

**PROCESO *IN-SITU* PARA PRODUCIR GAS DE SÍNTESIS A PARTIR DE
YACIMIENTOS DE HIDROCARBUROS SUBTERRÁNEOS**

Campo técnico de la invención

El campo técnico se refiere al tratamiento de un yacimiento de petróleo para producir gas de síntesis.

Antecedentes de la invención

Los yacimientos de petróleo son globalmente abundantes y se usan muchas tecnologías para producir petróleo o gas a partir de estos yacimientos, incluyendo el uso de procesos primarios así como procesos mejorados de recuperación de petróleo (tal como inundación con agua, inundación con vapor e inundación con productos químicos) para producir petróleo adicional a partir de yacimientos convencionales de petróleo y gas.

El crudo de petróleo convencional se procesa refinándolo en combustibles para transporte y materias primas para la industria petroquímica.

Para petróleo denso y petróleo extra denso (por ejemplo, betún) el petróleo es viscoso en las condiciones originales del yacimiento y el petróleo no puede producirse usando métodos convencionales, por lo que el petróleo denso y el betún se tratan térmicamente para reducir la viscosidad de modo que fluyan más fácilmente en el yacimiento y puedan producirse hacia la superficie. El tratamiento térmico permite también que el oxígeno y otros fluidos se muevan más fácilmente dentro del yacimiento.

Después de extraer el petróleo denso o el betún, este normalmente se mejora a crudo de petróleo sintético, que a su vez se refina dando lugar a combustibles para transporte y materias primas para la industria petroquímica.

La producción de petróleo o gas implica la producción final de dióxido de carbono, puesto que el petróleo o el gas o sus productos generalmente se queman para recoger su energía y generar dióxido de carbono.

Existe una necesidad constante de producir combustibles a partir de yacimientos de petróleo y gas que tengan una intensidad de carbono relativamente baja.

Sumario de la invención

De acuerdo con un primer aspecto amplio de la presente invención, se proporciona un método para tratar un yacimiento para recuperar gas de síntesis a partir del mismo, conteniendo el yacimiento petróleo y agua, comprendiendo el método las etapas de:

- a. calentar el yacimiento a una temperatura suficiente para provocar que ocurra al menos una reacción de gasificación, desplazamiento agua-gas y acuatermólisis dentro del yacimiento, implicando al menos una de las reacciones al menos uno del petróleo y el agua;
- b. permitir que al menos una de las reacciones de gasificación, desplazamiento agua-gas y acuatermólisis produzca gas de síntesis a partir del petróleo y el agua, comprendiendo el gas de síntesis gas hidrógeno;
- c. proporcionar al menos un pozo en el yacimiento; y
- d. producir al menos una parte del gas de síntesis hacia la superficie a través de al menos un pozo.

En algunas realizaciones ejemplares del primer aspecto, la etapa de calentar el yacimiento comprende inyectar un agente oxidante en el yacimiento para oxidar al menos una parte del petróleo dentro del yacimiento.

En algunas realizaciones ejemplares del primer aspecto, la etapa de calentar el yacimiento comprende uno o más de:

inyectar un agente oxidante dentro del yacimiento para oxidar al menos una parte del petróleo dentro del yacimiento;

generar ondas electromagnéticas o de radiofrecuencia con una antena electromagnética o de radiofrecuencia ubicada dentro del yacimiento;

inyectar un material caliente dentro del yacimiento; y

generar calor usando un sistema de calentamiento basado en resistencia (óhmico) ubicado dentro del yacimiento.

Después de la etapa de calentamiento, algunas realizaciones ejemplares del primer aspecto pueden comprender la etapa de demorar la producción de la corriente de gas producido para permitir la generación adicional de gas de síntesis. El periodo de tiempo para esta demora puede depender de la temperatura de operación, pero se prefiere que esté dentro del intervalo de tiempo de 1 semana a 12 meses. Un periodo de tiempo más preferido sería de 1 semana a 4 semanas.

En algunas realizaciones ejemplares del primer aspecto, el método comprende además, después del calentamiento, la etapa de producir la corriente de gas producida para permitir la generación adicional de gas de síntesis. La inyección de calor dentro del yacimiento (mediante un agente oxidante o calentamiento por radiofrecuencia o con resistencias) puede ser continua mientras la producción de gas de síntesis sea continua.

En algunas realizaciones ejemplares del primer aspecto, se usa calentamiento dieléctrico para calentar el yacimiento. En estas realizaciones, la radiación electromagnética puede tener una frecuencia en el intervalo de aproximadamente 60 Hz-1000 GHz. El intervalo preferido de frecuencias está en el intervalo de 10 MHz a 10 GHz.

En algunas realizaciones en donde se usa el calentamiento basado en resistencias, denominado también calentamiento óhmico, para calentar el yacimiento, la temperatura puede subirse a entre 200 y 800 °C. El intervalo de temperatura preferido es entre 400 y 700 °C.

De acuerdo con un segundo aspecto amplio de la presente invención, se proporciona un sistema para tratar un yacimiento para recuperar gas de síntesis del mismo, comprendiendo el gas de síntesis gas hidrógeno, conteniendo el yacimiento petróleo y agua, comprendiendo el sistema:

un aparato para calentar el yacimiento y generar gas de síntesis a partir del petróleo y el agua mediante al menos una

reacción de gasificación, desplazamiento agua-gas y acuatermólisis; y

un pozo ubicado en el yacimiento para producir el gas de síntesis hacia la superficie.

En algunas realizaciones ejemplares del segundo aspecto, el aparato para calentar el yacimiento comprende al menos uno de: un inyector de agente oxidante, un electroimán, una antena de radiofrecuencia o un inyector de material caliente.

En algunas realizaciones ejemplares del primer y segundo aspectos, el gas de síntesis producido se consume en un dispositivo de celda electroquímica de combustible o se quema para generar vapor para generación de energía o vapor para recuperación de petróleo o se usa como una materia prima química para la producción de productos químicos tales como combustible, plástico, metanol, hidrógeno, azufre y urea.

En algunas realizaciones ejemplares del primer y segundo aspectos, el petróleo u otros fluidos se producen de forma intermitente o continua desde el yacimiento, ya sea a través del mismo pozo o por pozos adicionales que pueden ser verticales, horizontales, desviados o tener otras geometrías.

La reducción de la intensidad del dióxido de carbono, en algunas realizaciones, puede implicar el uso de gasificación *in situ* para producir gas de síntesis, que comprende vapor, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrógeno, así como metano y otros hidrocarburos originados como gas en solución disuelto en el petróleo o en fase de gas libre. Si se inyecta nitrógeno, este también es generalmente un componente del gas de síntesis. Si está presente azufre, los compuestos de azufre tales como H_2S pueden ser parte del gas de síntesis. El proceso produce entonces un producto de gas de síntesis hacia la superficie.

El gas de síntesis producido es un vector de energía alternativa o materia prima gaseosa para los productos petroquímicos que pueden producirse hacia la superficie desde los yacimientos de petróleo. El gas de síntesis producido puede

quemarse en la superficie para generar energía o calor o consumirse en dispositivos de celda de combustible para la producción de energía o usarse como materia prima para la producción de metanol, combustible líquido, plásticos, amoníaco, hidrógeno, grafeno y urea.

La conversión *in situ* de petróleo o gas, o ambos y, en particular, el crudo de petróleo convencional, petróleo denso y betún o gas natural, en gas de síntesis actualmente se considera que es una tecnología de última generación deseable. Sin embargo, actualmente no se está usando ningún proceso comercialmente viable.

En aspectos amplios, los métodos y sistemas descritos en el presente documento consideran los recursos petrolíferos como fuentes masivas de gas de síntesis; no solo el petróleo sino también el agua de formación que puede suministrar hidrógeno al gas de síntesis generado y suministrar oxidante adicional dentro del yacimiento.

