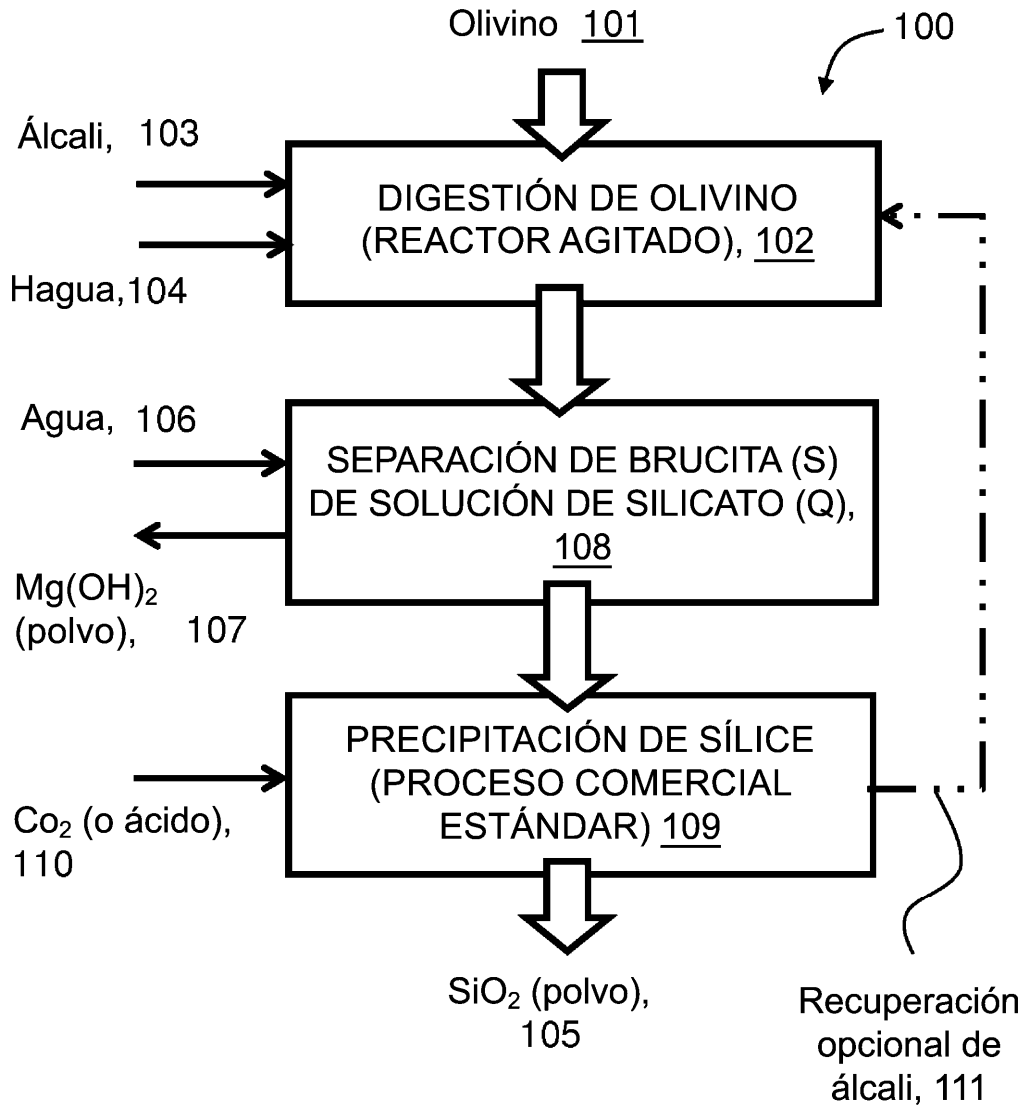
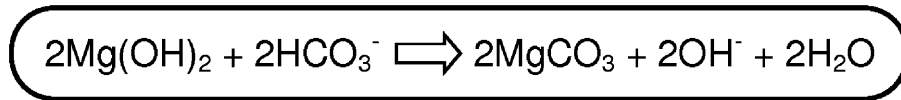
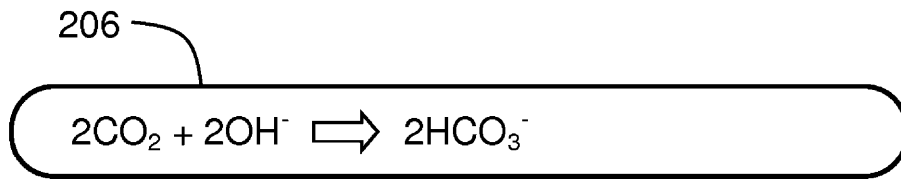
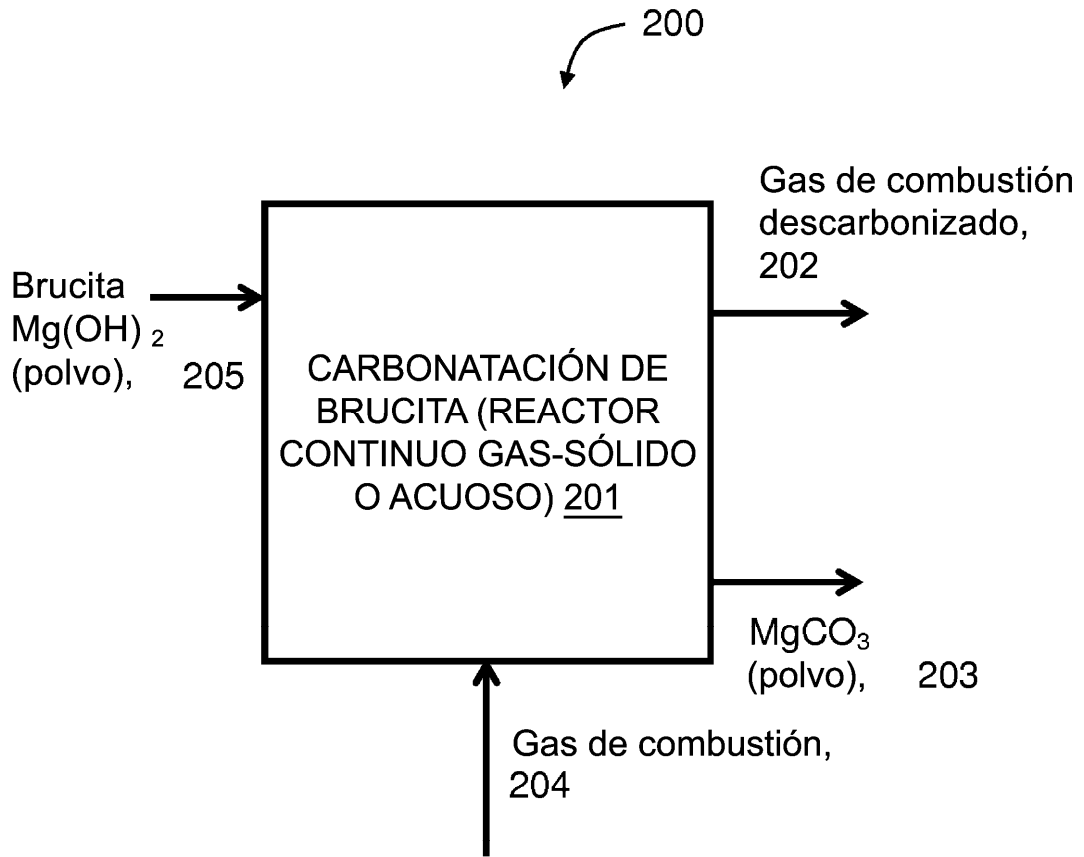


