

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 539 811**

51 Int. Cl.:

**E21B 43/00** (2006.01)

**C10G 9/00** (2006.01)

**C10G 1/04** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.02.2010 E 10741736 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.04.2015 EP 2396504**

54 Título: **Conducto de calentamiento ondulado y método de uso en la mitigación de la expansión térmica y la subsidencia**

30 Prioridad:

**12.02.2009 US 152150 P**

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

**06.07.2015**

73 Titular/es:

**RED LEAF RESOURCES, INC. (100.0%)  
200 W. Civic Center Drive Suite 190  
Sandy, UT 84070, US**

72 Inventor/es:

**PATTEN, JAMES, W. y  
DANA, TODD**

74 Agente/Representante:

**FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ-PACHECO, Aurelio**

ES 2 539 811 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

Conducto de calentamiento ondulado y método de uso en la mitigación de la expansión térmica y la subsidencia

5

### Solicitudes relacionadas

Esta solicitud reivindica el beneficio de la solicitud provisional estadounidense n.º 61/152.150, presentada el 12 de febrero de 2009, y titulada "Corrugated Heating Conduit and Method of Using in Thermal Expansion and Subsidence Mitigation", solicitud que se incorpora como referencia en su totalidad en el presente documento.

10

### Antecedentes

15

La demanda interna y global de combustibles fósiles continúa en aumento a pesar de los aumentos de precio y otras cuestiones económicas y geopolíticas. Puesto que tal demanda continúa en aumento, la investigación y la búsqueda de fuentes adicionales económicamente viables de combustibles fósiles aumenta de manera correspondiente. Históricamente, se han reconocido ampliamente las enormes cantidades de energía almacenada en depósitos de esquisto bituminoso, carbón y arena bituminosa, por ejemplo. Sin embargo, estas fuentes siguen suponiendo un reto difícil en términos de recuperación económicamente competitiva. Las arenas bituminosas canadienses han mostrado que tales esfuerzos pueden ser fructíferos, aunque sigue habiendo aún muchos retos, incluyendo el impacto medioambiental, calidad del producto, costes de producción y tiempo de proceso, entre otros.

20

25

Las estimaciones de reservas de esquisto bituminoso mundiales oscilan entre dos y casi siete billones de barriles de petróleo, dependiendo de la fuente de estimación. Independientemente, estas reservas representan un volumen tremendo y siguen siendo un recurso sustancialmente inexplorado. Un gran número de empresas e investigadores continúan estudiando y probando métodos para recuperar petróleo de tales reservas. En la industria del esquisto bituminoso, los métodos de extracción han incluido chimeneas de escombros subterráneas creadas mediante explosiones, métodos *in situ* tales como el método del proceso de conversión *in situ* (ICP) (Shell Oil), y calentamiento dentro de retortas fabricadas en acero. Otros métodos han incluido métodos de radiofrecuencia *in situ* (microondas), y procesos *in situ* "modificados" en los que se han combinado minería subterránea, voladura y formación de retortas para formar escombros a partir de una formación para permitir una mejor transferencia de calor y retirada de producto.

30

35

De los procesos de esquisto bituminoso habituales, todos están sujetos a limitaciones por cuestiones económicas y medioambientales. Ningún proceso actual por sí solo satisface los retos económicos, medioambientales y técnicos. Además, las preocupaciones por el calentamiento global dan lugar a medidas adicionales para tratar las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que están asociadas con tales procesos. Se necesitan métodos que sean respetuosos con el medio ambiente y que aun así proporcionen una producción de petróleo rentable y de gran volumen.

45

Los conceptos *in situ* bajo tierra surgieron por su capacidad para producir grandes volúmenes al tiempo que evitan el coste de la minería. Aunque pueden conseguirse ahorros de coste como resultado de evitar la minería, el método *in situ* requiere calentar una formación durante un periodo de tiempo más prolongado debido a la extremadamente baja conductividad térmica y el alto calor específico del esquisto bituminoso sólido. Quizás el reto más significativo para cualquier proceso *in situ* es la incertidumbre y la posible contaminación de agua a largo plazo que puede producirse con acuíferos de agua dulce subterráneos. En el caso del método de ICP de Shell, se usa una "pared de congelación" como barrera para mantener una separación entre acuíferos y una zona de tratamiento subterránea. Aunque esto es posible, ningún análisis a

50

largo plazo ha probado que garantice durante extensos periodos la prevención de la contaminación. Sin garantías y con incluso menos remedios en caso de que una pared de congelación fallara, otros métodos son deseables para abordar tales riesgos medioambientales.

5

El documento US 2008/190816 da a conocer un método para recuperar hidrocarburos a partir de materiales hidrocarbonados.

10

El documento US 4.854.372 da a conocer una tubería de calor ondulada sellada en ambos extremos.

15

El objeto de la reivindicación 1 difiere del método dado a conocer en el documento US 2008/0190816 en que el conducto de calentamiento tiene paredes onduladas, y en que la compresión de las paredes onduladas se facilita a lo largo de un eje longitudinal del conducto de calentamiento para mitigar el esfuerzo provocado por la expansión térmica restringida y por la curvatura adaptable de las paredes onduladas para mitigar el esfuerzo.

20

La reivindicación de aparato 10 tiene características de aparato que corresponden a la reivindicación de método 1. La forma en una sola parte también se prefiere para la reivindicación de aparato 10 por motivos de claridad.

25

Por este y otros motivos, continúa la necesidad de métodos y sistemas que puedan proporcionar una recuperación mejorada de hidrocarburos a partir de materiales que contienen hidrocarburos adecuados, que tengan unos factores económicos aceptables y eviten los inconvenientes comentados anteriormente.

### Sumario

30

Se proporciona un método para mantener la integridad estructural de un conducto enterrado, tal como un conducto de calentamiento usado para calentar una masa permeable de material hidrocarbonado encerrado dentro de una infraestructura de control de permeabilidad construida. El método incluye obtener un conducto de calentamiento que tiene paredes onduladas y que está configurado para transportar un fluido de transferencia de calor, y enterrar el conducto de calentamiento a una profundidad dentro de la masa permeable de material hidrocarbonado, y con un extremo de entrada que se extiende desde el límite de la infraestructura de control de permeabilidad construida. El método también incluye acoplar de manera operativa el extremo de entrada del conducto de calentamiento a una fuente del fluido de transferencia de calor, y hacer pasar el fluido de transferencia de calor a través del conducto de calentamiento para transferir calor del fluido de transferencia de calor a la masa permeable mientras se permite que las paredes onduladas se compriman axialmente y mitiguen la expansión térmica restringida a lo largo del eje longitudinal del conducto de calentamiento, y que se curven de manera adaptable y mitiguen los esfuerzos laterales provocados por la subsidencia de la masa permeable.

45

Según otra realización representativa descrita en términos generales en el presente documento, se proporciona un sistema de conducto de calentamiento para transferir calor de un fluido de transferencia de calor a una masa permeable de material hidrocarbonado contenido dentro de una infraestructura de control de permeabilidad construida. El sistema incluye una infraestructura de control de permeabilidad construida y una masa permeable de material hidrocarbonado contenido dentro de la infraestructura de control. El sistema también incluye un conducto de calentamiento que está configurado para transportar el fluido de transferencia de calor y que está enterrado a una profundidad dentro de la masa permeable que tiene paredes onduladas con al menos un extremo de entrada que se extiende desde un límite de la infraestructura de control. El sistema incluye además una fuente del fluido de

50

transferencia de calor acoplada de manera operativa al al menos un extremo de entrada, de modo que hacer pasar el fluido de transferencia de calor a través del conducto de calentamiento para transferir calor al masa permeable permite que las paredes onduladas de al menos una parte del conducto de calentamiento enterrado se compriman axialmente por los efectos de la expansión térmica, y que las paredes onduladas de al menos otra parte del conducto de calentamiento enterrado se curven de manera adaptable en respuesta a la subsidencia de la masa permeable.

### Breve descripción de los dibujos

Características y ventajas de la invención resultarán evidentes a partir de la descripción detallada que sigue y que, tomada junto con los dibujos adjuntos, conjuntamente ilustran características de la invención. Se entiende que estos dibujos representan meramente realizaciones a modo de ejemplo y, por tanto, no han de considerarse limitativos de su alcance. Además, se apreciará fácilmente que los componentes, según se describen e ilustran de manera general en las figuras en el presente documento, podrían disponerse y diseñarse en una amplia variedad de configuraciones diferentes.

La figura 1 ilustra una vista esquemática lateral, con corte parcial, de una infraestructura de control de permeabilidad construida que incluye una masa permeable de material hidrocarbonado, una fuente de calor y un sistema de tuberías de interconexión, según una realización;

la figura 2 ilustra una vista en sección lateral de una masa permeable sujeta a subsidencia de material hidrocarbonado contenido dentro de una infraestructura de control de permeabilidad construida, según la realización de la figura 1;

la figura 3 ilustra una vista esquemática en perspectiva de un conducto de calentamiento con paredes onduladas enterrado dentro de la masa permeable (no mostrada por motivos de claridad), según realizaciones adicionales;

las figuras 4a y 4b ilustran vistas laterales de un conducto de calentamiento con paredes onduladas, según realizaciones adicionales;

la figura 5a ilustra una vista en sección lateral de un conducto de calentamiento con paredes onduladas enterrado dentro de la masa permeable; según otra realización;

las figuras 5b y 5c ilustran vistas laterales de detalle del conducto de calentamiento de la figura 5a;

la figura 6a ilustra una vista en sección lateral de un conducto de calentamiento con paredes onduladas enterrado dentro de la masa permeable sujeta a subsidencia; según otra realización;

las figuras 6b ilustran una vista lateral de detalle del conducto de calentamiento de la figura 6a;

la figura 7a ilustra una vista en sección lateral de conducto de calentamiento con paredes onduladas enterrado dentro de la masa permeable sujeta a subsidencia; según otra realización;

las figuras 7b y 7c ilustran vistas laterales de detalle del conducto de calentamiento de la figura 7a; y

la figura 8 es un diagrama de flujo que representa un método para mantener la integridad estructural de un conducto de calentamiento usado para calentar una masa permeable de material hidrocarbonado contenido dentro de una infraestructura de control de permeabilidad

construida, según aún otra realización.