En general, la presente memoria describe métodos para tratar yacimientos de petróleo (tales como por ejemplo, petróleo convencional, petróleo denso, yacimientos de arenas petrolíferas, yacimientos de petróleo de carbonato, gas natural, sulfuros de hidrógeno) para recuperar gas de síntesis. Algunos métodos ejemplares incluyen la inyección de oxígeno o una corriente rica en oxígeno en el yacimiento para quemar una fracción de los fluidos oxidables en el yacimiento. Durante esta parte del proceso, no se producen fluidos hacia la superficie. Después de alcanzar la temperatura diana en el yacimiento, la inyección puede detenerse y se permite que el yacimiento sea penetrado, tiempo durante el cual se consume el oxígeno restante en el yacimiento y pueden tener lugar las reacciones de gasificación y la reacción de desplazamiento agua-gas. Durante estas reacciones, se producen hidrógeno y óxidos de carbono dentro del yacimiento. El pozo de producción, cuando se abre para la producción, produce una mezcla de hidrógeno, óxidos de carbono, agua (gas de síntesis), gases de hidrocarburo y sulfuros de hidrógeno hacia la superficie. Después

de que la velocidad de producción de gas de síntesis caiga hacia un valor umbral, entonces la inyección de oxígeno puede comenzar una vez más y el proceso puede repetirse múltiples veces hasta que la velocidad de producción de gas de síntesis global cae a un valor umbral. De esta manera, el proceso produce gas de síntesis a partir de los hidrocarburos y el agua que estaban presentes dentro del yacimiento. Puede inyectarse agua o vapor o combustibles o productos residuales tales como material orgánico o aguas residuales u otros fluidos o partículas en el yacimiento con el oxígeno o por separado de este.

En algunas realizaciones ejemplares, los ingredientes para la producción de gas de síntesis a partir de petróleo pueden incluir calor, petróleo y agua. La oxidación del yacimiento mediante inyección de oxígeno dentro del yacimiento es un medio para generar calor dentro del yacimiento. Las reacciones que ocurren en el yacimiento a temperaturas elevadas pueden incluir oxidación a temperatura baja y alta, pirólisis (craqueo térmico), acuatermólisis (pirólisis hídrica o reacciones de craqueo térmico en presencia de agua), reacciones de gasificación y reacción de desplazamiento agua-gas.

El presente método puede usarse también en yacimientos de petróleo o gas donde el contenido de agua del yacimiento se considera alto de modo que, en la práctica normal, estos yacimientos no se utilizarían para producir petróleo o gas, respectivamente. El método dado a conocer en el presente documento puede usarse en yacimientos de petróleo de alto contenido de agua, puesto que el hidrógeno se obtiene no solo del petróleo sino también del agua dentro del yacimiento. De este modo, el método dado a conocer en el presente documento puede usarse en yacimientos donde el alto contenido de agua les hace menos valioso que los yacimientos saturados ricos en petróleo. De esta manera, el método convierte yacimientos de petróleo anteriormente menos valiosos en fuentes valiosas de energía y materia prima química,

puesto que el hidrógeno se origina tanto del petróleo como del agua en el yacimiento.

Donde el gas de síntesis incluye compuestos de azufre tales como H_2S , el hidrógeno puede separarse del H_2S para crear una fuente valiosa de hidrógeno.

Se da a continuación una descripción detallada de las realizaciones ejemplares de la presente invención. Debe entenderse, sin embargo, que la invención no se considera limitada a estas realizaciones. Las realizaciones ejemplares se dirigen a aplicaciones particulares de la presente invención, mientras que queda claro para los expertos en la materia que la presente invención tiene aplicabilidad más allá de las realizaciones ejemplares expuestas en el presente documento.

Breve descripción de los dibujos

Las características y ventajas de las realizaciones de la presente solicitud serán evidentes a partir de la siguiente descripción detallada y los dibujos adjuntos, en los que:

De la FIG. 1A a la FIG. 1C son representaciones esquemáticas de las fases de una primera realización ejemplar de la presente invención en donde el yacimiento de petróleo se calienta oxidando una fracción del petróleo dentro del yacimiento.

La FIG. 2 es una representación esquemática de una segunda realización ejemplar de la presente invención en donde el yacimiento de petróleo se calienta usando una antena electromagnética/de radiofrecuencia ubicada dentro del yacimiento.

La FIG. 3 es una representación esquemática de una tercera realización ejemplar de la presente invención que comprende múltiples pozos de producción.

La FIG. 4 es una representación esquemática de una cuarta realización ejemplar de la presente invención en donde un agente oxidante se inyecta continuamente dentro del yacimiento de petróleo o gas para producir hidrógeno.

La FIG. 5 es una representación esquemática de una quinta realización ejemplar de la presente invención en donde uno de los

pozos tiene un cartucho de calentamiento por resistencia dentro del pozo que se usa para calentar el yacimiento para producir gas de síntesis.

La FIG. 6 es un diagrama que ilustra algunas de las reacciones que pueden ocurrir en los métodos descritos en el presente documento dentro del yacimiento para producir gas de síntesis.

Se describirán ahora realizaciones ejemplares de la presente invención con referencia a los dibujos adjuntos.

Descripción detallada de las realizaciones ejemplares

A lo largo de la siguiente descripción se exponen detalles específicos para proporcionar una comprensión más minuciosa a los expertos en la materia. Sin embargo, puede que los elementos conocidos no se hayan mostrado o descrito en detalle para evitar dificultar innecesariamente la comprensión de la divulgación. La siguiente descripción no pretende ser exhaustiva o limitar la invención a la forma precisa de cualquier realización ejemplar. Por consiguiente, la descripción y los dibujos deben considerarse e interpretados en un sentido más ilustrativo que restrictivo.

La presente invención se refiere al tratamiento de un yacimiento de petróleo o gas para la producción de gas de síntesis a partir de petróleo y agua dentro del yacimiento. El tratamiento incluye calentar el yacimiento para posibilitar las reacciones de gasificación y de desplazamiento agua-gas para producir gas de síntesis dentro del yacimiento, y usar después un pozo de producción para producir hidrógeno a partir del yacimiento.

Un alto contenido de agua en yacimientos de petróleo y gas normalmente se ha considerado como desventajoso para la producción de petróleo o gas. Los métodos descritos en el presente documento muestran que un alto contenido de agua es un beneficio para la producción de gas de síntesis, ya que el agua proporciona hidrógeno. Muchas de las reacciones que producen gas de síntesis usan como fuente el hidrógeno del agua en el yacimiento; a las temperaturas de las reacciones, el agua de formación se convierte

en vapor, que después participa en las reacciones de reformado con vapor con los hidrocarburos en el yacimiento.

Un alto contenido de H_2S en los yacimientos de petróleo y gas normalmente se ha considerado como desventajoso para la producción de petróleo y gas. Los métodos descritos en el presente documento muestran que el hidrógeno puede separarse del H_2S y proporcionar el beneficio de una materia prima energética y/o petroquímica sin carbono.

Los procesos de producción de energía *in situ* existentes a partir de yacimientos de petróleo y gas producen cualquiera de petróleo o gas, o ambos, hacia la superficie.

En algunas realizaciones, los presentes métodos toman un enfoque diferente con respecto a los siguientes factores: temporización del calentamiento del yacimiento, temporización de las reacciones de gasificación *in situ* y desplazamiento agua-gas, y producción de gas de síntesis a partir del yacimiento. Todos los métodos del presente documento tienen varias etapas en común.