FIG. 1



207

FIG. 2

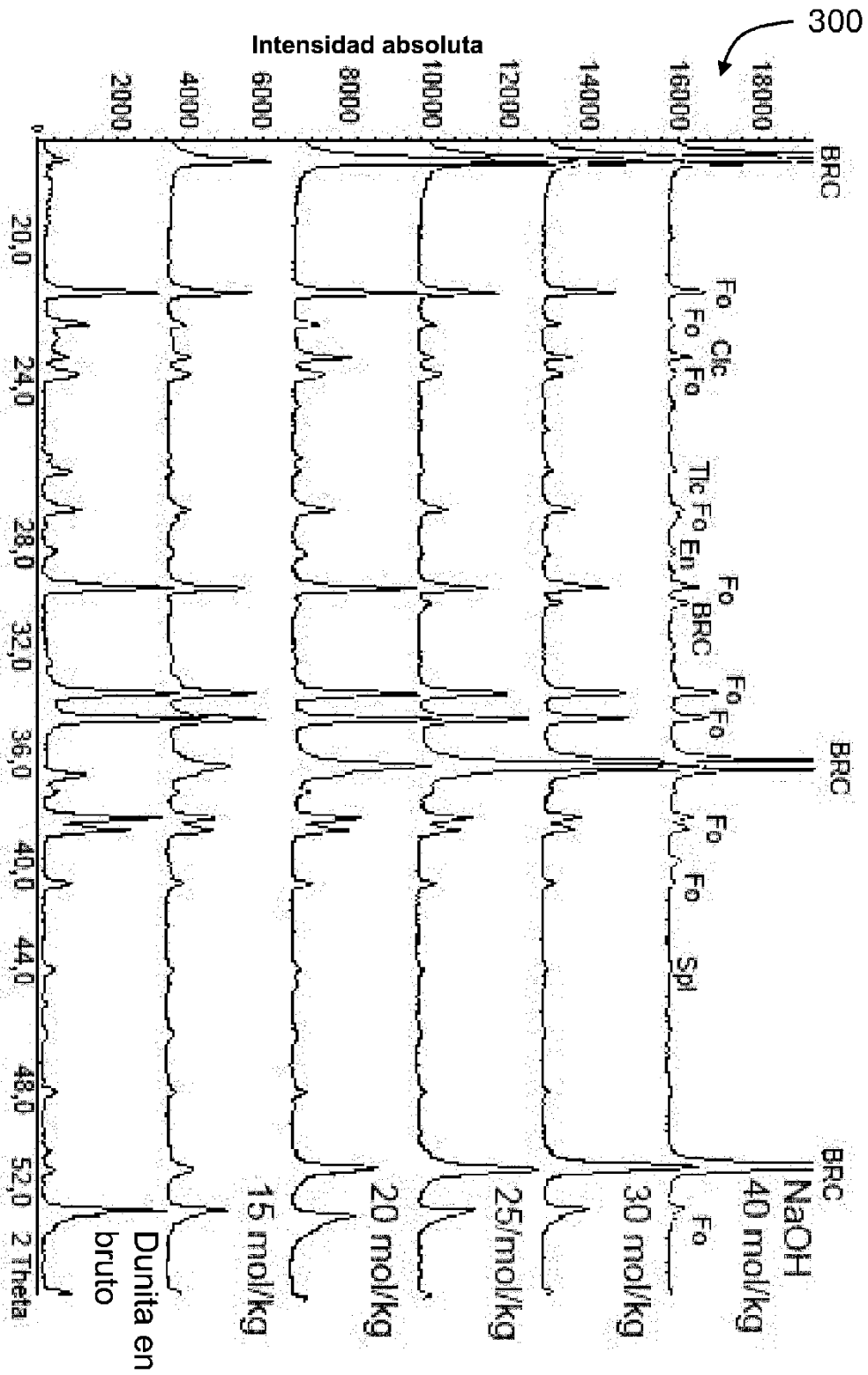


FIG. 3a



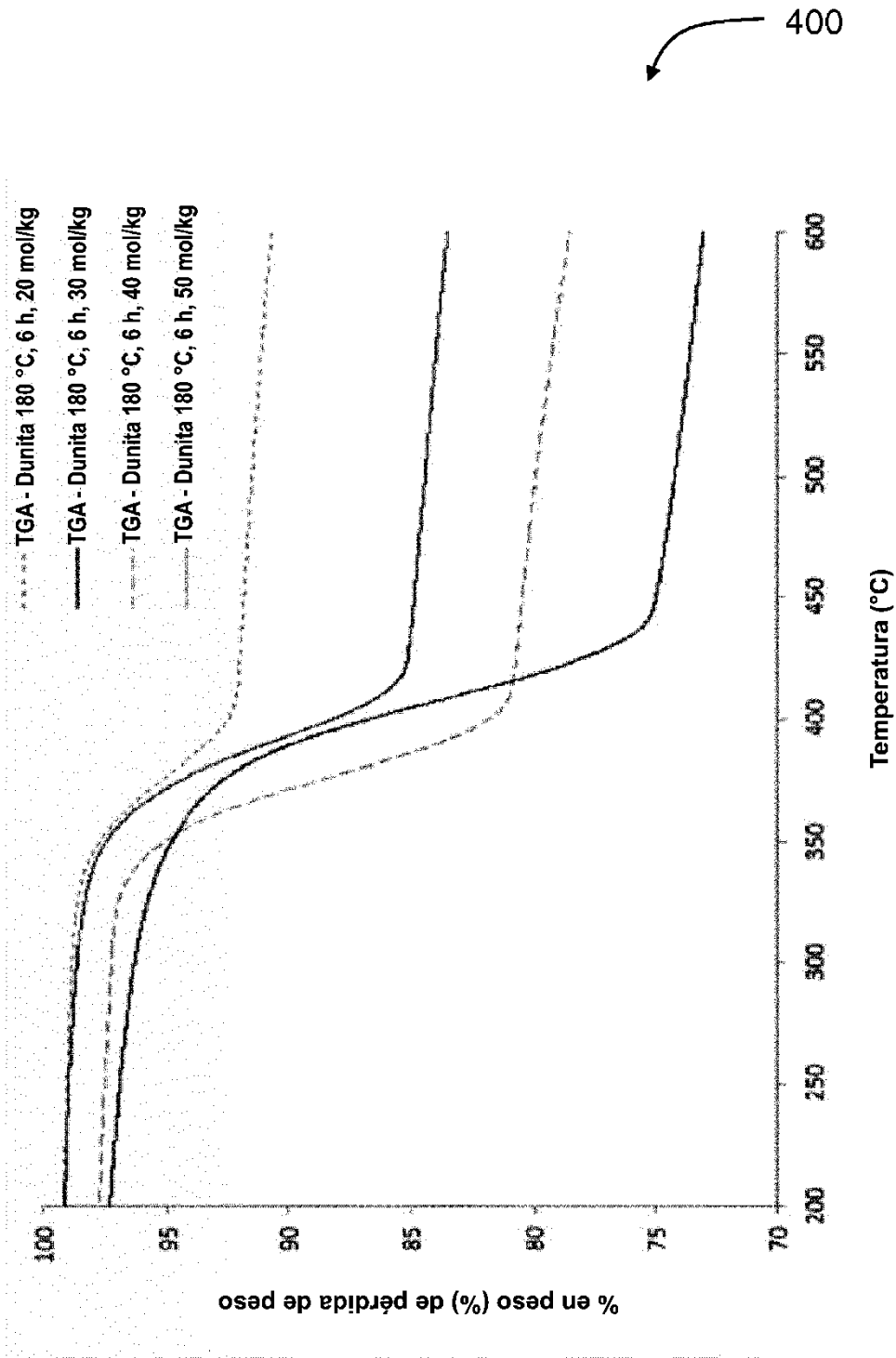