### **Descripción detallada de realizaciones a modo de ejemplo**

5 A continuación se hará referencia a realizaciones a modo de ejemplo y se usará un lenguaje específico en el presente documento para describir las mismas. No obstante, se entenderá que con ello no se pretende la limitación del alcance de la presente invención. Alteraciones y modificaciones adicionales de las características de la invención descritas en el presente documento, y aplicaciones adicionales de los principios de la invención según se describen en  
10 el presente documento, que concebirá el experto en la técnica en posesión de esta divulgación, han de considerarse dentro del alcance de la invención. Además, antes de dar a conocer y describir realizaciones particulares, ha de entenderse que esta invención no se limita al proceso y a los materiales particulares dados a conocer en el presente documento puesto que pueden variar en cierta medida. También ha de entenderse que la terminología usada en el  
15 presente documento se usa con el propósito de describir realizaciones particulares únicamente y no pretende ser limitativa, ya que el alcance de la presente invención sólo estará definido por las reivindicaciones adjuntas y equivalentes de las mismas.

### **Definiciones**

20 Para describir y reivindicar la presente invención, se usará la siguiente terminología.

Las formas singulares “un”, “una” y “el/la” incluyen referencias en plural a menos que el contexto indique claramente lo contrario. Por tanto, por ejemplo, la referencia a “una pared”  
25 incluye la referencia a una o más de tales estructuras, “una masa permeable” incluye la referencia a uno o más de tales materiales, y “una etapa de calentamiento” se refiere a una o más de tales etapas.

Tal como se usa en el presente documento, “conductos” se refiere a cualquier vía de paso a lo largo de una distancia especificada que pueda usarse para transportar materiales y/o calor de un punto a otro. Aunque los conductos pueden ser generalmente tuberías circulares, también pueden resultar útiles otros conductos no circulares, por ejemplo oblongos, rectangulares, etc. Los conductos pueden usarse ventajosamente para o bien introducir fluidos en, o bien extraer fluidos de, la masa permeable, facilitar una transferencia de calor, y/o transportar dispositivos de radiofrecuencia, mecanismos de célula de combustible, calentadores de resistencia u otros dispositivos.  
30  
35

Tal como se usa en el presente documento, “eje longitudinal” se refiere al eje largo o línea central de un conducto o paso.  
40

Tal como se usa en el presente documento, “transversal” se refiere a una dirección que corta a través de un plano o eje de referencia en un ángulo que oscila entre perpendicular y aproximadamente 45 grados con respecto al plano o eje de referencia.

45 Tal como se usa en el presente documento, “curvarse de manera adaptable” se refiere a la curvatura que sigue al menos parcialmente el movimiento de subsidencia de la masa permeable durante el calentamiento. Tal curvatura permite una deformación lateral del conducto al tiempo que reduce el riesgo de fracturar las paredes del conducto.

50 Tal como se usa en el presente documento, “expansión térmica de eje longitudinal” se refiere a un efecto de acordeón a lo largo de la longitud del conducto ondulado. Cuando las ondulaciones son circunferenciales, por ejemplo en espiral o circulares, a medida que el material del conducto se expande, las ondulaciones permiten que la longitud global del conducto aumente si el conducto puede moverse libremente en uno o ambos extremos. Sin

embargo, si el conducto está fijado a lo largo de su longitud, las ondulaciones permiten absorber la expansión longitudinal en las ondulaciones individuales. Por tanto, un conducto ondulado puede diseñarse para eliminar la expansión lineal o al menos reducir los esfuerzos asociados con la expansión lineal restringida permitiendo que las ondulaciones puedan flexionarse sin pérdida de la integridad de la pared del conducto.

Tal como se usa en el presente documento, "aberturas" se refiere a orificios, ranuras, poros o accesos, etc., en las paredes o juntas del conducto que permiten el flujo de fluido, ya sea gases o líquidos, entre el interior del conducto y el entorno inmediatamente adyacente. El flujo puede ser hacia fuera, hacia el entorno adyacente, si la presión dentro del conducto es mayor que la presión externa. El flujo también puede ser hacia dentro, hacia el interior del conducto, si la presión dentro del conducto es menor que la presión externa.

Tal como se usa en el presente documento, "infraestructura construida" se refiere a una estructura creada por el hombre sustancialmente en su totalidad, en contraposición a las paredes de congelación, paredes de azufre u otras barreras que se forman mediante la modificación o el llenado de poros de una formación geológica existente.

La infraestructura de control de permeabilidad construida a menudo está sustancialmente libre de formaciones geológicas no alteradas, aunque la infraestructura puede formarse adyacente o en contacto directo con una formación no alterada. Tal infraestructura de control puede no estar unida o estar fijada a una formación no alterada por medios mecánicos, medios químicos o una combinación de tales medios, por ejemplo sujeta con pernos a la formación usando anclajes, conexiones u otros elementos adecuados.

Tal como se usa en el presente documento, "triturado" se refiere a romper una formación o masa más grande en trozos. Una masa triturada puede convertirse en escombros o romperse de otro modo en fragmentos.

Tal como se usa en el presente documento, "material hidrocarbonado" se refiere a cualquier material que contiene hidrocarburos a partir del cual pueden extraerse o derivarse productos de hidrocarburo. Por ejemplo, los hidrocarburos pueden extraerse directamente como líquido, retirarse a través de extracción con disolvente, evaporarse directamente o retirarse de otro modo del material. Sin embargo, muchos materiales hidrocarbonados contienen querógeno o bitumen que se convierte en un producto de hidrocarburo a través de calentamiento y pirólisis. Los materiales hidrocarbonados pueden incluir, pero no se limitan a, esquisto bituminoso, arenas bituminosas, carbón, lignito, bitumen, turba y otros materiales orgánicos.

Tal como se usa en el presente documento, "embalse" se refiere a una estructura diseñada para contener o retener una acumulación de fluido y/o materiales móviles sólidos. Un embalse deriva generalmente al menos una parte de cimentación y soporte estructural de materiales de la tierra. Por tanto, las paredes de control no siempre tienen una resistencia o integridad estructural independiente separada del material de la tierra y/o la formación contra el/la que se forman.

Tal como se usa en el presente documento, "masa permeable" se refiere a cualquier masa de material hidrocarbonado triturado que tiene una permeabilidad relativamente alta que supera la permeabilidad de una formación no alterada sólida de la misma composición. Masas permeables adecuadas pueden tener más de aproximadamente el 10% de espacio vacío y normalmente tienen un espacio vacío de aproximadamente desde el 30% hasta el 50%, aunque otros intervalos pueden ser adecuados. Permitir una alta permeabilidad facilita, por ejemplo, a través de la incorporación de grandes partículas de forma irregular, el calentamiento de la masa a través de convección como transferencia de calor primaria al tiempo que también reduce sustancialmente los costes asociados con la trituración en tamaños muy pequeños, por

ejemplo por debajo de aproximadamente 1 a aproximadamente 0,5 pulgadas.

5 Tal como se usa en el presente documento, "pared" se refiere a cualquier característica construida que contribuye al control de la permeabilidad para confinar material dentro de un volumen encapsulado definido al menos en parte por paredes de control. Las paredes pueden estar orientadas de cualquier manera tal como en vertical, aunque los techos, suelos y otros contornos que definen el volumen encapsulado también pueden ser "paredes" tal como se usa en el presente documento.

10 Tal como se usa en el presente documento, "extraído" por explotación minera se refiere a un material que se ha retirado o alterado de una ubicación estratigráfica o geológica original a una segunda ubicación diferente o se ha devuelto a la misma ubicación. Normalmente, el material extraído puede producirse mediante formación de escombros, triturado, detonación explosiva, perforación o retirando material de otro modo de una formación geológica.

15 Tal como se usa en el presente documento, "patrón de flujo convectivo global" se refiere al flujo de calor por convección que se extiende por la mayor parte de la masa permeable. Generalmente, el flujo convectivo se genera orientando uno o más conductos o fuentes de calor en una parte de base o inferior de un volumen definido. Al orientar los conductos de esta manera, los fluidos calentados pueden fluir hacia arriba y los fluidos enfriados fluir de vuelta hacia abajo a lo largo de sustancialmente la mayor parte del volumen ocupado por la masa permeable de material hidrocarbonado en un patrón de recirculación.

25 Tal como se usa en el presente documento, "sustancialmente estacionario" se refiere a la colocación casi estacionaria de materiales con un grado de tolerancia para la subsidencia, la expansión debida al efecto "palomita de maíz" y/o el asentamiento a medida que se retiran hidrocarburos del material hidrocarbonado del interior del volumen encerrado dejando material pobre. En contraste, cualquier circulación y/o flujo de material hidrocarbonado tal como el que se encuentra en lechos fluidizados o retortas giratorias implica una manipulación y un movimiento altamente sustancial de material hidrocarbonado.

35 Tal como se usa en el presente documento, "sustancial" cuando se usa en referencia a una cantidad de un material, o una característica específica del mismo, se refiere a una cantidad que es suficiente para proporcionar un efecto que el material o la característica pretendía proporcionar. El grado de desviación permisible exacto puede depender en algunos casos del contexto específico. De manera similar, "sustancialmente libre de" o similar se refiere a la falta de un elemento o agente identificado en una composición. Particularmente, elementos que se definen como que están "sustancialmente libres de" están o bien completamente ausentes de la composición, o bien están incluidos sólo en cantidades que son suficientemente pequeñas como para no tener un efecto perceptible en la composición.