En primer lugar, se calienta el yacimiento; un método ejemplar sería la inyección de oxígeno donde ocurre combustión *in situ* en el yacimiento durante un periodo de tiempo; otro método ejemplar sería usar radiación electromagnética o de radiofrecuencia; otro método ejemplar sería inyectar vapor a alta presión y alta temperatura u otro material a alta temperatura en el yacimiento; otro método ejemplar sería usar calentamiento mediante resistencias eléctricas.

Si se inyecta un agente oxidante en el yacimiento, se permite que las reacciones de gasificación y desplazamiento agua-gas continúen después de que se detenga la inyección de oxígeno.

Se permite la producción de gas de síntesis a través de los pozos de producción. De esta manera, el proceso produce energía y materia prima química en forma de gas de síntesis desde el yacimiento, un combustible relativamente limpio y una materia prima química útil y valiosa que puede usarse para generar calor y energía o productos químicos valiosos, respectivamente.

A lo largo de esta memoria descriptiva, se usan numerosos términos y expresiones de acuerdo con sus significados ordinarios. Se proporcionan a continuación definiciones de algunos términos y expresiones adicionales que se usan en la descripción que sigue.

"Petróleo" es un producto petrolífero no refinado de origen natural que comprende componentes de hidrocarburo. "Betún" y "petróleo denso" se distinguen normalmente de los productos de petróleo basándose en sus densidades y viscosidades. El "petróleo denso" normalmente se clasifica con una densidad que está entre 920 y 1000 kg/m³. El "betún" normalmente tiene una densidad mayor que 1000 kg/m³. Para los fines de esta memoria descriptiva, los términos "petróleo", "betún" y "petróleo denso" se usan de forma intercambiable, de modo que cada uno de ellos incluye los otros. Por ejemplo, cuando se usa el término "betún" en solitario, este incluye dentro de su alcance "petróleo denso". Los elementos que no son hidrocarburo atrapados en el petróleo ya sea por suspensión, adsorción, emulsión, unión molecular u otros medios, que pueden producirse conjuntamente o movilizarse mediante o con el petróleo, están incluidos dentro de esta definición.

Como se usa en el presente documento, "yacimiento de petróleo" se refiere a una formación sub-superficial que está compuesta principalmente de una matriz porosa que contiene productos petrolíferos, en concreto petróleo y gas. Como se usa en el presente documento "yacimiento de petróleo denso" se refiere a un yacimiento de petróleo que está compuesto principalmente de una roca porosa que contiene petróleo denso. Como se usa en el presente documento "yacimiento de arenas petrolíferas" se refiere a un yacimiento de petróleo que está compuesto principalmente de roca porosa que contiene betún. La "fase acuosa" en una roca del yacimiento es el agua intersticial presente en la roca del yacimiento poroso.

La "temperatura natural del yacimiento" es una temperatura ambiente de un yacimiento frío o no calentado. La "temperatura del

yacimiento" puede referirse a la temperatura del yacimiento natural o la temperatura del yacimiento calentado.

"Craqueo" se refiere a una división de las cadenas de hidrocarburo más largas en compuestos de cadena más corta. "Hidrogenación" se refiere a una adición de hidrógeno a un hidrocarburo o se refiere a una reacción de sustitución donde se consume hidrógeno.

El término "*in situ*" puede referirse al entorno de un yacimiento de arena petrolífera sub-superficial. "In situ" significa "en esa posición" o "en su lugar original".

De la FIG. 1A a la FIG. 1C ilustran una realización ejemplar de la presente invención para tratar un yacimiento de petróleo en el cual el petróleo y el agua dentro del yacimiento se convierten en gas de síntesis.

En la realización ilustrada en la FIG. 1A a la FIG. 1C, la tecnología utiliza una configuración invertida de pozo de drenaje de gravedad asistida por vapor. La realización ejemplar 10 en la FIG. 1A a la FIG. 1C incluye tres fases por ciclo, se muestra en vista de pozo descendente y vista de pozo transversal. En la Fase 1 (FIG. 1A), se inyecta oxígeno 12 en el yacimiento 14 a través de un pozo de inyección 16 (abierto), donde una parte del betún se quema en una zona caliente de combustión

20 para generar las temperaturas (por ejemplo, $>700^{\circ}\text{C}$) requeridas para las reacciones de gasificación, desplazamiento agua-gas y/o acuatermólisis. El pozo de producción 18 se cierra durante la Etapa 1. En la Fase 2 (FIG. 1B), se detiene la inyección de oxígeno 12 (el pozo de inyección 16 está cerrado y el pozo de producción 18 permanece cerrado) y se consume el oxígeno 12 restante en el yacimiento 14. Puesto que el yacimiento 14 en la región cercana al pozo está caliente, las reacciones de gasificación, desplazamiento agua-gas y acuatermólisis continúan. Los productos gaseosos (gas de síntesis) 22 de las reacciones se acumulan y ascienden en el yacimiento. Posteriormente, se inicia la Fase 3 (FIG. 1C), cuando el pozo de inyección 16 permanece

cerrado, y se abre el pozo 18 de producción, lo que posteriormente produce gas de síntesis 22 hacia la superficie. Después de que la producción de gas de síntesis haya caído a tasas no comerciales, el proceso puede volver a iniciarse con la Fase 1. El método no está limitado a pozos horizontales sino que también puede realizarse con pozos verticales y desviados y multilaterales. El método puede aplicarse igualmente en un yacimiento de gas. La inyección de un agente oxidante 24 a través del pozo de inyección 16 puede continuar incluso durante la producción del gas de síntesis 22 a través del pozo de producción 18, como se ilustra en la FIG. 4.

En la FIG. 2 se muestra otra realización del método. En esta implementación, el calor proporcionado al yacimiento 14 se consigue usando una antena electromagnética/de radiofrecuencia 26 que genera de radiación electromagnética/de radiofrecuencia 28. El yacimiento 14 experimenta reacciones de gasificación, desplazamiento agua-gas y acuatermólisis en la zona caliente 20 que generan hidrógeno, óxidos de carbono y otros gases dentro del yacimiento 14. El gas de síntesis 22 generado se produce hacia la superficie a través del pozo de producción abierto 18. El método no está limitado a pozos horizontales sino que también puede realizarse con pozos verticales y desviados y multilaterales. El método puede aplicarse igualmente en un yacimiento de gas.

En la FIG. 3 se ilustra otra realización, mostrada en una dirección transversal al pozo, que ilustra calentadores/antenas electromagnéticos/de radiofrecuencia ubicados entre una pluralidad de pozos de producción de hidrógeno 18, las antenas 26 generan radiación 28 en la zona caliente 20 del depósito 14. El método no se limita a pozos horizontales sino que también puede realizarse con pozos verticales y desviados y multilaterales. El método puede aplicarse igualmente en un yacimiento de gas.

Las reacciones generan gas que entonces posibilita el drenaje por gravedad (debido a la diferencia de densidad) del petróleo movilizado caliente y el vapor condensado hacia la base de la

cámara de reacción de gasificación. De esta manera, el proceso se sostiene a sí mismo moviendo el petróleo movilizado hacia la zona reactiva por encima y alrededor del pozo de inyección. Esto sirve de ayuda con las reacciones de gasificación y mantiene la zona de alta temperatura (por ejemplo 700+°C) cerca del par de pozos.

En otra implementación, puede usarse un único pozo donde se inyecta oxígeno a lo largo de una parte del pozo y la producción de gas de síntesis ocurre a lo largo de otra parte del pozo. El pozo puede ser vertical, desviado u horizontal.

En una implementación adicional, el calentamiento del yacimiento puede realizarse por ondas electromagnéticas o de radiofrecuencia.

En una implementación adicional, el calentamiento del yacimiento puede realizarse usando vapor a alta presión y alta temperatura.

A. Calentamiento del yacimiento

Los métodos ejemplares, en una primera etapa, calientan el yacimiento a una temperatura donde las reacciones de gasificación y/o desplazamiento agua-gas pueden tener lugar entre el petróleo y el agua dentro del yacimiento.