FIG. 4a

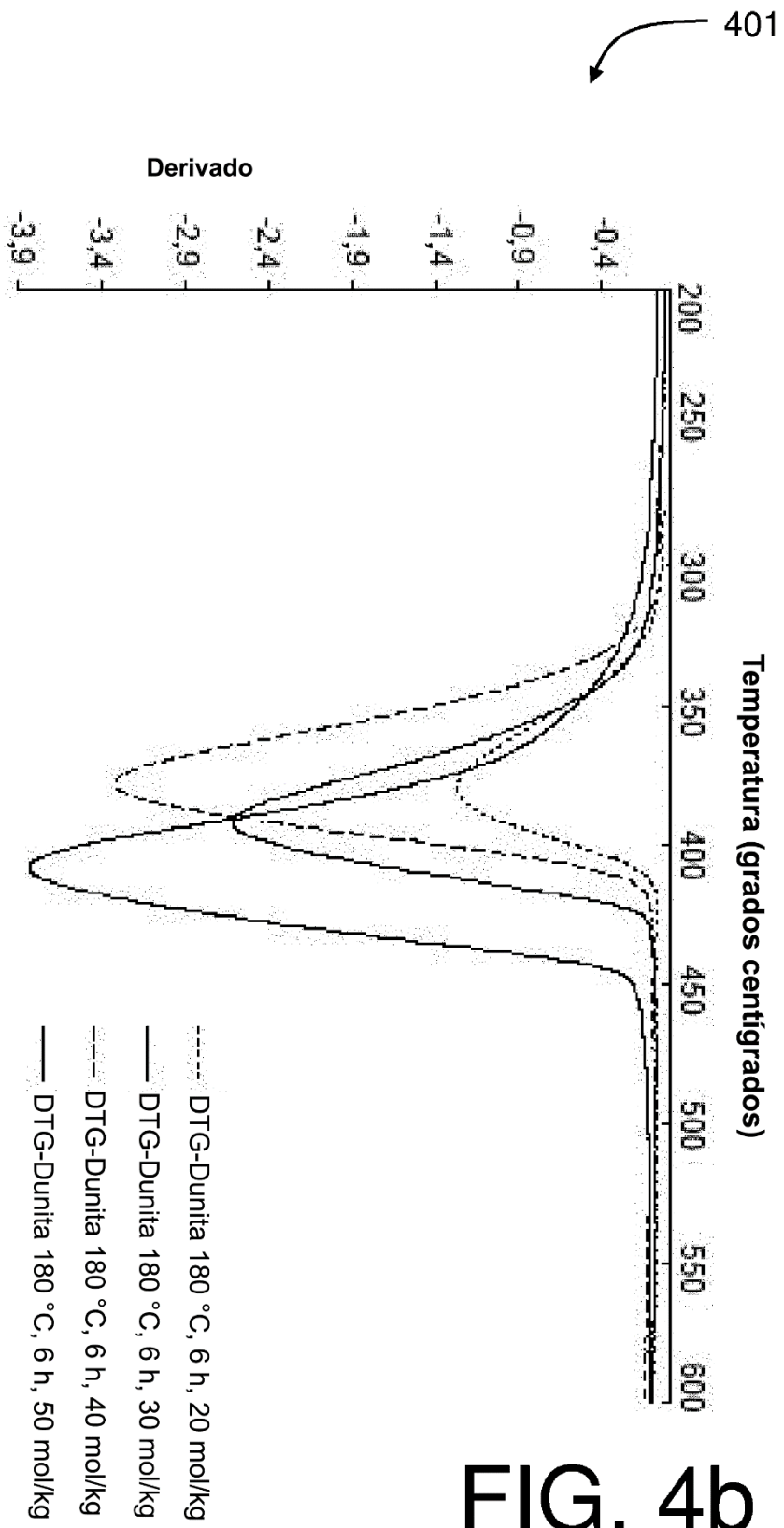


FIG. 4b

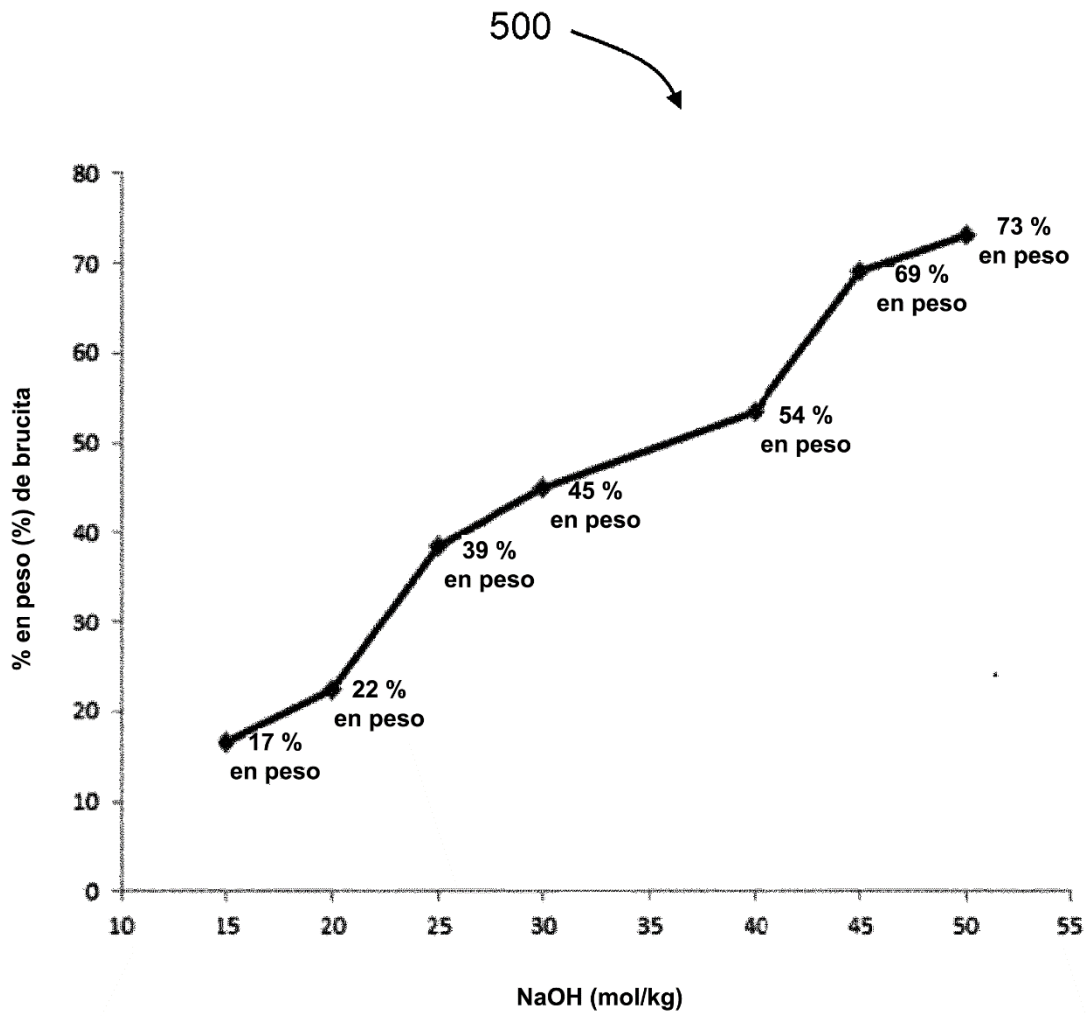