45 Tal como se usa en el presente documento, "aproximadamente" se refiere a un grado de desviación basado en el error típico experimental para la propiedad particular identificada. La libertad aportada por el término "aproximadamente" dependerá del contexto específico y de la propiedad particular y los expertos en la técnica podrán discernirla fácilmente. El término "aproximadamente" no pretende ni ampliar ni limitar el grado de equivalentes que pudiera admitirse por lo demás para un valor particular. Además, a menos que se especifique lo contrario, el término "aproximadamente" incluirá expresamente "exactamente", en consonancia con lo comentado a continuación en cuanto a intervalos y datos numéricos.

50 Concentraciones, dimensiones, cantidades y otros datos numéricos pueden presentarse en el presente documento en formato de intervalo. Ha de entenderse que tal formato de intervalo se usa meramente por conveniencia y brevedad y debe interpretarse de manera flexible como que incluye no sólo los valores numéricos expresados explícitamente como los límites del intervalo,

sino también que incluyen todos los valores numéricos individuales o subintervalos abarcados dentro de ese intervalo como si cada valor numérico e intervalo se hubiera expresado explícitamente. Por ejemplo, un intervalo de aproximadamente 1 a aproximadamente 200 deberá interpretarse como que incluye no sólo los límites mencionados explícitamente de 1 y 200, sino que también incluye tamaños individuales tales como 2, 3, 4, y subintervalos tales como de 10 a 50, de 20 a 100, etc.

Tal como se usa en el presente documento, una pluralidad de elementos, elementos estructurales, elementos de composición y/o materiales pueden presentarse en una lista común por conveniencia. Sin embargo, estas listas deberán interpretarse como si cada elemento de la lista estuviera identificado individualmente como elemento único y separado. Por tanto, ningún elemento individual de tal lista deberá interpretarse como equivalente *de facto* de ningún otro elemento de la misma lista basándose únicamente en su presentación en un grupo común sin indicaciones de lo contrario.

#### Conducto de calentamiento ondulado

En las figuras 1-8 se ilustran varias realizaciones representativas de un sistema de conducto de calentamiento ondulado y un método de uso del mismo para la mitigación de la expansión térmica y la subsidencia. El conducto de calentamiento puede enterrarse dentro de una masa permeable de material hidrocarbonado extraído, tal como esquisto bituminoso, arenas bituminosas, carbón, etc., que está contenido dentro de una infraestructura de control de permeabilidad construida, y a partir del que se pretenden extraer productos de hidrocarburo. Los productos de hidrocarburo pueden extraerse haciendo pasar un fluido de transferencia de calor, tal como aire caliente, gases de escape calientes, vapor, vapores de hidrocarburo y/o líquidos calientes, al interior o a través del conducto de calentamiento enterrado para calentar el material hidrocarbonado hasta niveles de temperatura suficientes para retirar hidrocarburos del mismo. El fluido de transferencia de calor puede aislarse de la masa permeable u opcionalmente permitírsele fluir por convección a través de volúmenes intersticiales en la masa permeable. Para que el proceso de extracción sea eficaz, puede ser deseable elevar la temperatura de la masa permeable hasta entre 200 grados y 900 grados Fahrenheit para iniciar la pirólisis. Por consiguiente, la temperatura del fluido de transferencia de calor dentro del conducto de calentamiento puede elevarse hasta temperaturas incluso mayores, tales como 1000 grados Fahrenheit o más, para mantener un flujo constante de calor que sale del fluido de transferencia de calor y al interior de la masa permeable.

Se ha descubierto que durante los procesos calentamiento y/o pirolisis, la masa permeable de material hidrocarbonado puede permanecer sustancialmente estacionaria en las direcciones laterales, pero con el tiempo puede experimentar un movimiento de subsidencia vertical significativo y un asentamiento a medida que se liberan los hidrocarburos para que fluyan hacia abajo como un líquido o hacia arriba como un gas. La subsidencia vertical de la masa permeable puede impartir esfuerzos cortantes transversales a las estructuras enterradas dentro de la masa permeable, que conducen a una acumulación de esfuerzos laterales perjudiciales en las paredes y juntas de los conductos de calentamiento u otros conductos. Al mismo tiempo, con suficiente peso superpuesto, la naturaleza particulada, triturada, del material hidrocarbonado extraído puede actuar para restringir cualquier expansión térmica longitudinal que alivie el esfuerzo del conducto a medida que éste se calienta a temperaturas elevadas. Cuando se centran en puntos de concentración de esfuerzo localizados, los esfuerzos inducidos por cizalladura y los esfuerzos inducidos por calor pueden combinarse entre sí para superar los límites materiales de las paredes y juntas del conducto, dando como resultado una fractura que permite que el fluido de calentamiento escape. Es deseable, por tanto, mantener la integridad estructural del conducto de calentamiento enterrado dentro de la masa permeable sujeta a subsidencia a través de la mitigación de la expansión térmica perjudicial y los efectos inducidos por subsidencia experimentados por el conducto.

Realizaciones a modo de ejemplo de una infraestructura de control de permeabilidad construida, y la masa permeable de material hidrocarbonado contenido dentro de su volumen sustancialmente encapsulado, se describen en más detalle en la solicitud de patente estadounidense en tramitación junto con la presente y de titularidad compartida n.º 12/028.569, presentada el 8 de febrero de 2008, y titulada "Methods Of Recovering Hydrocarbons From Hydrocarbonaceous Material Using A Constructed Infrastructure And Associated Systems", solicitud que se incorpora como referencia en su totalidad en el presente documento.

Según una realización, la figura 1 proporciona una vista esquemática lateral, con corte parcial, de una infraestructura de control de permeabilidad construida o embalse 10, una masa 30 permeable de material 32 hidrocarbonado, una fuente 40 de calor y un sistema 62, 64, y 66 de tuberías de interconexión. En la realización mostrada, la rasante 4 existente se usa principalmente como soporte para una capa 16 de suelo impermeable. Las paredes 12 laterales de embalse de la cápsula exterior pueden proporcionar contención y pueden estar, aunque no es necesario, subdivididas por paredes 14 interiores. La subdivisión puede crear cápsulas 22 de contención separadas dentro de una contención 20 en cápsula mayor del embalse 10 que puede tener cualquier geometría, tamaño o subdivisión.

Las paredes 12 y 14 laterales, así como las capas de cubierta 18 impermeable y de suelo 16 impermeable, pueden comprender el embalse 10 de control de permeabilidad que define el volumen 20 encapsulado, y pueden estar formadas por cualquier material adecuado. Por ejemplo, las paredes 12 y 14 laterales del embalse 10 también pueden ser autoportantes, estando las bermas para colas, paredes y suelos compactados y diseñados por ingeniería para que tengan estructura así como impermeabilidad sustancial (por ejemplo suficiente para evitar un escape incontrolado de fluidos desde el embalse). Además, la capa 18 de cubierta impermeable puede usarse para impedir el escape incontrolado de elementos volátiles y gases, y para dirigir los gases y vapores hacia salidas 66 de recogida de gases apropiadas. De manera similar, puede usarse una capa 16 de suelo impermeable para contener y dirigir líquidos recogidos hacia una salida adecuada tal como el sistema 26 de drenaje para retirar productos líquidos de regiones inferiores del embalse. Aunque pueden ser deseables paredes laterales impermeables en algunas realizaciones, no siempre se requieren. Tener paredes laterales permeables puede permitir alguna pequeña salida de gases y/o líquidos del embalse. Además, una o más paredes pueden ser estructuras de múltiples capas para proporcionar control de permeabilidad, aislamiento térmico y/u otras características al sistema.

Una vez que las estructuras 12 y 14 de pared se han construido por encima de una capa 16 de suelo impermeable y construida, que comienza desde la superficie 6 del terreno, el material 32 hidrocarbonado extraído (que puede triturarse o clasificarse según su tamaño o riqueza en hidrocarburos), puede colocarse en capas sobre (o junto a) conductos 62 o tuberías de calentamiento tubulares colocadas previamente, tuberías 64 de drenaje de fluido y/o tuberías 66 de recolección o inyección de gas. Estas tuberías pueden orientarse y diseñarse con cualquier patrón de flujo óptimo, ángulo, longitud, tamaño, volumen, intersección, cuadrícula, dimensiones de pared, construcción de aleación, diseño de perforación, tasa de inyección y tasa de extracción. En algunos casos, tuberías tales como las usadas para la transferencia de calor pueden conectarse a, recircular a través de o derivar calor de una fuente 40 de calor. Alternativamente, o en combinación con, los gases recuperados pueden condensarse mediante un condensador 42. El calor recuperado por el condensador puede usarse opcionalmente para complementar el calentamiento de la masa permeable o para otras necesidades de proceso.

La fuente 40 de calor puede derivar o crear calor a partir de cualquier fuente de calor adecuada incluyendo, pero sin limitarse a, células de combustible (por ejemplo células de combustible de óxido sólido, células de combustible de carbonato fundido y similares), fuentes solares, fuentes eólicas, calentadores de combustión de líquido o gas de hidrocarburo, fuentes de calor

geotérmicas, centrales de energía nuclear, centrales de energía alimentadas por carbón, calor generado por radiofrecuencias, energía undimotriz, cámaras de combustión sin llama, cámaras de combustión distribuida natural o cualquier combinación de las mismas. En algunos casos, pueden usarse calentadores de resistencias eléctricas u otros calentadores, aunque las células de combustible y los calentadores basados en combustión son particularmente eficaces. En algunas ubicaciones, el agua geotérmica puede hacerse circular a la superficie y dirigirse al interior de la infraestructura en cantidades adecuadas para calentar la masa permeable.

