

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 999 684**

51 Int. Cl.:

F24T 10/10

(2008.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.07.2019** **E 19188962 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.08.2024** **EP 3611441**

54 Título: **Procedimiento para el control del perfil térmico y la recuperación de energía en pozos geotérmicos**

30 Prioridad:

12.08.2018 US 201862717849 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
26.02.2025

73 Titular/es:

**EAVOR TECHNOLOGIES INC. (100.00%)
Suite 1100, 214 11th Avenue SW
Calgary, AB T2R 0K1, CA**

72 Inventor/es:

**CAIRNS, PAUL;
TOEWS, MATTHEW y
REDFERN, JOHN**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 999 684 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

Procedimiento para el control del perfil térmico y la recuperación de energía en pozos geotérmicos

5 SECTOR DE LA INVENCION

La presente invención se refiere al control térmico de la energía térmica absorbida en pozos y, más particularmente, la presente invención se refiere al control de la disipación de temperatura y la recuperación eficiente de energía en pozos geotérmicos, y la optimización del diseño y operación de sistemas de pozos geotérmicos de circuito cerrado.

10 ESTADO DE LA TÉCNICA ANTERIOR

Actualmente, Estados Unidos es un líder mundial en capacidad geotérmica instalada con más de 3.300 megavatios en ocho estados. La mayor parte se encuentra en California.

Como se sabe, en la energía geotérmica, el calor se genera continuamente dentro de la capa de magma a través de la desintegración radiactiva. Se ha informado que la cantidad de calor dentro de los 10.000 metros de la superficie de la Tierra contiene 50.000 veces más energía que todos los recursos de petróleo y gas natural del mundo. Claramente, este es un punto de interés dentro de la comunidad de desarrolladores de energía.

A estas profundidades, se informaron anteriormente problemas relacionados con las altas temperaturas que dañan el equipo. En algunos casos, estos problemas se han mitigado o se han vuelto satisfactoriamente tolerables.

Uno de los puntos clave en la producción de energía geotérmica es la gestión de las pérdidas térmicas dentro del pozo y, por lo tanto, la capacidad de extraer el calor con el fluido de trabajo utilizado como medio de captura y transporte.

La técnica anterior se ha desarrollado en esta área como lo demuestran los documentos presentados. Las referencias generales en esta área incluyen los documentos US 2017/130703, Muir, WO98/22760, Moe *et al.*, WO2017/053884, Geothermic Solution LLC, US2011/224942, Kidwell, US2016/245550, SONJU *et al.* y US 2014/133519, Freitag.

Shulman, en la Patente de Estados Unidos n.º 5515679, presentada el 14 de mayo de 1996, da a conocer un procedimiento para la extracción de calor geotérmico y la utilización de la energía recuperada. Una disposición colectora recibe una red de pozos dispersos dentro de una formación. Se proporcionan varias formaciones o conjuntos de pozos, estando los pozos dispersos dentro de cada formación de pozo específica. El documento no menciona nada con respecto a la disipación térmica a lo largo de los pozos.

En la Patente de Estados Unidos n.º 9556856, presentada el 31 de enero de 2017, Stewart *et al.*, proporcionan un sistema de energía geotérmica y un procedimiento de operación. En la descripción, en referencia a la Figura 15, los titulares de la patente afirman:

"El tubo interior 304 está centralizado en la carcasa exterior 302 por medio de aletas centralizadoras 318 que están ubicadas a intervalos a lo largo del tubo 304 y se deja "abierto" a una corta distancia por encima del tapón inferior 314 para establecer un camino eficiente de circuito cerrado para la circulación del fluido de trabajo (a base de agua) que actúa como medio de transferencia de energía térmica. Estas aletas 318 también actúan como "generadores de turbulencias" mecánicos que inducen características de flujo en el anillo del intercambiador de calor del barreno 320 entre la carcasa exterior 302 y el tubo interior 304 que mejoran moderadamente la transferencia de energía geotérmica hacia o desde las formaciones del suelo mientras se minimizan las pérdidas de presión. Normalmente, el fluido de trabajo se bombea hacia abajo por el anillo 320 (flecha A) y vuelve a subir por el tubo interior 304 (flecha B) hasta la superficie bajo el control del módulo de control de superficie aunque, según la aplicación precisa, la dirección de circulación puede invertirse en algunos casos para proporcionar un rendimiento óptimo".