El calor puede suministrarse al yacimiento a través de una diversidad de métodos comúnmente conocidos en la técnica. Los métodos disponibles en el mercado incluyen inyección de oxígeno y, en algunos métodos ejemplares, en la etapa de combustión se inyecta oxígeno en el yacimiento durante un periodo de tiempo donde una fracción del petróleo se quema para generar calor dentro del yacimiento para conseguir temperaturas del orden de 400-700 °C. Otros modos de calentamiento conocidos en la técnica incluyen calentamiento basado en electromagnéticos o radiofrecuencia. Otros modos de calentamiento incluyen inyectar materiales calientes dentro del yacimiento.

Después de inyectar calor en el yacimiento, entonces, si se realiza por combustión, la inyección de oxígeno puede detenerse y el yacimiento puede ser penetrado a la temperatura elevada

conseguida por la etapa de combustión. Si se calienta por calentamiento electromagnético, entonces este calentamiento puede continuar para mantener el yacimiento caliente a la temperatura deseada.

B. Periodo de reacciones de gasificación, desplazamiento agua-gas y acuatermólisis

Durante el periodo de tiempo en el cual el yacimiento está a una temperatura elevada, pueden ocurrir las reacciones de gasificación y desplazamiento agua-gas y acuatermólisis con generación consecuente de hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y vapor (vapor de agua). A medida que ocurren las reacciones en el yacimiento, los componentes gaseosos se recogen dentro del espacio del yacimiento.

La FIG. 6 ilustra algunas de las reacciones que pueden ocurrir en el yacimiento. En la FIG. 6, el combustible para oxidación y gasificación es el betún y el coque que se forma a partir de las reacciones que ocurren durante el proceso. El betún puede estar representado como una mezcla de maltenos (saturados, aromáticos y resinas) y asfaltenos (compuestos cíclicos grandes con elevada viscosidad). Durante la oxidación, los maltenos pueden convertirse en asfaltenos. Los asfaltenos pueden convertirse, a través de oxidación tanto a baja como a alta temperatura, así como por craqueo térmico, en una diversidad de productos gaseosos incluyendo metano, hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y gases de alto peso molecular (por ejemplo propano, etc.) y coque. El coque puede convertirse entonces, mediante reacciones de oxidación y gasificación, en productos que incluyen, aunque sin limitación, metano, agua (vapor), monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrógeno. Así mismo, el metano puede convertirse, mediante reacciones de gasificación, en hidrógeno y dióxido de carbono y monóxido de carbono. El monóxido de carbono y agua (vapor) pueden convertirse, a través de la reacción de desplazamiento agua-gas, en hidrógeno y dióxido de carbono. En general, los componentes combustibles en el

sistema, por ejemplo petróleo, coque, metano, pueden gasificarse para producir mezclas de monóxido de carbono, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno e hidrógeno.

C. Producción de gas de síntesis

Después de que ha transcurrido un tiempo suficiente para la generación del gas de síntesis, entonces el gas se produce desde el yacimiento a través del pozo de producción. Al extraer el gas de síntesis del yacimiento, esto promueve las reacciones para generar más gas de síntesis. Durante algunas realizaciones, el petróleo acumulado en las proximidades del pozo de inyección de oxígeno inferior puede producirse a través del mismo pozo de inyección de oxígeno, o un pozo diferente, o venderse comercialmente, al mismo tiempo que el gas de síntesis se produce a través del pozo de inyección superior. Este petróleo puede producirse ya sea continuamente, o al mismo tiempo que la producción de gas de síntesis, o los puertos de oxígeno pueden inyectar oxígeno desde el interior del mismo pozo desde el que se produce continua o intermitente el petróleo. Puede ser ventajoso alterar el enfoque de producción dependiendo de las propiedades tales como la evolución de la cámara del gas de síntesis, la movilidad del petróleo, la presión del yacimiento u otros factores. Si se realiza dentro del mismo pozo de perforación, puede haber beneficios adicionales tales como oxidación parcial en el fondo del pozo y mejora/hidrogenación parcial del petróleo dentro del yacimiento o tubería, efectos de desplazamiento de expansión de gas-combustión (la creación controlada de algo de gas de síntesis dentro de la columna de elevación de petróleo dirige el fluido hacia la superficie como un géiser y crea simultáneamente un vacío/sifón de alto volumen), aislamiento o expulsión de las arenas del pozo dentro del yacimiento o a la superficie mediante efectos de presión y movilización relacionados, y calentamiento del petróleo/emulsión según sube hacia la superficie. Parte del hidrógeno puede proceder del agua que se produce conjuntamente con el petróleo. Esto puede realizarse añadiendo pequeñas cantidades

de oxígeno descendente a los fluidos que ascienden en condiciones de concentración/temperatura pirofórica.

Los expertos en la materia saben que los diversos componentes de gas de síntesis pueden separarse a través de una amplia diversidad de procesos bien conocidos que incluyen destilación criogénica, absorción/adsorción de presión oscilante, absorción/adsorción de temperatura oscilante, membranas, tamices moleculares, centrífugas, campos magnéticos, estratificación/destilación por gravedad/flotación, reacciones químicas, degradación térmica, campos resonantes, irradiación, campos eléctricos, destrucción acústica, segregación acústica y otros métodos.

D. Nuevo ciclo

Si el calentamiento se realiza de una manera cíclica, por ejemplo desde combustión *in situ* usando inyección de oxígeno como se ilustra en las FIGS. 1A a 1C, entonces después de que la temperatura del yacimiento haya caído, de modo que las velocidades de reacción de gasificación, desplazamiento agua-gas y acuatermólisis hayan caído, de modo que la producción de gas de síntesis caiga por debajo de un valor umbral, entonces se iniciará un nuevo ciclo de inyección de oxígeno y, en consecuencia, de combustión *in situ* que conduce al calentamiento del yacimiento. Posteriormente, se repiten las etapas A a C. Si se realiza un calentamiento continuo por inyección de un agente de oxidación o por métodos de calentamiento electromagnéticos o de radiofrecuencia o resistencia, entonces puede ocurrir la producción de gas de síntesis continua desde el yacimiento.

La FIG. 5 ilustra una implementación de los presentes métodos para tratar un yacimiento de petróleo 14 en el cual el petróleo y el agua dentro del yacimiento 14 se convierten en gas de síntesis 22. En la realización, se emplea calentamiento por resistencia, con calentamiento por resistencia en un pozo cerrado 16. El pozo de producción 18 es abierto para producir el gas de síntesis 22 a la superficie. La pirólisis se produce en la zona caliente 20,

creada por el calentamiento por resistencia. El calentamiento por resistencia se puede generar en ambos pozos 16, 18.

Algunos métodos ejemplares calientan el yacimiento a una temperatura donde tienen lugar las reacciones de gasificación y desplazamiento agua-gas, que implican que el petróleo y/o agua dentro del yacimiento, al inyectar continuamente oxígeno dentro del yacimiento (como se muestra en la FIG. 4), permiten que ocurran reacciones de combustión *in situ* que calientan el yacimiento a la temperatura preferida entre 400 y 700 °C. Este intervalo de temperatura puede alcanzarse o superarse transitoriamente a escala intersticial o dentro de algunas regiones de un yacimiento, y no es necesario que la temperatura promedio de todo el yacimiento esté dentro de este intervalo.

Aunque el yacimiento se ha calentado y está a una temperatura elevada, ocurren las reacciones de gasificación, desplazamiento de agua-gas y acuatermólisis, con producción consecuente de hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y vapor (vapor de agua). A medida que estas reacciones ocurren en el yacimiento, los componentes gaseosos se recogen dentro del espacio del yacimiento, pero tienden a ascender debido a los efectos de flotación en el yacimiento, donde el petróleo movilizado se recoge alrededor del pozo de inyección manteniendo las reacciones allí y los gases se elevan hacia arriba hacia el pozo de producción que hay encima y se recogen en el yacimiento. El gas de síntesis se produce desde el yacimiento a través del pozo de producción.