En una realización, el calentamiento de la masa 30 permeable puede conseguirse mediante calentamiento por convección a partir de la combustión de hidrocarburos. De particular interés es la combustión de hidrocarburos realizada en condiciones estequiométricas de combustible con respecto a oxígeno. Las condiciones estequiométricas pueden permitir un aumento significativo de temperaturas de gas de calor. La combustión estequiométrica puede emplear, aunque no requiere generalmente, una fuente de oxígeno puro que puede proporcionarse mediante tecnologías conocidas incluyendo, pero sin limitarse a, concentradores de oxígeno, membranas, electrolisis y similares. En algunas realizaciones el oxígeno puede proporcionarse a partir de aire con cantidades estequiométricas de oxígeno e hidrógeno. El gas residual de combustión puede dirigirse a un intercambiador de calor de temperatura ultraalta, por ejemplo uno de cerámica u otro material adecuado que tenga una temperatura de funcionamiento por encima de aproximadamente 2500°F. El aire obtenido del ambiente o reciclado de otros procesos puede calentarse por medio del intercambiador de calor de temperatura ultraalta y después enviarse al embalse para calentar la masa permeable. Los gases residuales de combustión pueden entonces secuestrarse sin necesidad de una separación adicional, es decir, debido a que el gas residual es predominantemente dióxido de carbono y agua.

Un fluido de transferencia de calor líquido o gaseoso puede transferir calor de la fuente 40 de calor, a través del conducto 62 de calentamiento y al interior de la masa 30 permeable de material 32 hidrocarbonado.

Los líquidos o gases extraídos de la zona 20 ó 22 de tratamiento de embalse en cápsula pueden almacenarse en un depósito 44 acumulador cercano o dentro de una contención 20 ó 22 en cápsula. Por ejemplo, la capa 16 de suelo impermeable puede incluir una zona 24 inclinada que dirige líquidos hacia el sistema 26 de drenaje, desde el que se dirigen los líquidos al depósito 44 acumulador a través del sistema 64 de tuberías de drenaje.

A medida que el material 32 de escombros colocado llena la zona 20 ó 22 de tratamiento en cápsula, la masa 30 permeable también puede convertirse en el soporte de techo para la capa 18 de cubierta impermeable diseñada por ingeniería, que puede incluir una barrera para fluido y gas diseñada por ingeniería. Por encima de la capa 18 de cubierta puede añadirse material 28 de relleno para formar una capa superior que puede crear una presión litostática sobre las zonas 20 ó 22 de tratamiento en cápsula. Cubrir la masa 30 permeable con una capa 28 de relleno compactada suficiente para crear una mayor presión litostática dentro de la masa 30 permeable puede resultar útil para aumentar adicionalmente la calidad del producto de hidrocarburo. La capa 28 de relleno compactada puede cubrir sustancialmente la masa 30 permeable, mientras que la masa 30 permeable a su vez puede soportar sustancialmente la capa 28 de relleno compactada.

La figura 2 es una ilustración de la masa 30 permeable de material 32 hidrocarbonado contenido dentro de la infraestructura de control de permeabilidad construida o embalse 10. La masa permeable puede llenar sustancialmente el volumen 20 o cápsula de contención definido por las paredes 12 laterales, la capa 16 de suelo impermeable y la capa de cubierta impermeable (no mostrada). Como se expuso anteriormente, se ha descubierto que durante el proceso de calentamiento la masa permeable de material hidrocarbonado puede experimentar un movimiento de subsidencia vertical significativo y un asentamiento a medida que se liberan

los hidrocarburos. Por ejemplo, durante la fase de llenado y antes de comenzar el proceso de calentamiento, el volumen 20 encapsulado puede llenarse sustancialmente con material 32 hidrocarbonado de modo que la superficie superior de la masa 30 permeable está sustancialmente a nivel con la parte superior de las paredes 12 laterales para maximizar la cantidad de material hidrocarbonado incluido en el proceso por lotes.

Los gradientes de temperatura pueden empezar a desarrollarse con la introducción de calor en la masa permeable, volviéndose las regiones central y superior más calientes que los bordes laterales e inferior adyacentes a los límites sin calentar de la cápsula 20 de contención. Los hidrocarburos pueden empezar a fluir más rápidamente desde las regiones más calientes, dando como resultado la subsidencia inicial de la superficie superior, que tiene el mayor movimiento en las regiones centrales, a la posición  $t_1$ . Sin embargo, el periodo de tiempo necesario para alcanzar la posición  $t_1$  puede variar enormemente, dependiendo de la composición y configuración del material 32 hidrocarbonado, el tamaño de la masa 30 permeable, el método de calentamiento y la tasa de calor proporcionados por el sistema de conducto de calentamiento, las condiciones marginales de aislamiento y entorno ambiental, etc., y puede oscilar entre algunos días y algunos meses. Se ha observado que los productos de hidrocarburo pueden empezar sustancialmente a retirarse cuando el material 32 hidrocarbonado alcanza una temperatura de aproximadamente 600 grados F.

A medida que las temperaturas más altas se propagan hacia los bordes de la cápsula 20 de contención, la superficie superior de la masa 30 permeable puede continuar su subsidencia por las posiciones  $t_2$  y  $t_3$ , siguiendo un patrón en el que las regiones centrales pueden experimentar aún más movimiento vertical que los bordes. Sin embargo, el calentamiento continuo puede finalmente elevar la temperatura del material 32 hidrocarbonado hasta los puntos de extracción crítica por toda la masa permeable, provocando que incluso el material adyacente a los límites del embalse 10 libere hidrocarburos. En ese punto, las regiones externas también pueden experimentar una subsidencia vertical significativa hasta que la superficie superior alcanza la posición  $t_4$ .

La cantidad de subsidencia vertical experimentada por la masa 30 permeable puede variar enormemente, dependiendo de la composición del material 32 hidrocarbonado y su configuración inicial. Aunque se ha exagerado en la figura 2 para un efecto ilustrativo, la cantidad de movimiento vertical de la superficie superior puede oscilar a veces entre el 5% y el 25% de la altura vertical inicial de la masa, siendo común una subsidencia del 12% - 16% para el esquisto bituminoso. En un ejemplo de esquisto bituminoso, tuvo lugar una subsidencia de aproximadamente 30 pulgadas en una masa permeable de 16 pies de profundidad. Como puede apreciar un experto en la técnica, mantener la integridad estructural de cualquier conducto enterrado dentro de una masa permeable sujeta a subsidencia de este tipo y su conexión con las paredes del embalse y/o una fuente de calor ubicada fuera de la estructura de control de permeabilidad construida puede suponer un desafío.

La siguiente descripción se ejemplifica particularmente con respecto a conductos de calentamiento; sin embargo se entenderá que las ondulaciones y configuraciones también pueden aplicarse a conductos de refrigeración, conductos de recogida y otros conductos integrados dentro de la masa permeable.

En la figura 3 se ilustran de manera general diversas configuraciones para el conducto de calentamiento, en la que el conducto de calentamiento está enterrado dentro de la masa permeable del material hidrocarbonado (no mostrado) encerrado dentro de la cápsula 20 de contención definida adicionalmente por las paredes 12 laterales, la capa 16 de suelo impermeable y la capa de cubierta impermeable (no mostrada), y en la que el conducto puede integrarse en la masa 30 permeable al mismo tiempo que se llena la infraestructura 10 de control con material 32 hidrocarbonado. Con la realización 70, por ejemplo, el conducto de

calentamiento puede estar configurado como un conducto unidireccional con aberturas 78 abiertas para permitir que el fluido de transferencia de calor entre directamente y se mezcle por convección, caliente y reaccione por toda la masa permeable. El sistema abierto puede tener un extremo 72 de entrada que se extiende desde el límite de la infraestructura de control de permeabilidad construida, que está acoplado de manera operativa a la fuente de calor del fluido de transferencia de calor (véase la figura 1). Dentro de la infraestructura 10 de control, el conducto 70 de calentamiento puede tener una variedad de configuraciones de red de calentamiento, incluyendo un conducto 74 principal y ramificaciones 76 laterales. Tanto el conducto principal como las ramificaciones pueden tener aberturas 78 abiertas que permiten que el fluido de transferencia de calor pase en dirección a la masa permeable. Esta configuración también funcionaría bien para conductos de recogida para extraer producto de hidrocarburo líquido de regiones inferiores de la masa permeable.

Alternativamente, un conducto 80 de calentamiento puede configurarse como un bucle cerrado que actúa para segregar el fluido de transferencia de calor de la masa permeable y establecer una conducción térmica a través de las paredes de conducto seguido por la convección de tal calor como mecanismo primario para calentar la masa permeable. El sistema cerrado también puede tener un extremo 82 de entrada que se extiende desde el límite de la infraestructura de control de permeabilidad construida y que está acoplado de manera operativa a la fuente de calor del fluido de transferencia de calor. Sin embargo, una vez dentro de la infraestructura 10 de control el conducto 80 de calentamiento puede incluir un conducto 84 principal de entrada y un conducto 86 principal de retorno que están conectadas con uno o más bucles cerrados, y que sirven para mantener separados el material hidrocarbonado y el fluido de transferencia de calor, y para dirigir todo el fluido de transferencia de calor de vuelta hacia fuera por un extremo 88 de retorno que también se extiende desde la pared 12 lateral del embalse.

En la figura 3 se muestra adicionalmente una malla 90 metálica opcional o estructura similar que puede colocarse por debajo de una parte del conducto de calentamiento para mantener la posición relativa del conducto de calentamiento dentro de la masa permeable. Aunque se ha observado que la masa permeable de material hidrocarbonado puede experimentar un asentamiento significativo, el peso concentrado del conducto de calentamiento en combinación con el alto flujo de calor inmediatamente adyacente al conducto puede provocar que la tubería se asiente o se hunda incluso más rápido que la masa permeable en conjunto. En un esfuerzo por mitigar algunos de los efectos dañinos y perjudiciales de la subsidencia, la malla 90 metálica puede servir para distribuir el peso del conducto de calentamiento a través de una parte más amplia de la masa permeable y para mantener la posición relativa del conducto de calentamiento dentro de la masa permeable.