Este pasaje enseña una inversión del flujo de fluido de trabajo dentro de un solo pozo, pero no aborda ningún mecanismo para controlar los problemas térmicos dentro de la formación donde se está realizando la extracción de calor.

Guodong *et al.*, en "Geothermal exploitation from hot dry rocks via recycling heat transmission in a horizontal well", Energy 128 (2017) páginas 366-377, concluyen que el intercambio de calor se mejora entre la formación rocosa caliente circundante a través de segmentos horizontales largos de un pozo de circuito cerrado utilizando fluidos de trabajo específicos, un aumento en la longitud del pozo horizontal y la tasa de inyección de fluido en tuberías con aislamiento térmico aumentan la tasa de extracción de calor y que existen beneficios al utilizar segmentos horizontales de múltiples ramas.

En conjunto, las enseñanzas de la técnica anterior son útiles, pero no abordan cuestiones como: la gran huella inherente a los pozos horizontales de múltiples ramas, la disposición y configuración de los pozos dentro de un volumen de formación rocosa determinado para una mejor extracción de calor o los máximos y mínimos de temperatura a lo largo de la longitud del pozo.

Reconociendo estas deficiencias, la presente tecnología que se expone en este documento hace avanzar la tecnología geotérmica un paso más allá y combina operaciones unitarias determinantes de una manera única para recuperar de manera eficiente la energía térmica dentro de un gradiente geotérmico independientemente de la calidad y variación del gradiente, la porosidad de la formación, las condiciones ambientales, la ubicación geográfica, entre otros.

En la técnica previa paralela de la industria del petróleo y el gas, las técnicas de perforación para pozos multilaterales, fluidos de perforación específicos, etc. están bien establecidas, sin embargo, la simple transferencia a la exploración y recuperación geotérmica no es realista ni factible; la recuperación de energía geotérmica presenta sus propias complicaciones. Se deben considerar varios factores para sintetizar un protocolo de recuperación viable. Esto requiere la capacidad de ajustar dinámicamente los parámetros termodinámicos durante la recuperación de energía, mitigar cualquier problema de integridad o rendimiento del pozo, revertir, redirigir o detener el flujo de fluido de trabajo, cambiar la composición del fluido de trabajo, entre otros. La unificación en la secuencia adecuada requiere un análisis basado en una amplia apreciación de una serie de tecnologías; sin esto, la solución se vuelve laberíntica.

Esto se evidencia en la gran cantidad de técnicas geotérmicas anteriores que han tenido que lidiar con problemas de perforación, formulaciones de fluidos de trabajo, disposiciones complejas de intercambiadores de calor con posicionamiento tanto en el fondo del pozo como en la superficie, calidad y ubicación de gradientes, circuitos continuos y discontinuos, revestimientos de pozos y variaciones de los mismos.

Debido al panorama de la técnica geotérmica anterior, sería beneficiosa una técnica que navegue a través de las complicaciones señaladas para sortearlas y obtener una solución universal.

La presente invención da a conocer soluciones efectivas a las limitaciones actuales hasta el punto de que la producción de energía geotérmica puede convertirse económicamente en un procedimiento de producción de energía de primer nivel.

CARACTERÍSTICAS DE LA INVENCION

Un objetivo de la presente invención es dar a conocer un control del perfil de temperatura en la roca que rodea los pozos geotérmicos.

Otro objetivo de una realización de la presente invención es dar a conocer un procedimiento para maximizar la recuperación de energía geotérmica dentro de una formación que tiene un gradiente geotérmico de acuerdo con la reivindicación 1.