A medida que se inyecta oxígeno en el yacimiento, se crea una zona reactiva dentro del yacimiento. La zona reactiva se caracteriza por ser la zona con una temperatura que es mayor que la temperatura original del yacimiento. En la zona reactiva, la temperatura sube por encima de 450 °C y, en el frente de reacción, la temperatura puede superar los 900 °C. Con temperaturas mayores de 400 °C, ocurren reacciones de gasificación dentro de la zona caliente que generan hidrógeno, que se produce exclusivamente mediante el pozo de producción superior hacia la superficie.

Dentro de la zona caliente alrededor del pozo de inyección, el petróleo calentado se drena y acumula alrededor del pozo de inyección, suministrando de esta manera más combustible para las reacciones que ocurren alrededor del pozo de inyección.

El gas de síntesis generado a partir de los métodos dados a conocer en el presente documento puede usarse para generar energía, calor, quemarlo para producir vapor que puede usarse para generar energía, o vapor para otros procesos de recuperación de petróleo *in situ*, o como materia prima para producir otros productos químicos, incluyendo combustible, plástico, metanol, urea, hidrógeno, azufre, etc.

A menos que el contexto claramente requiera otra cosa, a lo largo de la descripción y las reivindicaciones:

- “comprender”, “que comprende”, y similares deben considerarse en un sentido inclusivo, a diferencia de un sentido exclusivo o exhaustivo; es decir, en el sentido de “que incluye pero no está limitado a”.

- “conectado”, “acoplado” o cualquier variación de los mismos significa cualquier conexión o acoplamiento, ya sea directo o indirecto, entre dos o más elementos; el acoplamiento o conexión entre los elementos puede ser físico, lógico o una combinación de los mismos.

- “en el presente documento”, “anteriormente”, “posteriormente” y términos de similar importancia, cuando se usan para describir esta memoria descriptiva, se referirán a esta memoria descriptiva en su conjunto y no a ninguna parte particular de esta memoria descriptiva.

- “o” en referencia a una lista de dos o más puntos, cubre todas las siguientes interpretaciones del término: cualquiera de los puntos en la lista, todos los puntos en la lista y cualquier combinación de puntos en la lista.

- las formas singulares “un”, “una” y “el”, “la” incluyen también el significado de cualquier forma plural apropiada.

Los términos que indican direcciones tales como "vertical", "transversal", "horizontal", "hacia arriba", "hacia abajo", "hacia delante", "hacia atrás", "hacia dentro", "hacia fuera", "vertical", "transversal", "izquierda", "derecha", "delante", "detrás", "superior", "inferior", "encima", "debajo", "bajo" y similares, usados en esta descripción y cualquier reivindicación adjunta (cuando esté presente), dependen de la orientación específica del aparato descrito e ilustrado. La materia objeto descrita en el presente documento puede asumir diversas orientaciones alternativas. Por consiguiente, estos términos direccionales no se definen estrictamente y no deben interpretarse de forma estrecha.

Cuando se hace referencia a un componente (por ejemplo un circuito, módulo, montaje, dispositivo, etc.) en el presente documento, a menos que se indique de otra manera, la referencia a ese componente (incluyendo una referencia a un "medio") debería interpretarse como que incluye como equivalentes de ese componente cualquier componente que realice la función del componente descrito (es decir, que sean funcionalmente equivalentes), incluyendo componentes que no son estructuralmente equivalentes a la estructura divulgada que realiza la función en las realizaciones ejemplares ilustradas de la invención.

Los ejemplos específicos de métodos y aparatos se han descrito en el presente documento con fines de ilustración. Estos son únicamente ejemplos. La tecnología proporcionada en el presente documento puede aplicarse a contextos distintos de los contextos ejemplares descritos anteriormente. Son posibles muchas alteraciones, modificaciones, adiciones, omisiones y permutaciones dentro de la práctica de esta invención. Esta invención incluye variaciones sobre las realizaciones descritas que resultarán evidentes para los expertos, incluyendo variaciones obtenidas: reemplazando características, elementos y/o actos con características, elementos y/o actos equivalentes; mezclar y hacer coincidir características, elementos y/o actos de diferentes realizaciones; combinar características, elementos y/o actos de

realizaciones como se describe en el presente documento con características, elementos y/o actos de otra tecnología; y/u omitir la combinación de características, elementos y/o actos de las realizaciones descritas.

Lo anterior se considera únicamente ilustrativo de los principios de la invención. El alcance de las reivindicaciones no debería estar limitado por las realizaciones ejemplares expuestas en lo anterior, sino que debe venir dado por la interpretación más amplia consistente con la memoria descriptiva en su conjunto.