FIG. 5

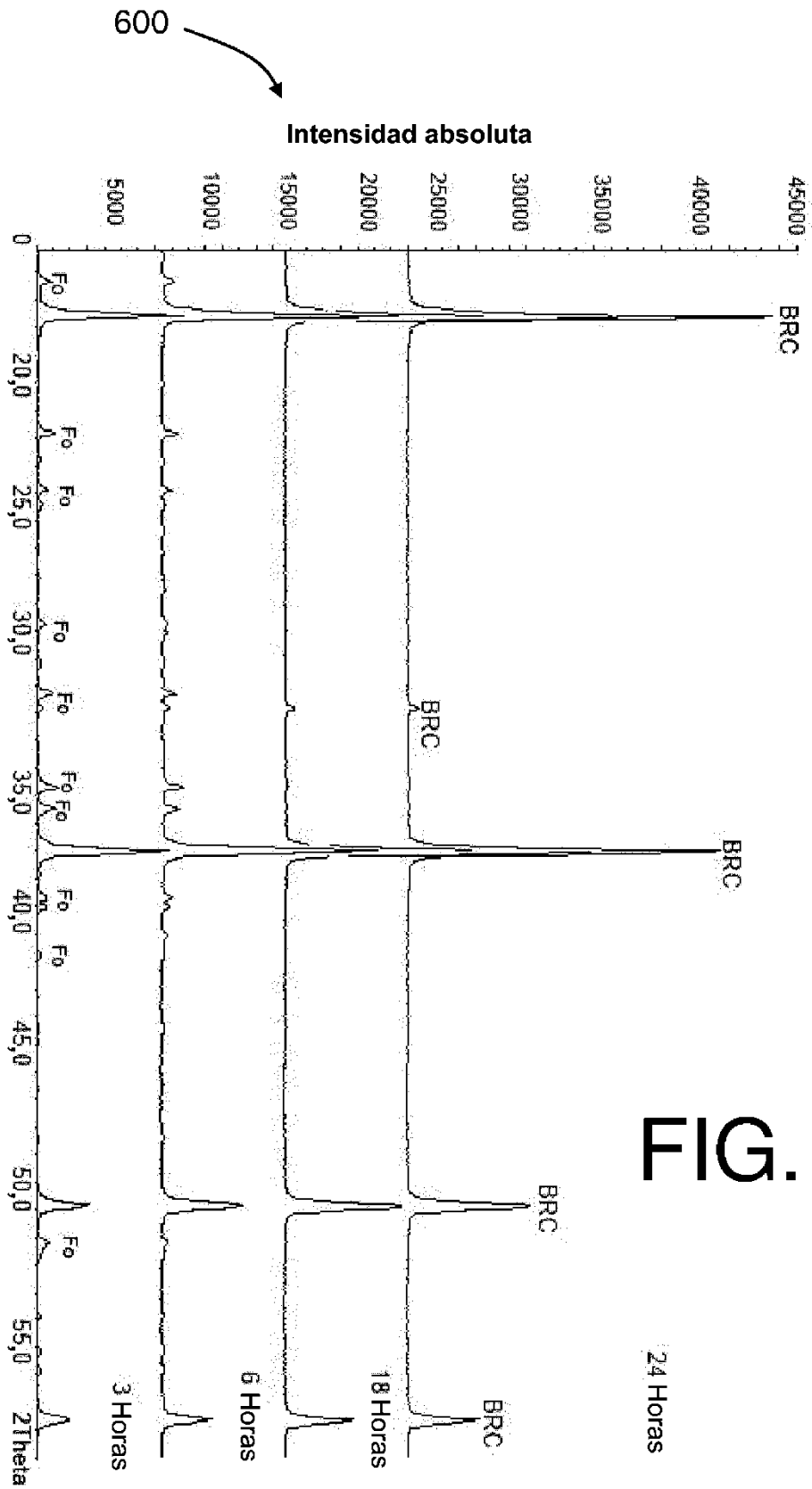


FIG. 6

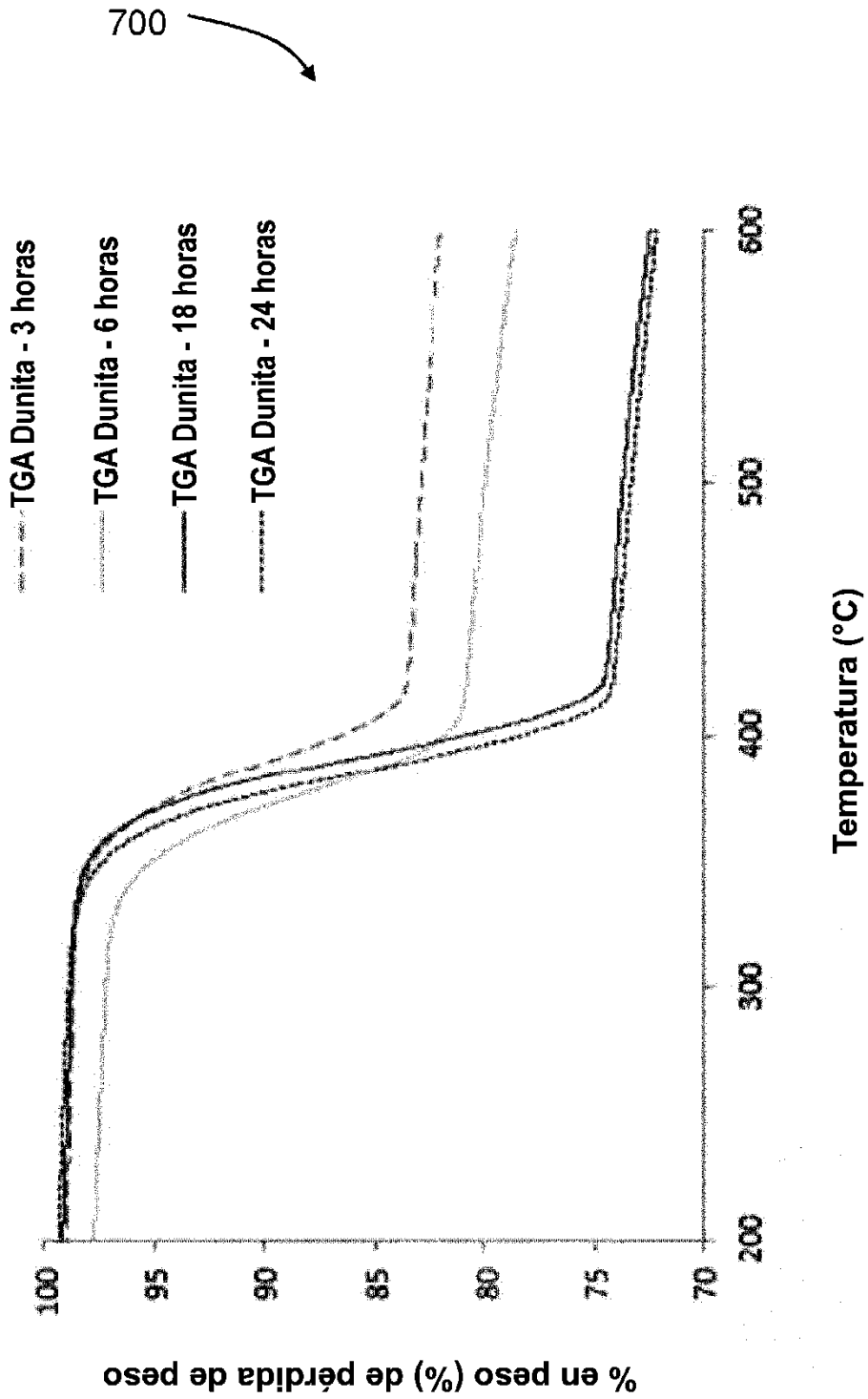