La transferencia de calor desde la roca es inversamente proporcional a la temperatura del fluido de trabajo dentro del pozo. Los máximos de transferencia de calor se producen en el "talón" del pozo de entrada, donde la temperatura del fluido de trabajo dentro del pozo es mínima. El fluido de trabajo se calienta a medida que atraviesa la sección horizontal del pozo hacia la "punta" del pozo. Esto se evidencia en los datos del perfil térmico. El perfil de transferencia de calor se observa generalmente como un estrechamiento desde el talón hasta la punta con los mínimos en el pozo de salida.

Se ha descubierto que varias configuraciones de pozos combinados tienen un efecto beneficioso en el perfil, permitiendo una mayor extracción de calor de un volumen dado de roca y reduciendo los costes de construcción de pozos y los "puntos muertos" donde la extracción de calor es ineficiente.

Se ha descubierto que la disposición interdigital o el engrane de secciones horizontales de pozos próximos compensa los máximos y mínimos de temperatura en los pozos. El efecto se logra con la proximidad suficiente para el contacto térmico entre pozos. Con el flujo de fluido de trabajo en oposición entre pozos próximos, se puede inducir un equilibrio de temperatura en la formación geotérmica de modo que los máximos de un pozo compensen o mitigen los mínimos de un pozo próximo.

Según la invención, para mejorar aún más la extracción de energía térmica desde el interior de la formación, la red de configuración de pozos se forma sellando el pozo durante la perforación sin revestimiento en las secciones laterales de los pozos. Obviamente, esto tiene un beneficio de coste pronunciado junto con una termodinámica ventajosa. Esto contribuye a la aplicabilidad universal del protocolo; la configuración se puede utilizar en cualquiera de gradiente de temperatura alto, gradiente de temperatura bajo, zona conductora dentro del gradiente, zona convectiva dentro del gradiente, zona de alta permeabilidad dentro de la formación, zona de baja permeabilidad dentro de la formación y combinaciones de las mismas.

La composición de sellado también puede incluir materiales para mejorar la conductividad térmica del sellado. Se pueden ver composiciones adecuadas en la técnica conocida, habitualmente de Halliburton, Baker Hughes y otros.

Además, la composición del fluido de trabajo puede incluir aditivos para mantener la integridad del pozo en la configuración y la densidad del fluido para la resistencia a la compresión de los pozos en la configuración.

Se pueden incluir operaciones unitarias mecánicas o químicas auxiliares y combinaciones de las mismas para mantener la integridad del pozo. Esto puede comprender el uso de selladores químicos y agentes densificantes introducidos en la configuración de los pozos en ubicaciones predeterminadas en al menos una de una operación única y operaciones secuenciales por fases, según los requisitos.

Con respecto a las operaciones mecánicas, se pueden incorporar uniones de revestimiento/multilaterales en ubicaciones predeterminadas según sea necesario.

Se pueden agregar agentes reductores de arrastre u otros aditivos al fluido de trabajo para mejorar el rendimiento termodinámico, reducir o eliminar la carga parásita de la bomba y permitir que se perforen redes de pozos más grandes mientras se mantiene un rendimiento hidráulico óptimo.

Además, el procedimiento facilita la provisión de suficientes pérdidas de presión por fricción hidráulica en cada sección lateral para controlar pasivamente la distribución del flujo dentro de las secciones laterales dentro de dicha configuración.

Con respecto a las configuraciones del pozo, las mismas pueden estar espaciadas, en ángulo, apiladas, conglomeradas, interdigitadas e interconectadas y combinaciones de las mismas individuales dentro del volumen de roca para maximizar la extracción de energía. La orientación también mitigará cualquier interferencia térmica o "puntos muertos", así como la necesidad potencial de recarga térmica de pozos individuales que pueden requerir inactividad con flujo de fluido de trabajo en reposo durante un período de tiempo predeterminado.

Los pozos de entrada y los pozos de salida de las configuraciones pueden ser comunes a al menos algunas de las configuraciones de pozos próximos. También se contemplan sitios únicos o múltiples. Además de esto, los circuitos cerrados de las configuraciones de pozos pueden estar por encima o por debajo del sitio de superficie. Esto dependerá de las particularidades de la situación individual.