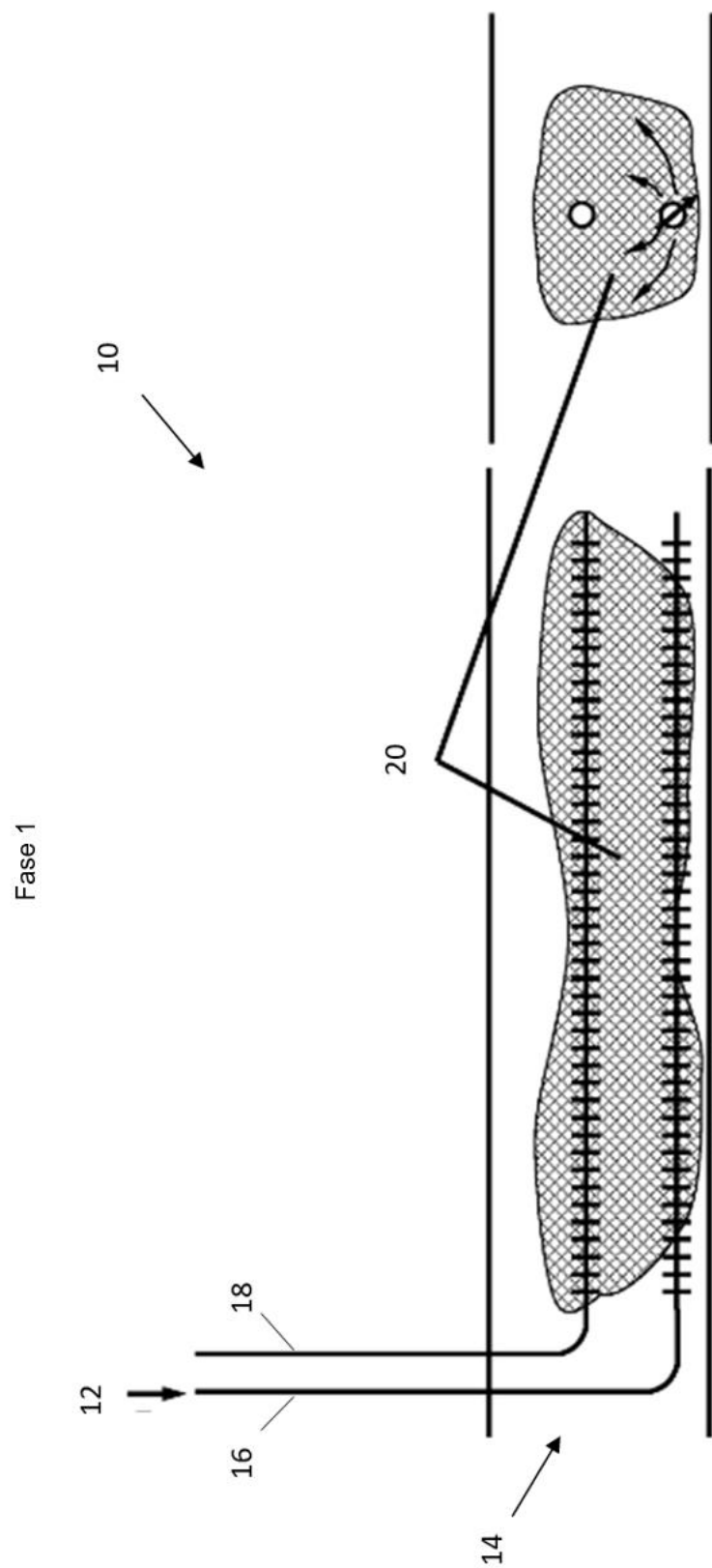


FIG. 1A

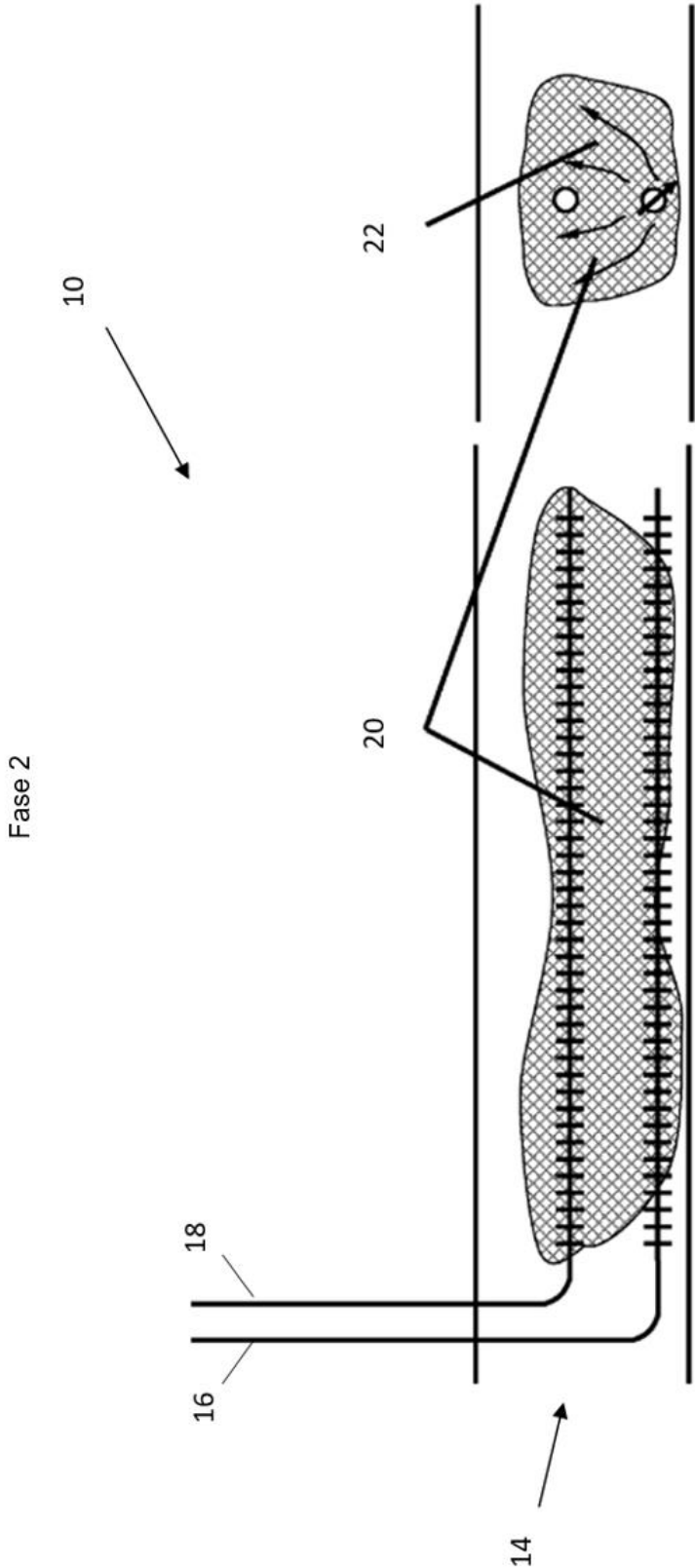


FIG. 1B

Fase 3

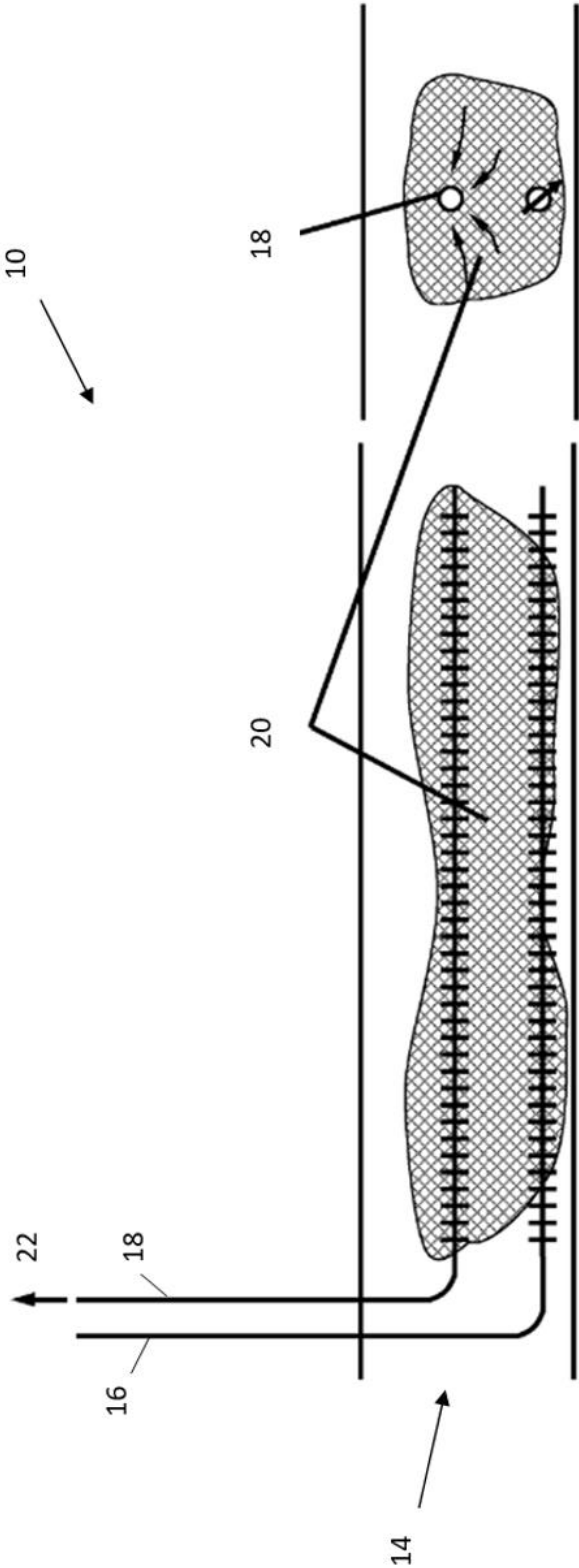