FIG. 7a

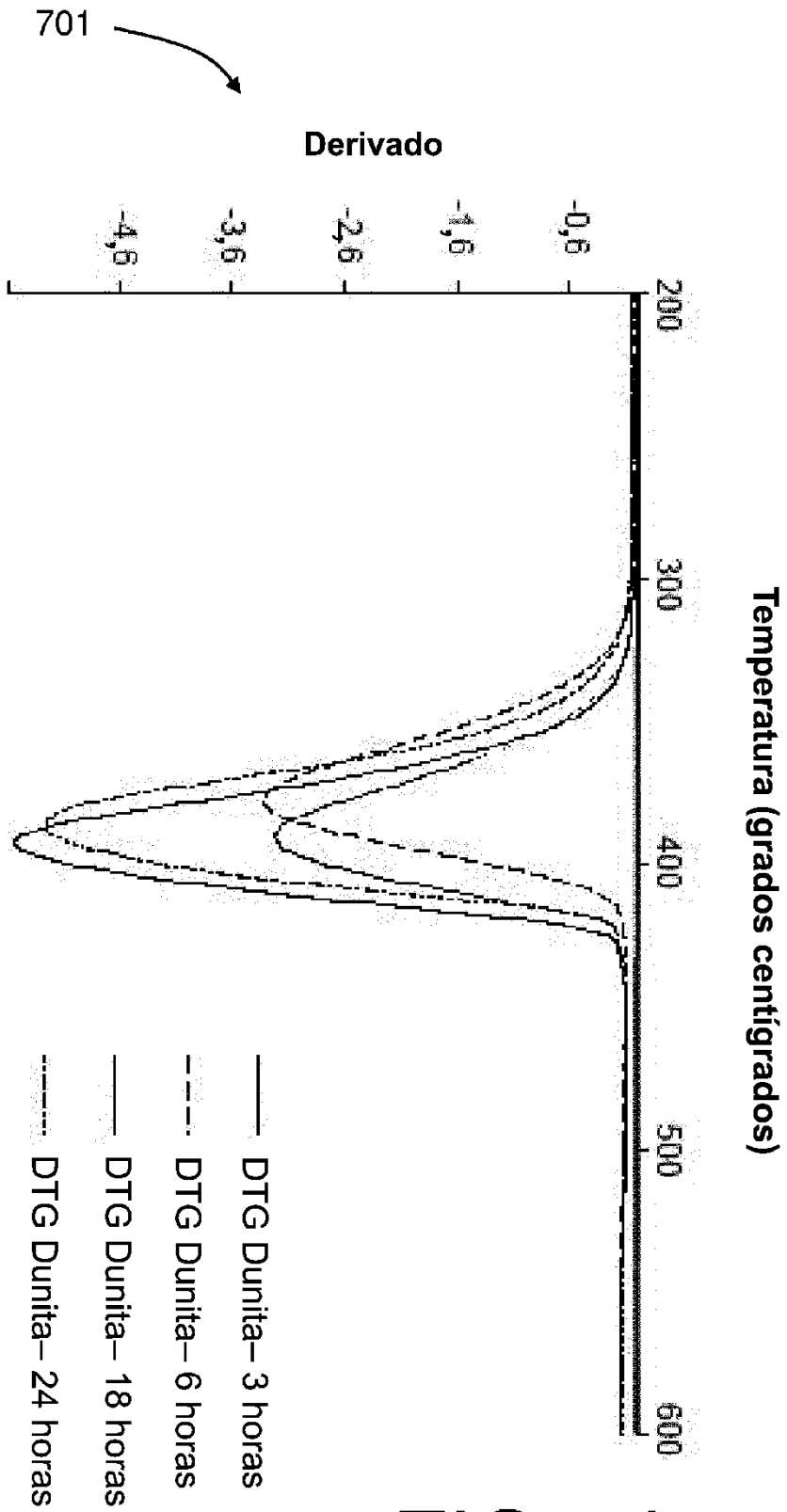


FIG. 7b

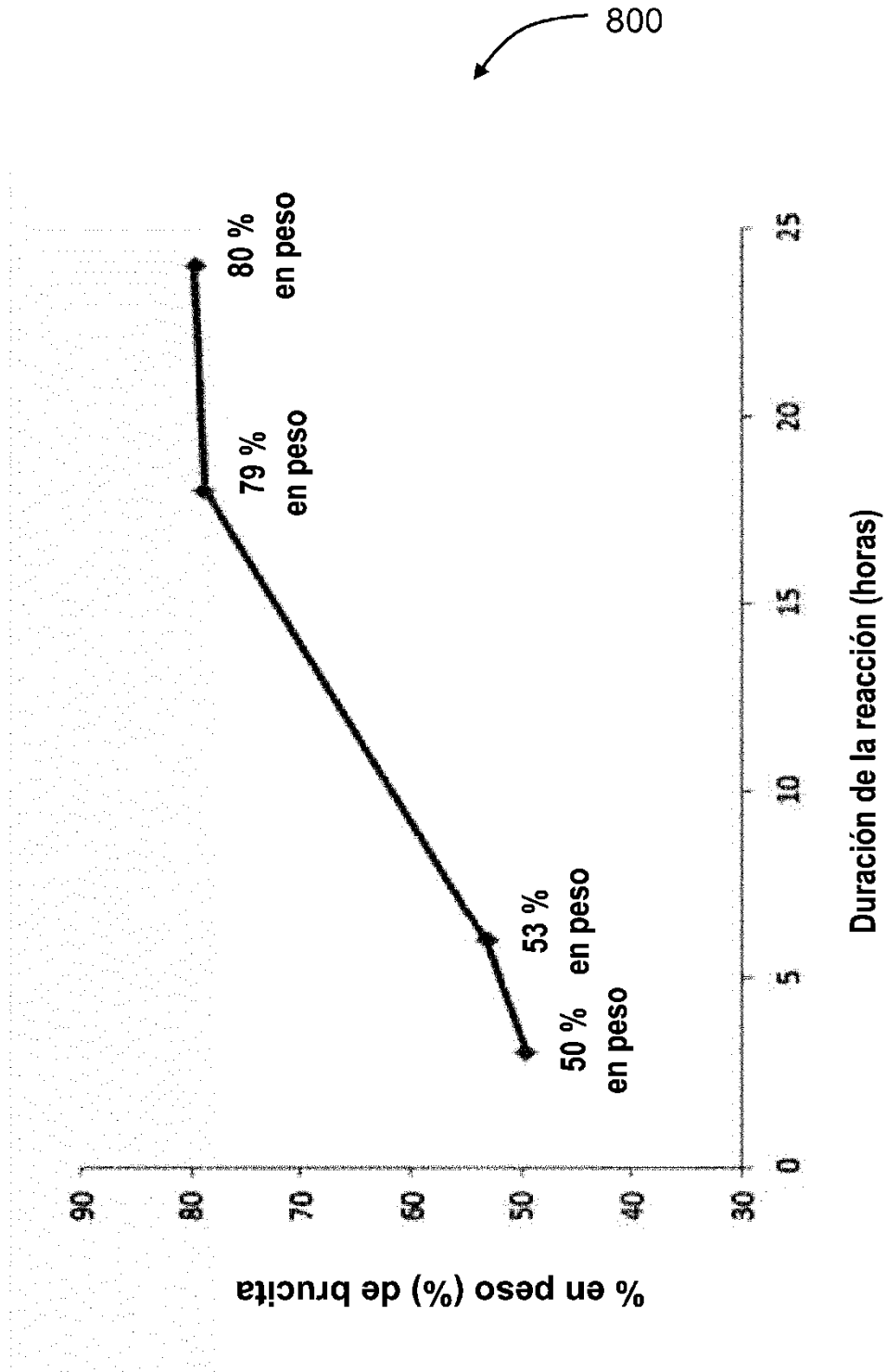