Habiendo descrito así en general la invención, ahora se hará referencia a los dibujos adjuntos.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La Figura 1 es un perfil de temperatura que ilustra la temperatura a la distancia radial desde la línea central del pozo en relación con la posición axial a lo largo del pozo horizontal;

la Figura 2 es una ilustración térmica del volumen radial de roca explotada para generar calor para un par de pozos horizontales espaciados entre sí;

la Figura 3 es una vista similar a la Figura 2 en la que el flujo de fluido de trabajo se invierte para un par de pozos horizontales;

la Figura 4 es una ilustración esquemática de un sistema de pozos que tiene una pluralidad de pozos horizontales conectados en común a un pozo de entrada y un pozo de salida;

la Figura 5 es una vista similar a la Figura 4 que ilustra un sistema de pozos interdigitados de acuerdo con una realización de la presente invención;

la Figura 6 es una vista en planta superior de una realización alternativa de la presente invención;

la Figura 7 es una sección transversal de una disposición de pozos;

la Figura 8 es una sección transversal de otra disposición de pozos;

la Figura 9 es una vista en planta superior de una realización alternativa de la presente invención;

la Figura 10 es una sección transversal a lo largo de la línea 9-9 de la Figura 9;

la Figura 11 es una ilustración esquemática de una red de configuración de pozos dentro de un gradiente geotérmico de una formación rocosa;

la Figura 12 es una ilustración esquemática de una secuencia de circulación dentro de sistemas de pozos en una red de configuración;

la Figura 13 es un diagrama de flujo de eventos involucrados en el protocolo; y

la Figura 14 es una red de pozos de circuito cerrado superpuesta sobre un mapa de distribución de temperatura de la formación.

Los números similares utilizados en las Figuras indican elementos similares

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS REALIZACIONES PREFERENTES

Con referencia ahora a la Figura 1, se muestra una ilustración térmica que representa la disminución de la temperatura a lo largo de la posición axial del pozo horizontal para un volumen de roca circundante dado. Es digno de mención el hecho de que hay un calentamiento del fluido de trabajo desde el talón del pozo hasta la punta. La transferencia de calor desde la roca es inversamente proporcional a esta temperatura del fluido de trabajo. En consecuencia, la mayor parte de la energía térmica se captura en un máximo del talón y un mínimo de la punta. Esto obviamente tiene limitaciones de eficiencia, ya que se crean máximos y mínimos.

Haciendo referencia ahora a la Figura 2, se muestra una vista en planta de dos pozos horizontales espaciados 10 y 12 dispuestos dentro de una formación geotérmica 14. Los pozos 10 y 12 están espaciados pero permanecen en contacto térmico. Cada pozo 10 y 12, en este ejemplo, tiene un flujo de fluido de trabajo en la misma dirección que se identifica en la Figura. El perfil térmico, como se explicó con referencia a la Figura 1, se representa para cada pozo 10 y 12, y los perfiles divergen entre sí, dejando así el área 16 como un "punto muerto" del que no se extrae energía térmica en un período de tiempo relevante.

La Figura 3 ilustra una primera solución al problema de extracción planteado con respecto a la Figura 2. En esta Figura, la dirección del flujo entre los pozos horizontales 10 y 12 se invierte como se representa. De esta manera, los máximos y mínimos de temperatura se equilibran para cada pozo 10 y 12 y el volumen de roca entre los dos pozos 10 y 12 no tiene un "punto muerto" o una región "sin extraer", es decir, el área 16. De este modo, para un volumen dado de roca dentro del cual se ubican los pozos 10 y 12, se puede explotar un mayor volumen radial de roca para obtener calor o, en la jerga, se puede recuperar una mayor cantidad de calor por unidad de área. Los pozos también están espaciados más cerca entre sí, lo que proporciona una reducción significativa en los costes de perforación/construcción de pozos.