FIG. 1C

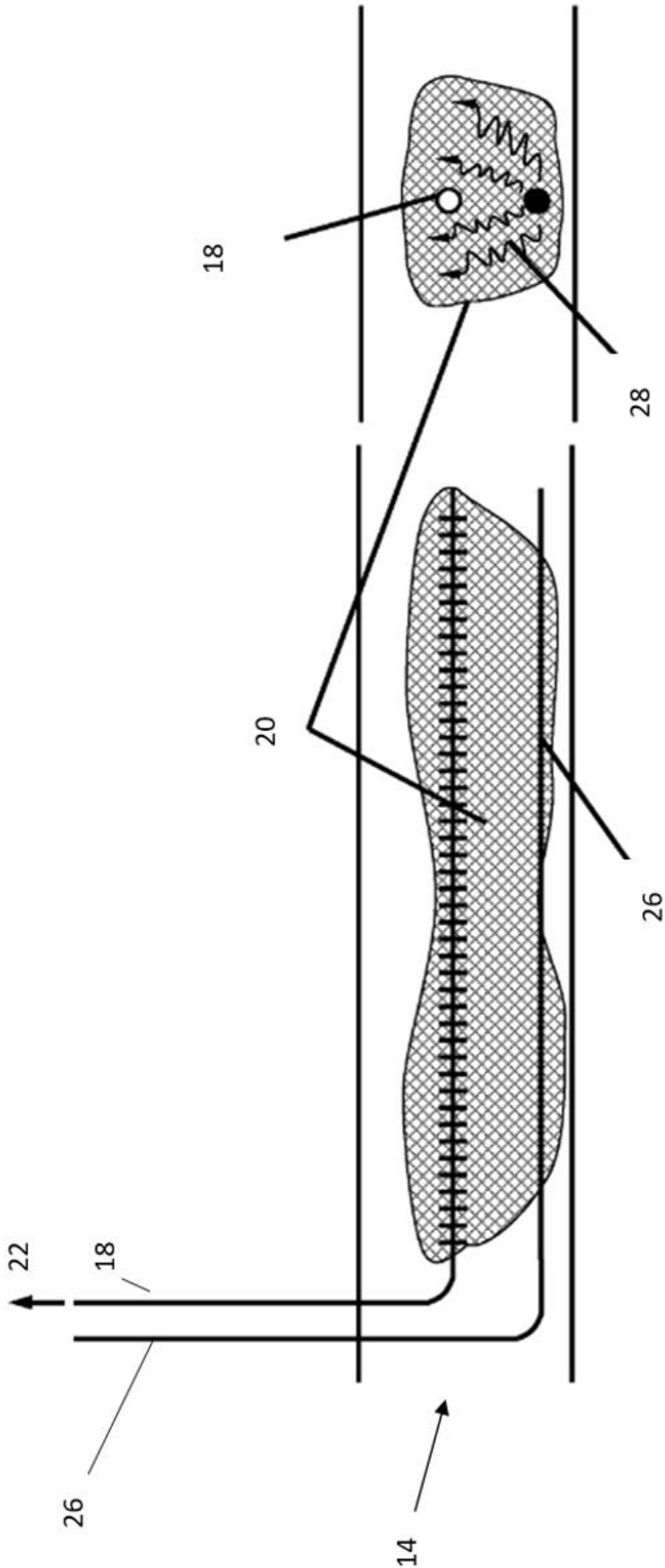


FIG. 2

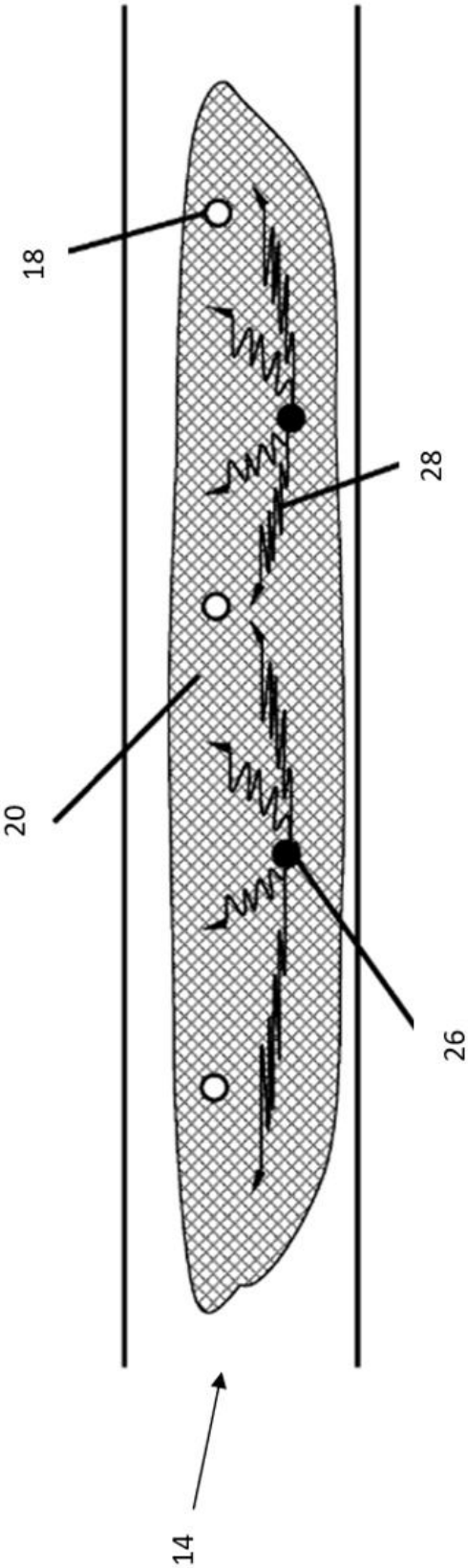


FIG. 3