FIG. 8

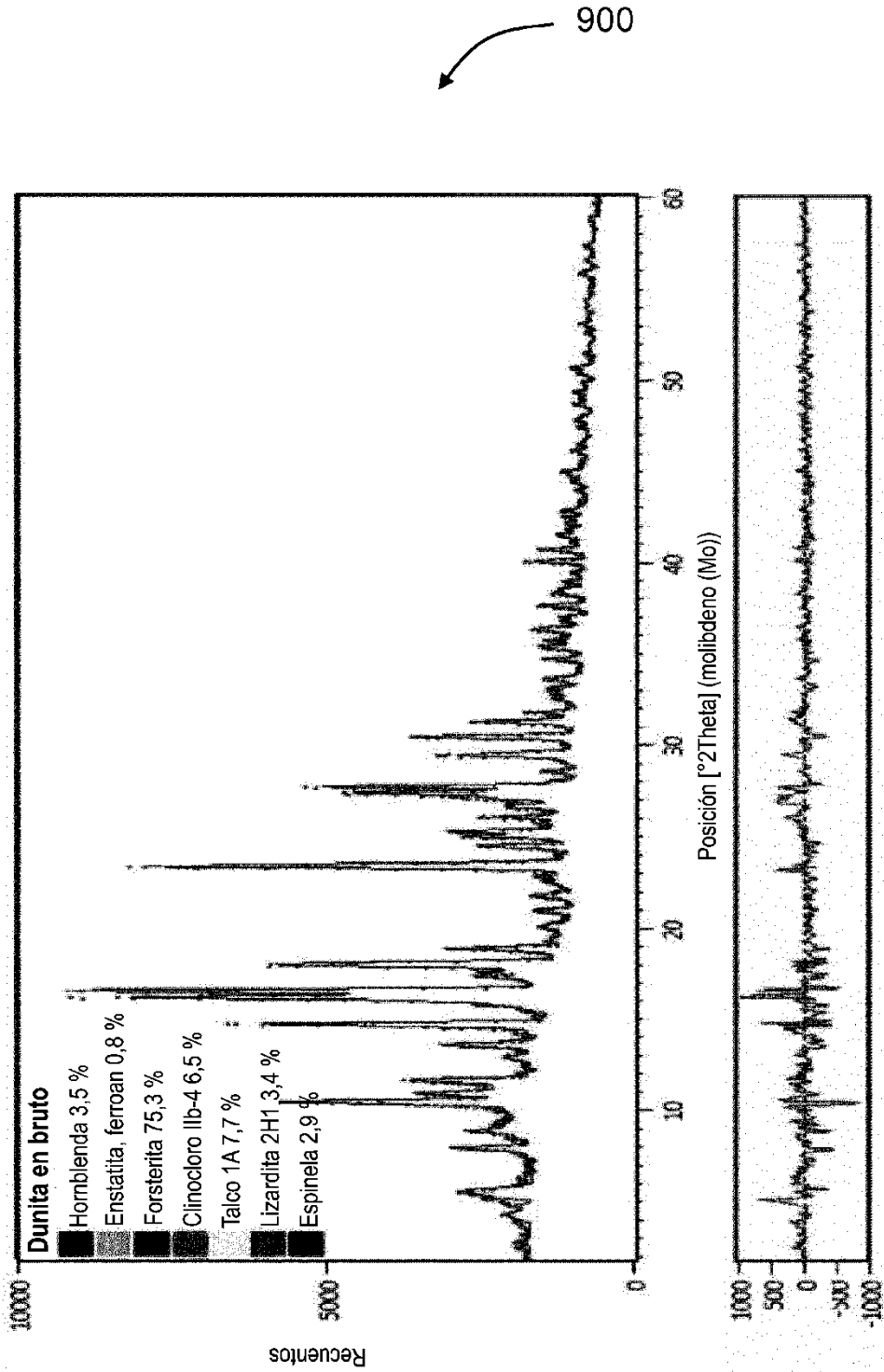


FIG. 9

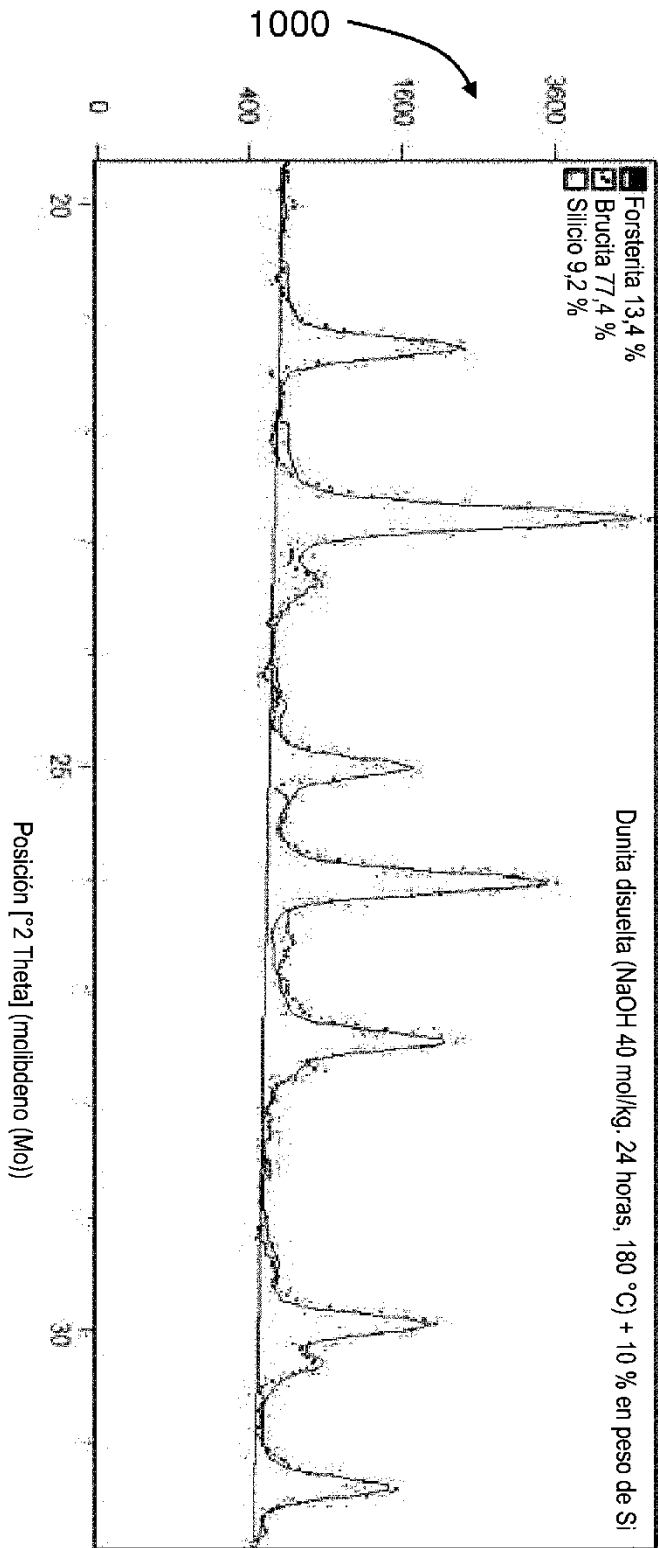