Como se comentará en más detalle a continuación, los efectos dañinos y perjudiciales de la subsidencia pueden mitigarse adicionalmente formando las paredes de los conductos de calentamiento con ondulaciones 92 y 92' circunferenciales, como se ilustra en las figuras 4a y 4b, para ayudar a absorber la combadura y curvatura creadas por el movimiento vertical. Ventajosamente, las ondulaciones 92 y 92' también pueden minimizar la expansión térmica de eje longitudinal del sistema de tuberías configurando las paredes del conducto de calentamiento para que también crezcan o se inclinen radialmente, en lugar de únicamente de manera axial, cuando la temperatura de las paredes del conducto de calentamiento se eleva varios cientos de grados a través del contacto directo con el fluido de transferencia de calor calentado.

En un aspecto, las ondulaciones 92 pueden seguir un patrón sinusoidal de repetición continua de valles 96 y picos 98 de curvatura suave tal como se muestra. En otros aspectos, las ondulaciones pueden tener diferentes formas, tales como caras planas en las partes superiores de los picos y en las partes inferiores de los valles, o paredes lineales para las superficies de transición, o breves secciones de tubería recta y lisa entre ondulaciones, etc. Además, las

ondulaciones 92 pueden alinearse en perpendicular al eje longitudinal del conducto de calentamiento (figura 4a), o las ondulaciones 92' pueden enrollarse en espiral en un ángulo agudo  $\theta$  en relación con el eje longitudinal (figura 4b). La amplitud de las ondulaciones (la distancia entre 96 y 98) y el periodo (la distancia entre picos 98 adyacentes) puede configurarse previamente para proporcionar la flexibilidad y durabilidad óptimas por todo el intervalo de temperaturas y la subsidencia experimentada por el conducto de calentamiento. La amplitud y el periodo de las ondulaciones también proporcionan el significativo beneficio añadido de aumentar sustancialmente el área de superficie disponible para la transferencia de calor.

El conducto de calentamiento ondulado puede formarse a partir de una lámina de metal ondulado que se ha rizado, enrollado y después soldado a lo largo de una costura longitudinal para formar un segmento de conducto tubular. Los segmentos tubulares pueden usarse entonces tal cual o soldarse extremo con extremo con otros segmentos para formar un conducto de calentamiento extendido. Alternativamente, las láminas de metal ondulado pueden soldarse en espiral de manera continua entre sí alrededor y a lo largo de la longitud longitudinal de la tubería, de modo que ninguna costura en la pared del conducto es continuamente paralela con o perpendicular al eje longitudinal de línea central del conducto. La fabricación de tal conducto ondulado puede realizarse opcionalmente en el sitio con equipos portátiles.

Los beneficios de la mitigación de la expansión térmica del conducto ondulado se ilustran en más detalle en las figuras 5a-5c, en las que un segmento a modo de ejemplo de conducto 100 de calentamiento se ha enterrado a una profundidad dentro de una masa 30 permeable de material 32 hidrocarbonado, que a su vez está encerrado dentro de la cápsula 20 de contención de una infraestructura 10 de control de permeabilidad construida. El segmento de conducto puede incluir un extremo 110 de entrada que se extiende más allá del límite de la infraestructura 10 de control y está acoplado de manera operativa a una fuente de calor que está ubicada fuera de la infraestructura de control. Ese conducto de calentamiento puede rodearse con una barrera 112 de aislamiento opcional al pasar a través de la pared lateral de contención.

Tal como se muestra en la figura 5a, el segmento 100 de conducto puede enterrarse a una profundidad dentro de la masa 30 permeable. Como cualquier tubería o conducto calentado, cuando la temperatura de las paredes del segmento 100 de conducto aumenta, la longitud global del segmento aumentará de manera proporcionada si el conducto puede moverse o expandirse libremente en uno o ambos extremos. El movimiento se produce en respuesta a los esfuerzos internos provocados por la expansión del material del conducto. El grado de expansión, evidentemente, depende de los coeficientes de expansión térmica para ese material (por ejemplo coeficientes de expansión tanto lineal como volumétrica). Sin embargo, el material 32 hidrocarbonado extraído que forma la masa 30 permeable puede tener una forma particulada, triturada, que puede "agarrarse" a las paredes del conducto de calentamiento y obstaculizar cualquier movimiento, especialmente si la masa permeable se ha acumulado sobre el conducto para generar un peso a lo largo de la longitud de la estructura enterrada que es suficiente para restringir cualquier movimiento de alivio del esfuerzo del conducto. Este efecto puede aumentar a medida que la longitud del conducto aumenta. De manera adicional, el material 32 hidrocarbonado ubicado delante del extremo 114 de punta, curvado o libre del segmento de conducto también puede actuar para aplacar cualquier movimiento de avance de alivio del esfuerzo, y puede provocar que el extremo de punta, curvado o libre se curve o aplaste como resultado. Por consiguiente, las paredes laterales y juntas del segmento 100 de conducto de calentamiento pueden estar sometidas a una acumulación dañina y perjudicial de esfuerzos durante las operaciones de calentamiento, que podría conducir al pandeo y a la fractura del conducto de calentamiento si no se aborda.

Para superar estos problemas, el segmento 100 de conducto puede formarse con ondulaciones

102 circunferenciales periódicas en las paredes del conducto compuestas por valles 106 y picos 108 alternos que se han configurado con una amplitud 104 en un entorno no calentado. Como se expuso anteriormente, una vez situado en un entorno calentado, la longitud del conducto ondulado intentará aumentar o crecer en la dirección longitudinal o axial como resultado de la expansión térmica lineal. Sin embargo, si el segmento de conducto está fijado a lo largo de su longitud, y ese aumento se bloquea o restringe, las ondulaciones 102 pueden permitir que la expansión longitudinal se redirija y absorba al menos parcialmente en las ondulaciones individuales y/o la curvatura aumentada en los picos 108 y valles 106. En lugar de un gran aumento en la longitud global del segmento de conducto, puede haber un aumento relativamente pequeño en la amplitud 104' de cada ondulación (aumento en amplitud que se ha exagerado en la figura 5c), y que puede ir acompañado de una correspondiente disminución en el radio de curvatura (o un aumento de la curvatura) en cada curva. Por tanto, un conducto ondulado puede configurarse para eliminar o reducir la expansión térmica lineal, o al menos reducir los esfuerzos axiales de compresión asociados con la expansión térmica lineal restringida, permitiendo en su lugar la expansión térmica y/o una curvatura aumentada en cada ondulación.

Las ondulaciones pueden ser adicionalmente beneficiosas al absorber la combadura y la curvatura creadas por la subsidencia de la masa permeable. Tal como se muestra en las figuras 6a-6b, la subsidencia de la masa 30 permeable puede provocar que se tire del segmento 120 de conducto de calentamiento o se curve hacia abajo hacia el centro de la cápsula 20 de contención, incluso cuando el conducto intenta permanecer unido a la entrada 130 fija. Esta deformación lateral relativa entre dos segmentos de la misma tubería puede dar como resultado esfuerzos cortantes transversales significativos y, si no se abordan, pueden provocar que la pared del conducto de calentamiento se desgarre o fracture.

Como se describió anteriormente, el segmento 120 de conducto de calentamiento puede formarse con ondulaciones 122 circunferenciales periódicas en las paredes del conducto. Las ondulaciones pueden estar compuestas por valles 126 y picos 128 alternos que se han configurado con una separación o periodo 124 constante entre picos adyacentes cuando el segmento de conducto está colocado en su orientación recta original y no deformada. Como puede verse en la figura 6b, las ondulaciones 122 pueden mitigar los efectos inducidos por la subsidencia experimentados por el conducto curvado o combado (por ejemplo, doblado) al permitir que la separación normal entre picos adyacentes disminuya hasta una separación 124' más corta en el borde interior del conducto curvado, y aumente hasta una separación 124" más larga en el borde exterior del conducto curvado. Con las ondulaciones configuradas con suficiente amplitud entre los valles y los picos, el cambio de separación puede absorberse con un aumento mínimo en el esfuerzo de compresión en la pared de conducto ubicada en el borde interior, y un aumento mínimo en el esfuerzo de tracción en la pared de conducto ubicada en el borde exterior. Al no ser ninguno de los niveles de esfuerzo suficiente como para alcanzar los límites materiales de las paredes del conducto de calentamiento, puede evitarse o mitigarse el desgarro o la fractura del conducto de calentamiento.

Una variación en las realizaciones del conducto de calentamiento descritas anteriormente se ilustra en las figuras 7a-7c, en las que el conducto 140 de calentamiento ondulado está configurado adicionalmente con un segmento 144 de conducto ondulado vertical corto inmediatamente adyacente a la entrada 150 fija y a la pared de contención. Al igual que las ondulaciones 142 en el segmento 140 de conducto, las ondulaciones 152 en este segmento también están compuestas por valles 156 y picos 158 alternos, con una separación o periodo 154 constante entre picos adyacentes. Las ondulaciones 152 en el segmento 144 de conducto de calentamiento vertical pueden ser o no idénticas a las ondulaciones 142 en el segmento 140 de conducto orientado en horizontal.

Cuando se sitúa inicialmente dentro de la masa permeable, el segmento 144 vertical puede

tener una longitud inicial y el segmento 140 horizontal puede no estar deformado. Sin embargo, a medida que el material 32 hidrocarbonado que llena la cápsula 20 de contención comienza a calentarse, libera hidrocarburos y experimenta subsidencia, el tramo central del segmento 140' horizontal largo puede comenzar a deformarse y arquearse en respuesta al movimiento vertical en el centro de la masa 30 permeable (véase la figura 2). La subsidencia continuará progresando hacia fuera hacia las paredes de contención de la infraestructura 10 de control de permeabilidad construida, hasta que finalmente la parte de la masa permeable que rodea el segmento 44 de conducto vertical también experimente un movimiento hacia abajo. En ese instante, la separación 154 entre ondulaciones 152 puede estirarse hasta una nueva separación 154' aumentando en su lugar el radio de curvatura (por ejemplo una disminución de la curvatura) en los valles 156 y picos 158 de cada ondulación, permitiendo que el segmento vertical se extienda hacia abajo y siga el movimiento de la masa permeable sin experimentar un aumento significativo de esfuerzo en las paredes del conducto de calentamiento.