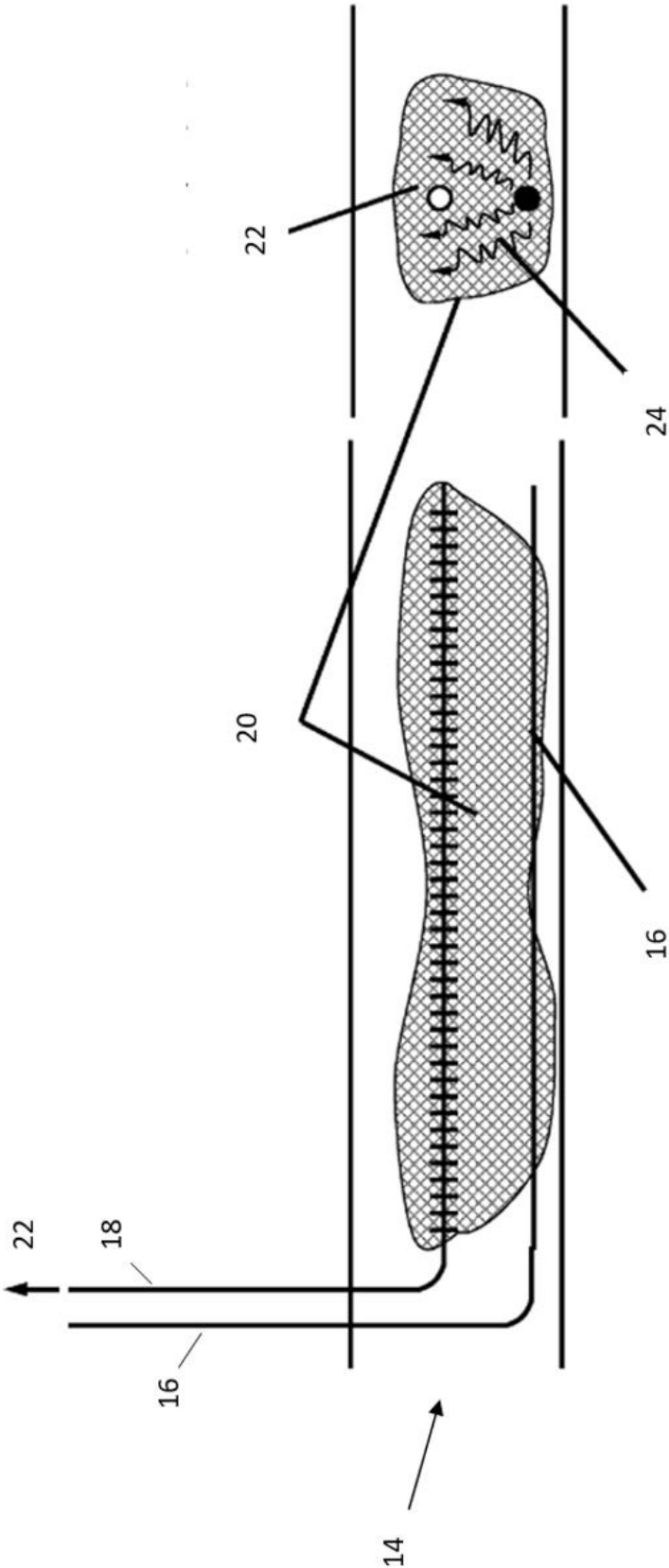


FIG. 4

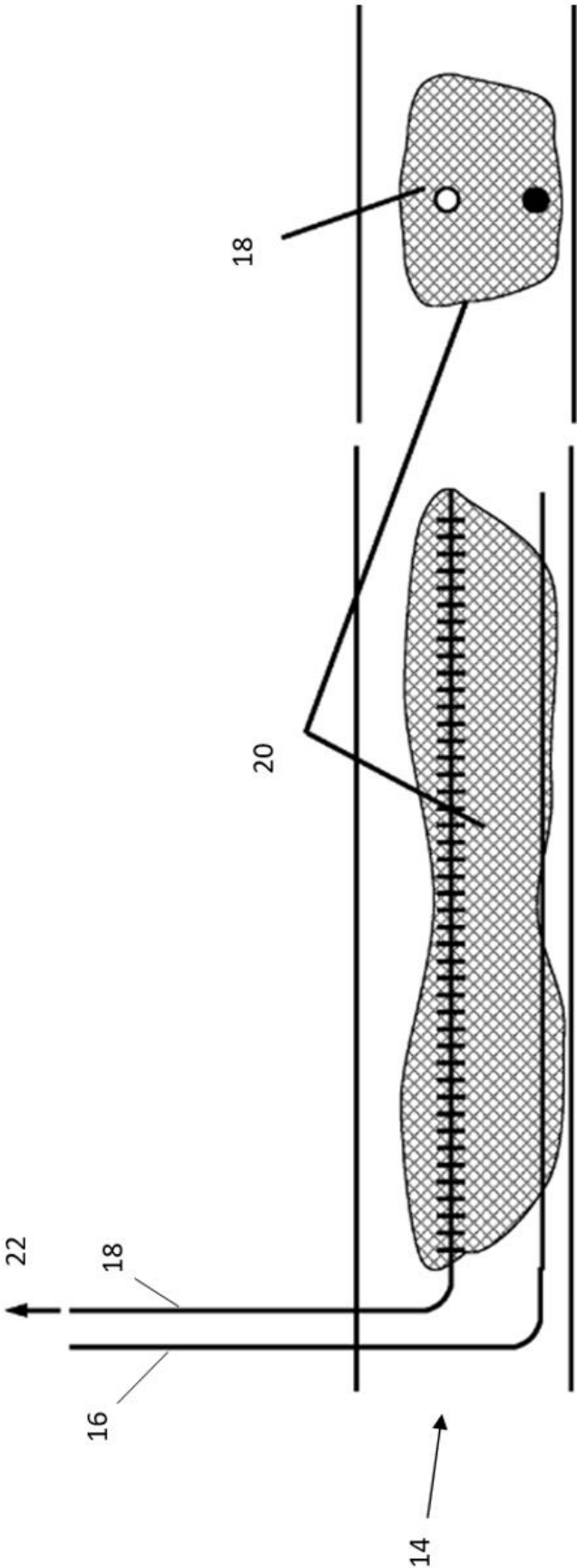


FIG. 5

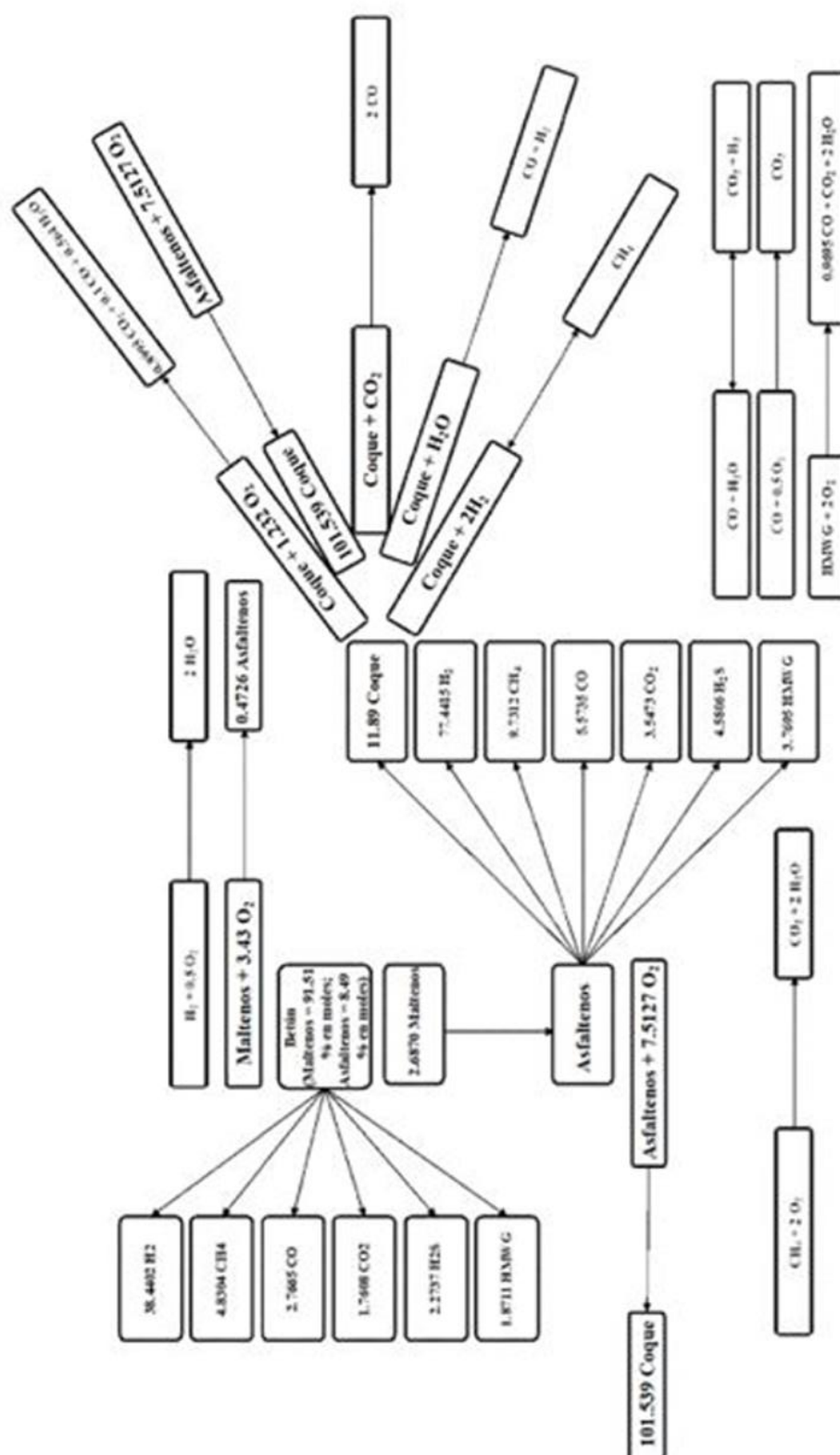


FIG. 6