FIG. 10

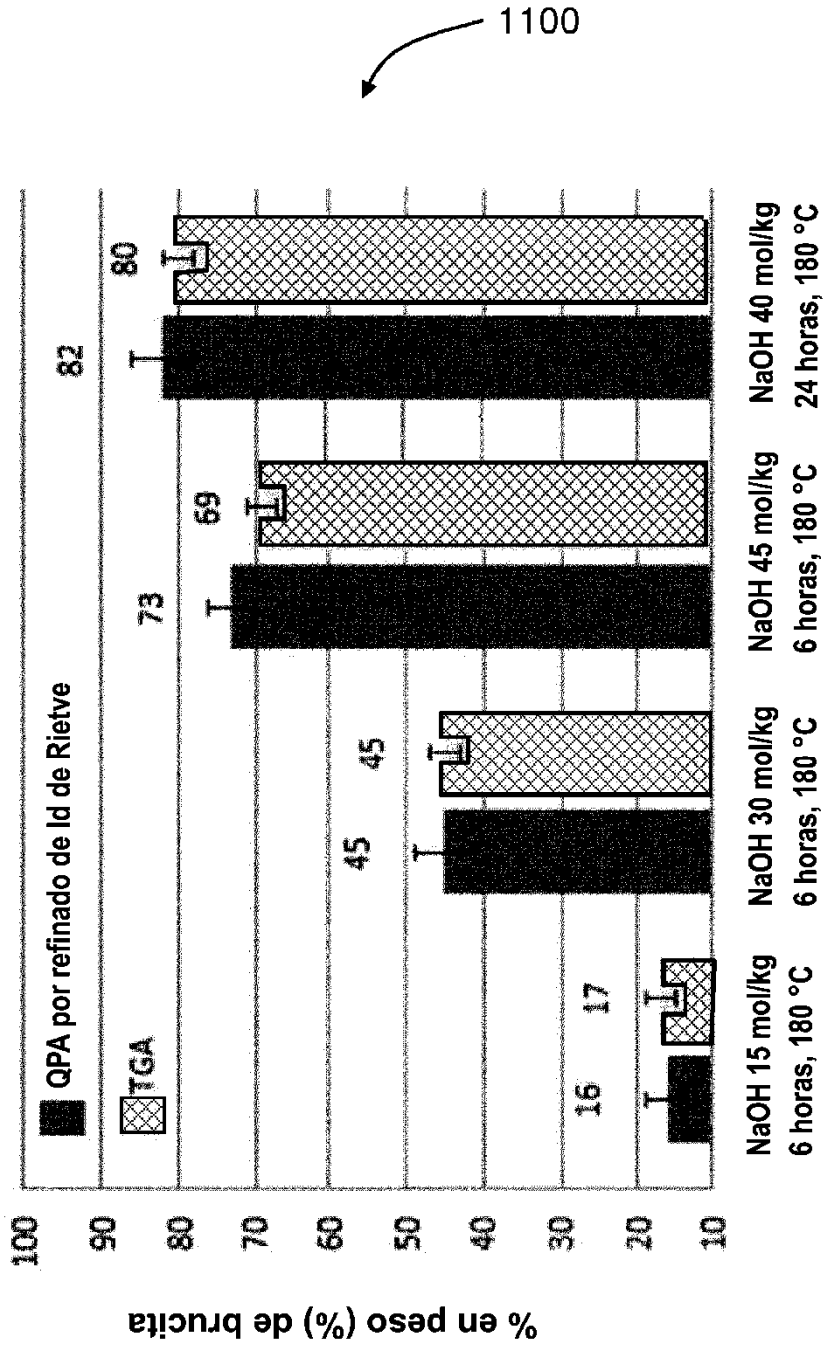


FIG. 11a

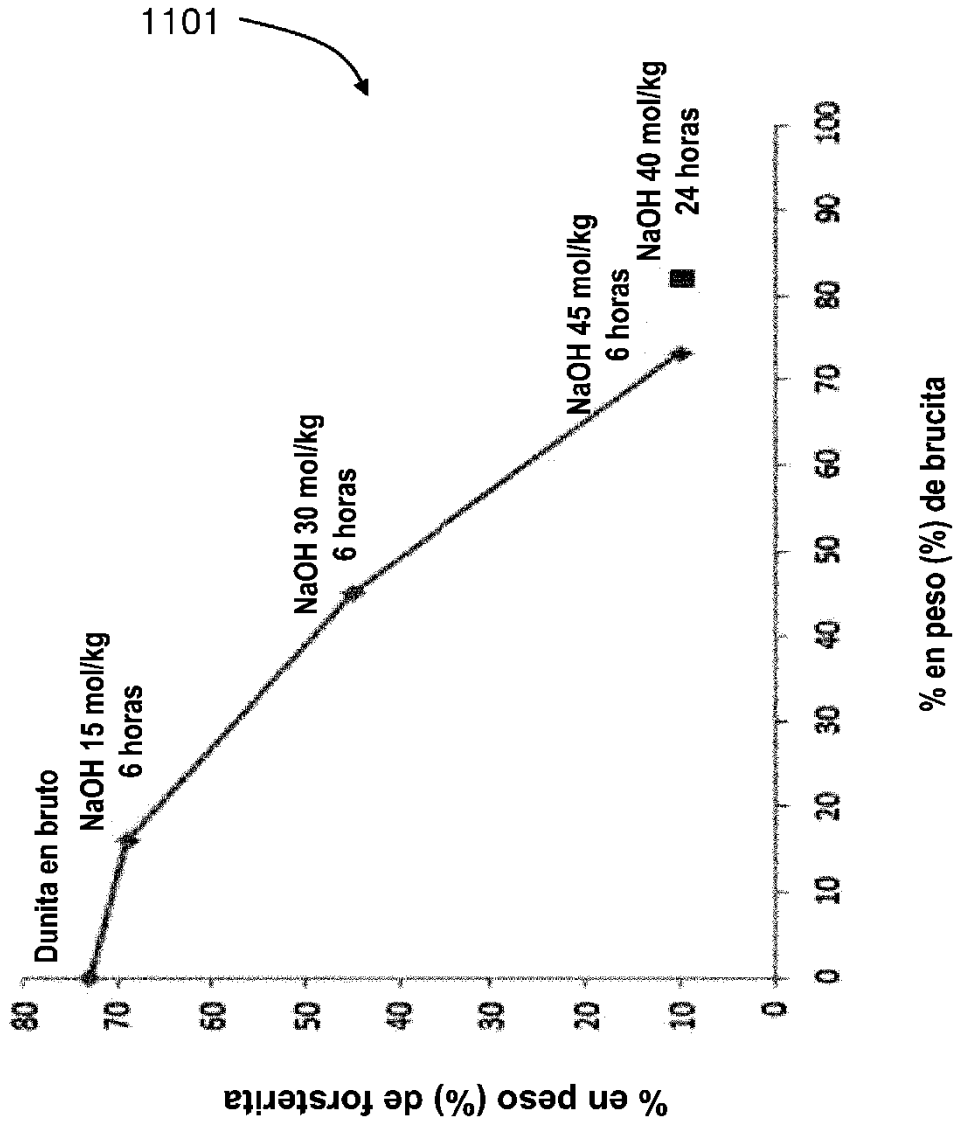


FIG. 11b