En la figura 8 se ilustra un diagrama de flujo que representa un método 200 para mantener la integridad estructural del conducto de calentamiento usado para calentar una masa permeable de material hidrocarbonado contenido dentro de una infraestructura de control de permeabilidad construida. El método incluye obtener 202 un conducto de calentamiento con paredes onduladas y que está configurado para transportar un fluido de transferencia de calor. El enterramiento 207 del conducto de calentamiento puede realizarse a una profundidad dentro de la masa permeable de material hidrocarbonado contenido en una infraestructura de control de permeabilidad construida, y teniendo el conducto de calentamiento un extremo de entrada que se extiende desde un límite de la infraestructura de control. El método también incluye acoplar de manera operativa 206 el extremo de entrada del conducto de calentamiento a una fuente del fluido de transferencia de calor. El método incluye además hacer pasar 208 el fluido de transferencia de calor a través del conducto de calentamiento para transferir calor a la masa permeable, estando configuradas las paredes onduladas del conducto de calentamiento para expandirse y mitigar los esfuerzos provocados por la expansión térmica restringida a lo largo del eje longitudinal, y estando configuradas además las paredes onduladas del conducto de calentamiento para curvarse de manera adaptable y mitigar los esfuerzos provocados por la subsidencia de la masa permeable.

En resumen, el conducto de calentamiento ondulado (tal como las realizaciones a modo de ejemplo representadas en las figuras 5a, 6a, y 7a) puede mitigar sustancialmente los efectos dañinos tanto de la expansión térmica longitudinal restringida del propio conducto de calentamiento a medida que aumenta su temperatura varios cientos de grados, así como las deformaciones laterales significativas impuestas sobre el conducto de calentamiento por la ulterior subsidencia de la masa permeable. Por tanto, el conducto de calentamiento puede funcionar para mantener su integridad estructural y continuar aplicando fluido de transferencia de calor por toda la masa permeable durante la duración del proceso de calentamiento.

La descripción detallada anterior describe la invención con referencia a realizaciones a modo de ejemplo específicas. Sin embargo, se apreciará que pueden realizarse diversas modificaciones y cambios sin apartarse del alcance de la presente invención según se expone en las reivindicaciones adjuntas. La descripción detallada y los dibujos adjuntos han de considerarse como meramente ilustrativos, en lugar de como restrictivos, y se pretende que todas esas modificaciones o cambios, si los hubiera, entren dentro del alcance de la presente invención según se describe y expone en el presente documento.

Más específicamente, aunque en el presente documento se han descrito realizaciones ilustrativas a modo de ejemplo de la invención, la presente invención no se limita a estas realizaciones, sino que incluye todas y cada una de las realizaciones que tengan modificaciones, omisiones, combinaciones (por ejemplo, de aspectos que aparecen en diversas realizaciones), adaptaciones y/o alteraciones tal como apreciarán los expertos en la técnica

5 basándose en la descripción detallada anterior. Las limitaciones en las reivindicaciones han de interpretarse en términos generales basándose en el lenguaje empleado en las reivindicaciones y no limitándose a los ejemplos descritos en la descripción detallada anterior o durante la tramitación de la solicitud, ejemplos que deben interpretarse como no exclusivos. Cualquier etapa comentada en cualquier reivindicación de método o proceso puede ejecutarse en cualquier orden y no se limita al orden presentado en las reivindicaciones. Por consiguiente, el alcance de la invención deberá determinarse únicamente por las reivindicaciones adjuntas y sus equivalentes legales, en lugar de por las descripciones y ejemplos aportados anteriormente.

10

Lo que se reivindica y desea proteger mediante el título de patente es:

## REIVINDICACIONES

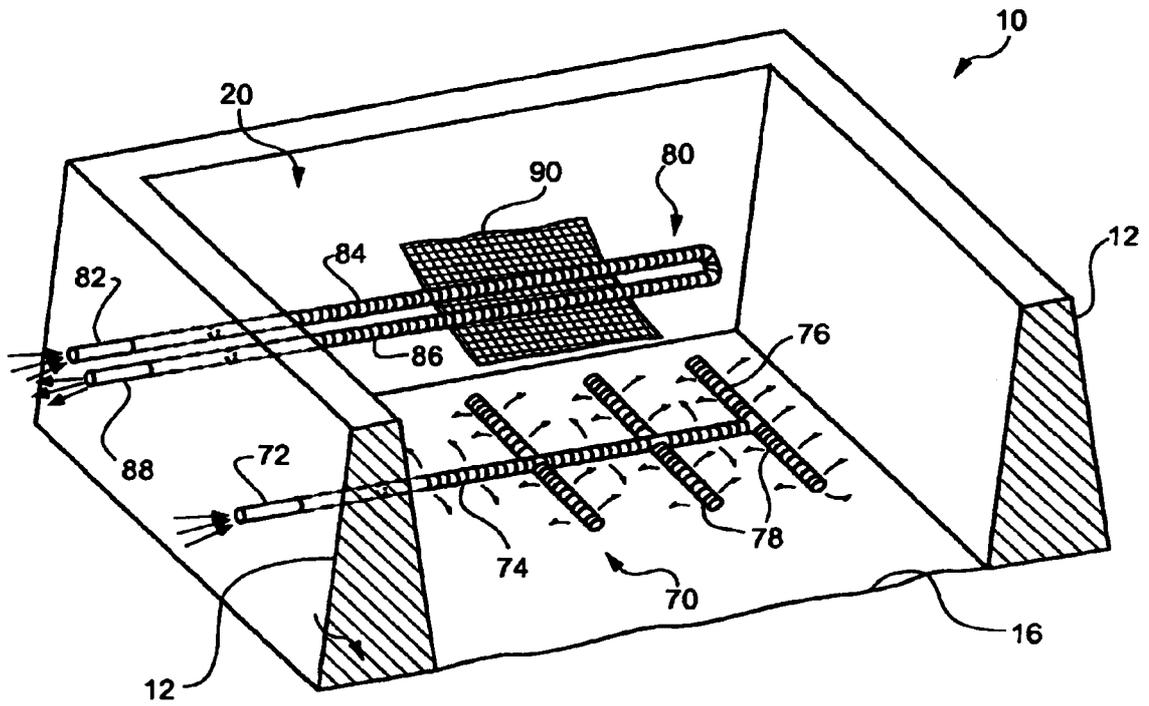
1. Método (200) para mantener la integridad estructural de un conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento usado para calentar una masa (30) permeable de material (32) hidrocarbonado contenido dentro de una infraestructura (10) de control de permeabilidad construida, que comprende:
- 5 obtener (202) un conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento con paredes onduladas y configurado para transportar un fluido de transferencia de calor;
- 10 enterrar (207) el conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento a una profundidad dentro de la masa (30) permeable de material (32) hidrocarbonado, teniendo el conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento un extremo (72) de entrada que se extiende desde un límite de la infraestructura (10) de control de permeabilidad construida;
- 15 acoplar de manera operativa (206) el extremo (72) de entrada del conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento a una fuente del fluido de transferencia de calor;
- 20 hacer pasar (208) el fluido de transferencia de calor a través del conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento para transferir calor a la masa (30) permeable; y
- 25 facilitar la compresión de las paredes onduladas a lo largo de un eje longitudinal del conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento para mitigar los esfuerzos provocados por la expansión térmica restringida a lo largo del eje longitudinal, y un curvado adaptable de las paredes onduladas para mitigar los esfuerzos provocados por la subsidencia sustancial de la masa (30) permeable.
- 30 2. Método según la reivindicación 1, que comprende además orientar un patrón de ondulaciones (92) transversales en las paredes onduladas en perpendicular al eje longitudinal del conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento, o que comprende además orientar un patrón de ondulaciones (92) transversales en las paredes onduladas en un ángulo agudo en relación con el eje longitudinal del conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento.
- 35 3. Método según la reivindicación 1, que comprende además integrar el conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento en la masa (30) permeable al mismo tiempo que se llena la infraestructura (10) de control con material (32) hidrocarbonado.
- 40 4. Método según la reivindicación 1, que comprende además orientar al menos una parte del conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento de manera sustancialmente horizontal dentro de la masa permeable para absorber los efectos de la subsidencia transversalmente al eje longitudinal del conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento, o que comprende además orientar al menos una parte del conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento de manera sustancialmente vertical dentro de la masa (30) permeable para absorber los efectos de la subsidencia a lo largo del eje longitudinal del conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento.
- 45 5. Método según la reivindicación 1, que comprende además formar aberturas (78) en las paredes onduladas en una parte del conducto (70) de calentamiento para permitir que el fluido de transferencia de calor entre en la masa (30) permeable.
- 50 6. Método según la reivindicación 1, que comprende además disponer el conducto (80) de calentamiento en un bucle cerrado que tiene un extremo (88) de retorno que se extiende

desde el límite de la infraestructura (10) de control de permeabilidad construida, para segregar el fluido de transferencia de calor de la masa (30) permeable.