La Figura 4 es una ilustración esquemática de un sistema de pozos laterales u horizontales múltiples de la técnica anterior, generalmente indicado por el número 18. En esta realización, los pozos horizontales 20 a 32 están en una relación de espaciado generalmente radial y todos comparten un pozo de entrada 36 y un pozo de salida 38 comunes. En esta realización, los pozos horizontales tienen, a modo de ejemplo, entre 2000 m y 8000 m de longitud.

La Figura 5 ilustra una disposición entrelazada o en malla de dos sistemas de pozos 18. Se ha descubierto que debido a la eficacia de la disposición analizada con respecto a la Figura 3, disponer los dos sistemas de pozos 18 en contacto térmico espaciado presenta el beneficio que se describe con respecto a la Figura 3. El segundo sistema de pozos 18 incluye pozos horizontales 38 a 50 y, de manera similar a la Figura 4, tienen un pozo de entrada común 52 y un pozo de salida común 54. Mediante esta disposición, los pozos próximos, por ejemplo, 20, 38; 22, 40; 24, 42, etc. tienen cada uno una dirección de flujo de fluido de trabajo opuesta entre sí y, por lo tanto, logran el resultado que se indica con respecto a la Figura 3. Como se apreciará, esto aumenta sustancialmente la densidad de pozos para un volumen dado de roca dentro de la formación geotérmica y, por lo tanto, la cantidad de energía térmica extraída al fluido de trabajo.

Pasando ahora a la Figura 6, se muestra una realización alternativa de la presente invención en la que los sistemas de pozos 18 están dispuestos uno al lado del otro en una disposición invertida. En esta disposición, el primer sistema de pozos 18 incluye múltiples pozos 56, 58 y 60 conectados en común al pozo de entrada 62 y al pozo de salida común 64. Desde la entrada 62 hasta la salida 64, los múltiples pozos 56, 58 y 60 convergen y, por lo tanto, el espaciado entre ellos varía de 62 a 64. La dirección del flujo del fluido de trabajo es de 62 a 64 como se indica. Trabajando en conjunto con los pozos múltiples 56, 58 y 60 hay un segundo conjunto de pozos múltiples 66, 68 y 70. Estos últimos comparten una entrada común 72 y una salida común 74. Esta disposición es la misma que para los pozos múltiples 56, 58 y 60 con la excepción de que la convergencia es opuesta a la del primer sistema de pozos 18, es decir, el flujo de fluido es de 72 a 74. Además, el pozo múltiple 66 está separado del pozo múltiple 60, pero térmicamente próximo. Cada uno de los sistemas de pozos 18 está conectado en 76 y 78 para el intercambio de fluido entre ellos. Como se ha señalado, esta es una disposición alternativa para mitigar el perfil de temperatura máxima y mínima inducido en el volumen de roca.

La Figura 7 ilustra una sección transversal de 7 pozos múltiples en el punto convergente analizado en relación con la Figura 6, cerca del pozo de salida, donde se muestra que la relación de espaciado entre los pozos múltiples 82 a 92 es similar, como se indica mediante la distancia "X", con una distancia de ejemplo de 20 m a 80 m. Los pozos salen de la página. La Figura 8 ilustra una sección transversal de 7 pozos múltiples 82 a 92 en el punto divergente, cerca del pozo de entrada, con un espaciado de ejemplo "Y" que es equidistante entre 80 m y 120 m.

Esta disposición es una alternativa a la analizada en relación con la Figura 5, sin embargo, logra el mismo beneficio térmico debido a la dirección del flujo de fluido y la proximidad térmica de los pozos múltiples.

Con referencia a la Figura 9, se muestra una realización alternativa de la disposición de la Figura 6. En esta realización, se proporciona una conexión interdigital. En este ejemplo, múltiples pozos 96, 98 y 100 que tienen un pozo de entrada

común 100 y un pozo de salida común 102 y divergen de 100 a 102. Múltiples pozos 96, 98 y 100 están interdigitados con múltiples pozos 104, 106 y 108. Estos últimos comparten una entrada de pozo común 110 y una salida de pozo común 112. El patrón de pozo diverge de 112 a 110. Las relaciones de espaciado se observan como en las realizaciones anteriores para lograr los resultados de captura térmica. Cada uno de los sistemas de pozos está conectado para el intercambio de fluidos en 114 y 116.