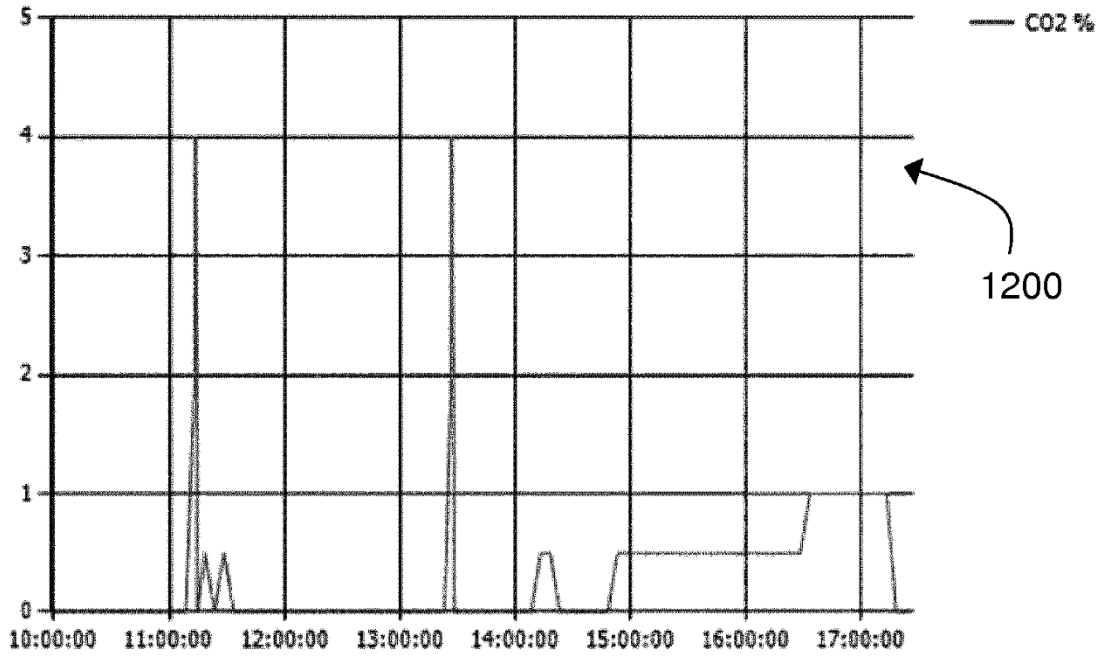


FIG. 12a

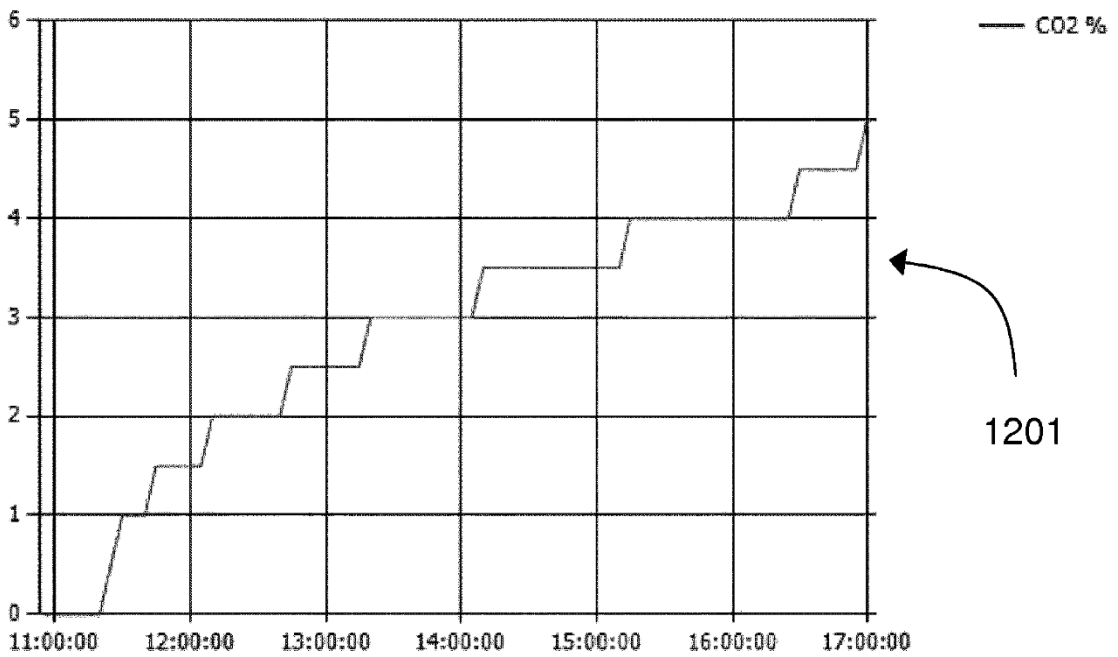


FIG. 12b