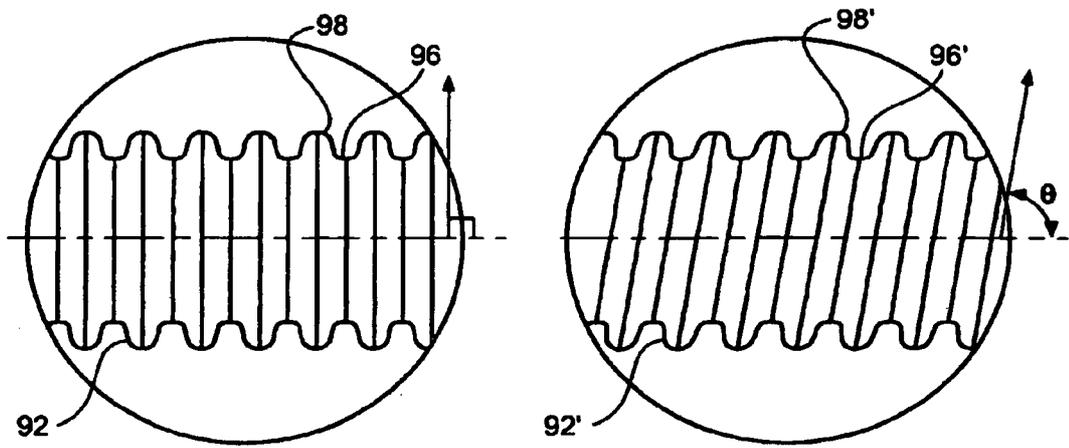
- 5 7. Método según la reivindicación 1, que comprende además: seleccionar el fluido de transferencia de calor del grupo que consiste en un gas de escape calentado, aire calentado, vapor, vapores de hidrocarburo y un líquido calentado; y/o, calentar el fluido de transferencia de calor hasta una temperatura de entre 200 grados y 1000 grados Fahrenheit.
- 10 8. Método según la reivindicación 1, en el que la masa (30) permeable de material (32) hidrocarbonado está formada por esquisto bituminoso y la cantidad de movimiento vertical de la superficie superior oscila entre el 12% y el 16% de la altura vertical inicial de la masa (30).
- 15 9. Método según la reivindicación 1, que comprende además colocar una estructura (90) de malla metálica por debajo de una parte del conducto (80) de calentamiento enterrado dentro de la masa (30) permeable para mantener la posición relativa del conducto (80) de calentamiento dentro de la masa (30) permeable.
- 20 10. Sistema de conducto de calentamiento para transferir calor de un fluido de transferencia de calor a una masa (30) permeable de material (32) hidrocarbonado contenido dentro de una infraestructura (10) de control de permeabilidad construida, que comprende:
- 25 una infraestructura (10) de control de permeabilidad construida;
- una masa (30) permeable de material (32) hidrocarbonado contenido dentro de la infraestructura (10) de control;
- 30 un conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento que está enterrado a una profundidad dentro de la masa (30) permeable y que tiene paredes onduladas, que está configurado para transportar el fluido de transferencia de calor, y que tiene al menos un extremo (72) de entrada que se extiende desde un límite de la infraestructura (10) de control; y
- 35 una fuente del fluido de transferencia de calor acoplada de manera operativa (206) a al menos un extremo (72, 82, 110) de entrada, en el que las paredes onduladas de al menos una parte del conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento enterrado están configuradas para comprimirse axialmente al pasar (208) el fluido de transferencia de calor a través del conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento para transferir calor a la masa (30) permeable, y las paredes onduladas de al menos otra parte del conducto
- 40 (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento enterrado están configuradas para curvarse de manera adaptable en respuesta a la subsidencia sustancial de la masa (30) permeable.
- 45 11. Sistema de conducto según la reivindicación 10, en el que un patrón de ondulaciones transversales en las paredes onduladas está orientado en perpendicular al eje longitudinal del conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento, o en el que un patrón de ondulaciones transversales en las paredes onduladas está orientado en un ángulo agudo en relación con el eje longitudinal del conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento.
- 50 12. Sistema de conducto según la reivindicación 10, en el que al menos una parte del conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento está orientada de manera sustancialmente horizontal dentro de la masa (30) permeable para absorber los efectos de la subsidencia transversalmente al eje longitudinal del conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento.

- 5 13. Sistema de conducto según la reivindicación 10, en el que al menos una parte del conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento está orientada de manera sustancialmente vertical dentro de la masa (30) permeable para absorber los efectos de la subsidencia a lo largo del eje longitudinal del conducto (62, 64, 66, 70, 80) de calentamiento.
- 10 14. Sistema de conducto según la reivindicación 10, que comprende además al menos una parte del conducto (70) de calentamiento que tiene aberturas (78) formadas en las paredes onduladas para permitir que el fluido de transferencia de calor entre en la masa (30) permeable, o que comprende además el conducto (80) de calentamiento que está formado en un bucle cerrado que tiene un extremo (88) de retorno que se extiende desde el límite de la infraestructura (10) de control de permeabilidad construida, para segregar el fluido de transferencia de calor de la masa (30) permeable, o que  
15 comprende además una estructura (90) de malla metálica colocada por debajo de una parte del conducto (80) de calentamiento enterrado dentro de la masa (30) permeable para mantener la posición relativa del conducto (80) de calentamiento dentro de la masa (30) permeable.
- 20 15. Sistema de conducto según la reivindicación 10, en el que el fluido de transferencia de calor se selecciona del grupo que consiste en un gas de escape calentado, aire calentado, vapor, vapores de hidrocarburo y un líquido calentado, o en el que el fluido de transferencia de calor se calienta hasta una temperatura de entre 200 grados y 900  
25 grados Fahrenheit.



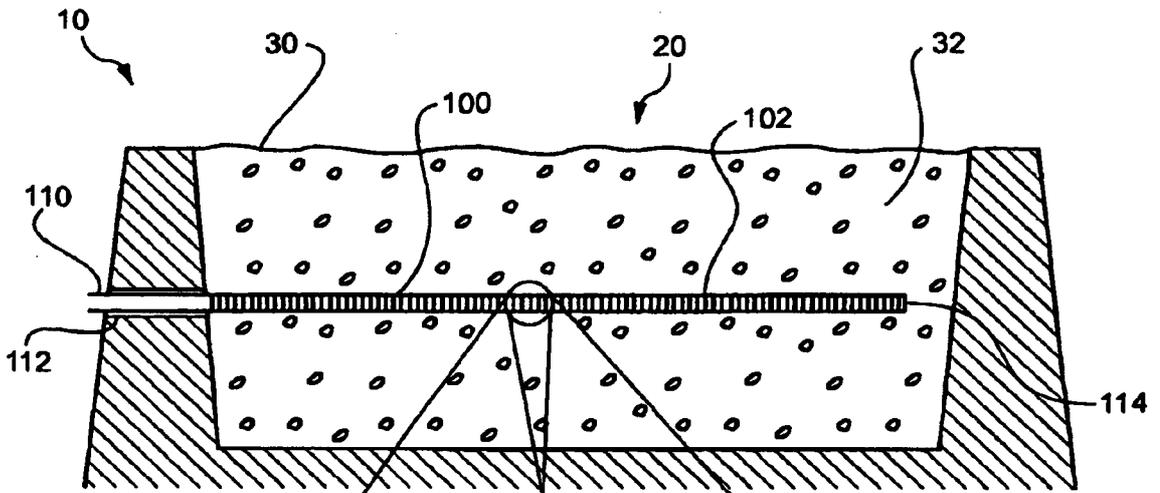


**FIG. 3**

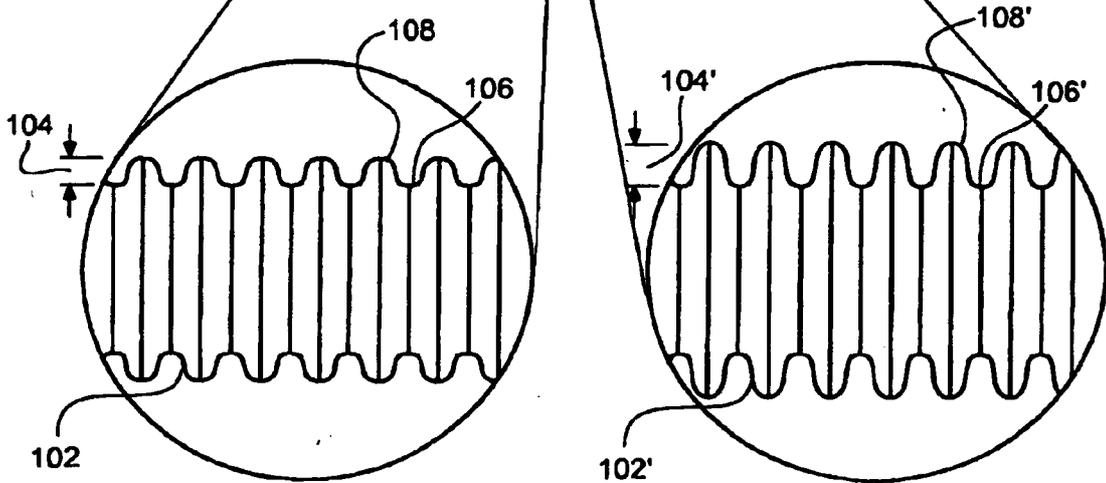


**FIG. 4a**

**FIG. 4b**

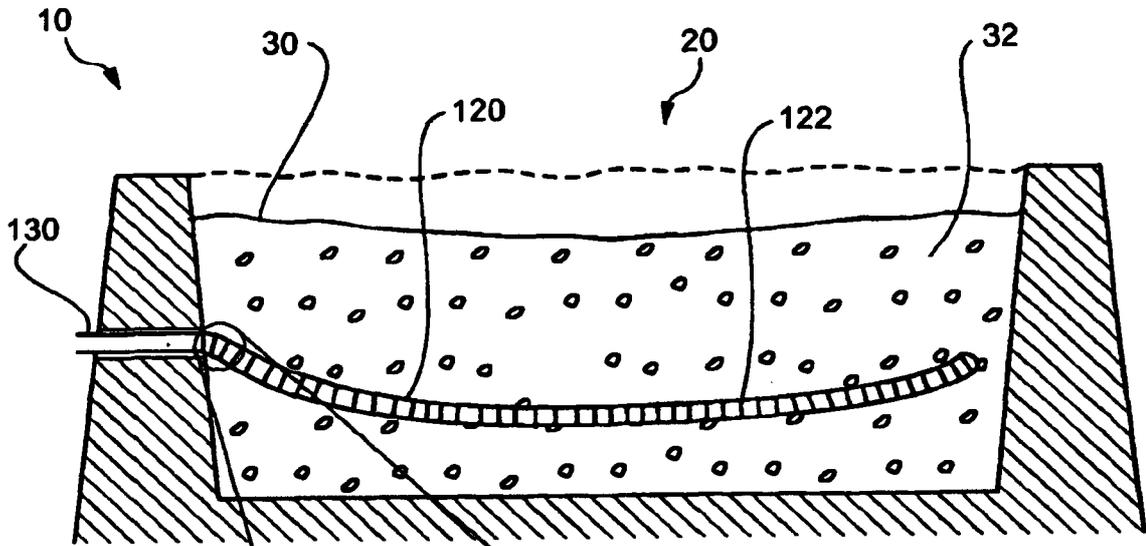


**FIG. 5a**

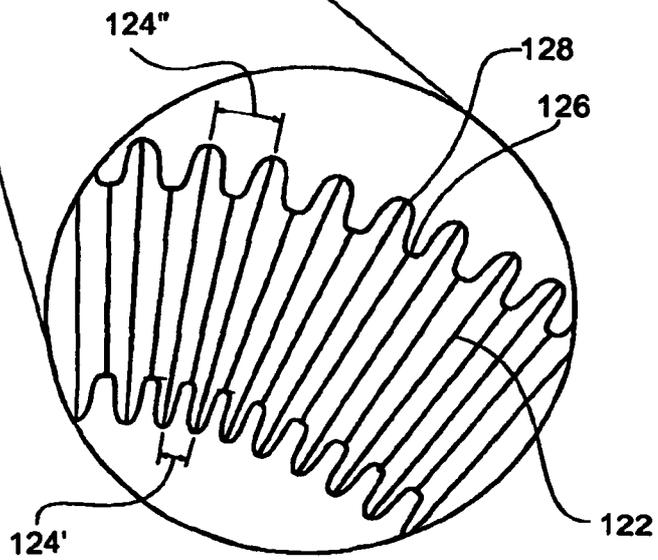


**FIG. 5b**

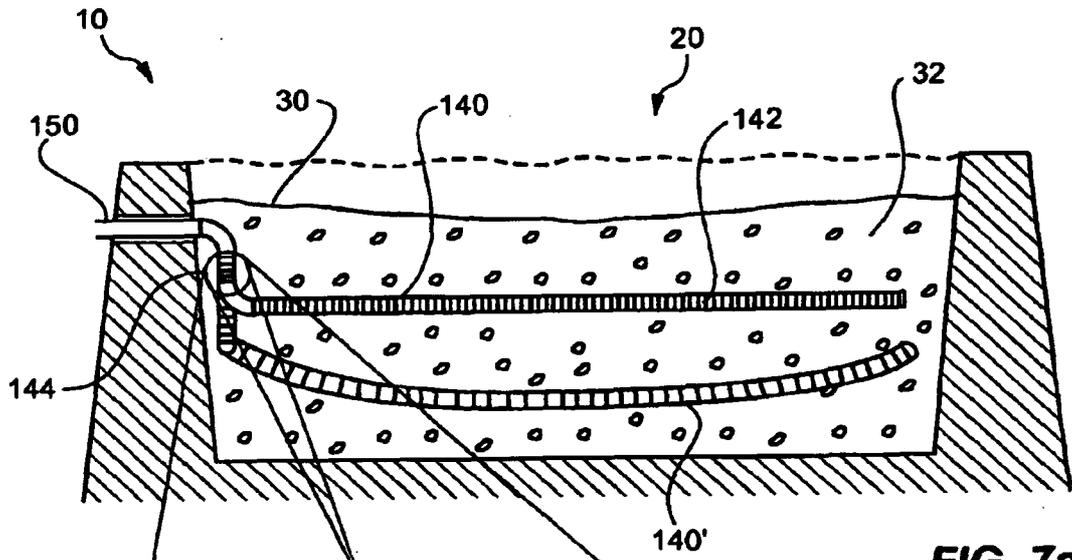
**FIG. 5c**



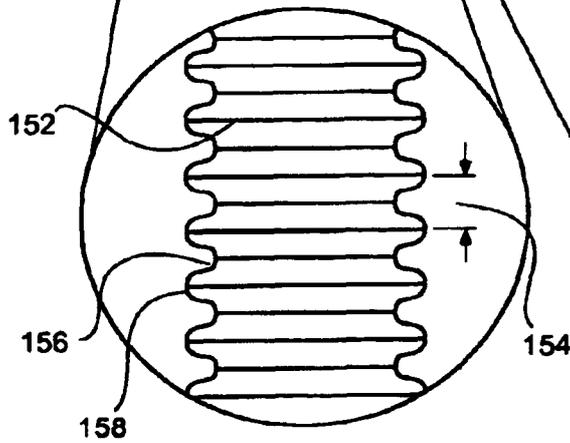
**FIG. 6a**



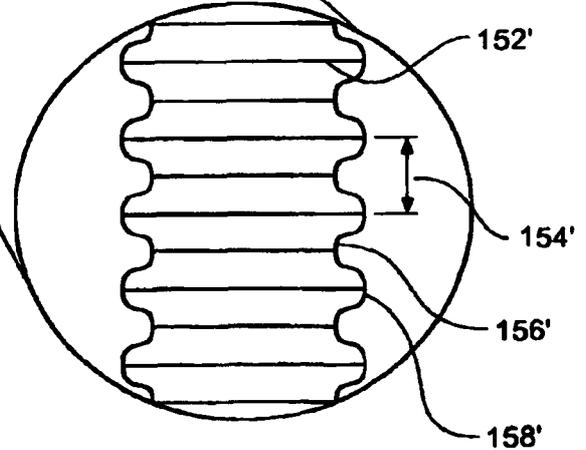
**FIG. 6b**



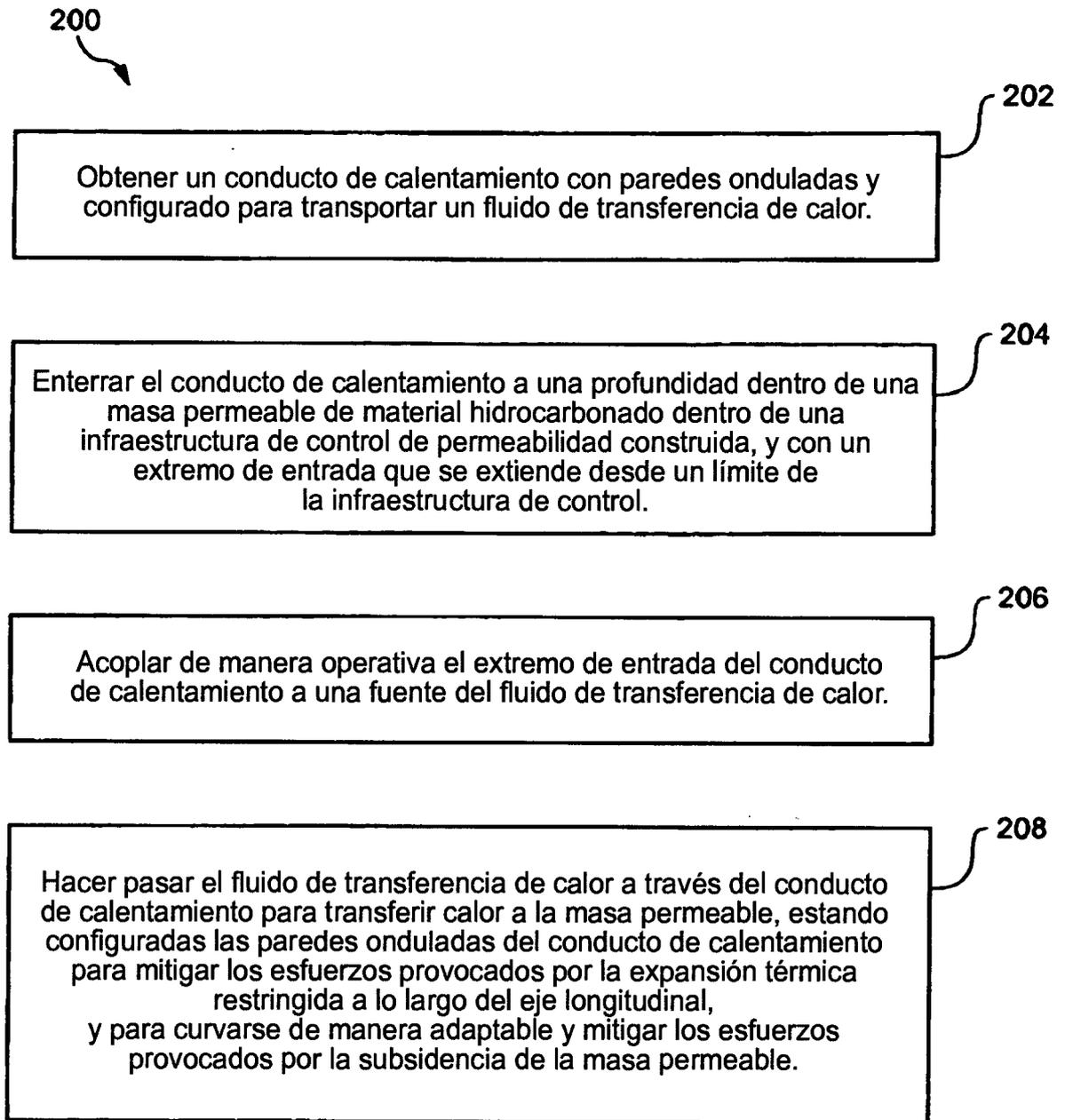
**FIG. 7a**



**FIG. 7b**



**FIG. 7c**



**FIG. 8**