La Figura 10 es una ilustración esquemática en sección transversal de un sistema de pozos 118, 120 y 122 en una relación de espaciado similar y en contacto térmico con los pozos 124, 126 y 128. El flujo de fluido de trabajo para 118, 120 y 122 es opuesto al de los pozos 124, 126 y 128. El espaciado dentro de los pozos depende de varios factores.

Con referencia ahora a la Figura 11, se muestra una ilustración esquemática de una red de configuración de pozos planificada dentro de una formación rocosa que tiene un gradiente geotérmico variable, indicado por el número 130. Como se ilustra en el ejemplo, los sistemas de pozos laterales se indican por el número 18 como se hace referencia con respecto a las Figuras descritas anteriormente y pueden suscribirse a cualquiera de las configuraciones o a combinaciones de las configuraciones analizadas aquí anteriormente. La designación numérica es solo para mayor claridad.

Con respecto a la disposición de los sistemas de pozos, los mismos pueden estar espaciados, en ángulo, apilados, conglomerados, interdigitados, interconectados y combinaciones de los mismos dentro del volumen de roca para maximizar la extracción de energía. La disposición se realizará una vez que se determine el gradiente geotérmico, junto con la conductividad térmica de la roca. Esta flexibilidad en la metodología se mejora aún más por el hecho de que la perforación de los pozos se realiza mientras se sella el pozo sin revestimiento. En algunos escenarios específicos, el revestimiento puede usarse en ubicaciones predeterminadas dentro de la red.

La configuración puede incluir configuraciones de pozos de circuito cerrado discretos que tienen una entrada 36 y una salida 38 y laterales 20 a 32 (mostrados más claramente en la Figura 3) dispuestos dentro del gradiente 130 y/o los mismos pueden estar interconectados con una conexión común de entradas 36 y salidas 38 entre configuraciones en una red. Las conexiones de entrada comunes se indican con el número 132 y las salidas comunes con el número 134. Además, la salida común 134 o las salidas individuales 38 pueden estar conectadas en red a configuraciones de pozo adyacentes o próximas a las que se hace referencia con el número 136. Esto se indica con una línea discontinua y el número 138.

El gradiente puede comprender un gradiente de alta temperatura, un gradiente de baja temperatura, una zona conductora dentro de dicho gradiente, una zona convectiva dentro de dicho gradiente, una zona de alta permeabilidad dentro de la formación, una zona de baja permeabilidad dentro de la formación y combinaciones de las mismas.

La Figura 12 representa esquemáticamente el intercambio cruzado del fluido de trabajo dentro de la red. De esta manera, se evita la variación térmica o la producción insuficiente en la red de pozos. En consecuencia, el fluido de trabajo puede ser redirigido y distribuido dentro de la configuración, la composición del fluido de trabajo puede cambiarse por completo o modificarse con aditivos, el caudal del fluido puede alterarse, la dirección puede alterarse y combinaciones de las mismas para maximizar la recuperación de energía con el fluido de trabajo del gradiente geotérmico. Además, el flujo de fluido de trabajo puede detenerse por completo en una ubicación predeterminada dentro de la red dependiendo del rendimiento y/o de cuestiones térmicas. Este procedimiento también facilita la recarga térmica de un pozo o de un sistema de pozos.

Volviendo a la Figura 11, los pozos de circuito cerrado 18 pueden cerrarse por encima o por debajo de la superficie, S, como se ilustra. Esto dependerá de las condiciones ambientales y de otras variables dentro del ámbito de conocimiento de un experto. El control operativo, tal como el suministro de fluido, el control de temperatura, el muestreo de fluido, la dirección, la velocidad, entre otros, se puede realizar en la superficie, S, en 140 utilizando cualquiera de los mecanismos e instrumentación adecuados bien conocidos en la técnica para lograr los resultados deseados. La energía térmica recuperada se puede transferir a un convertidor de energía 142 adecuado para su distribución y/o almacenarse en un dispositivo de almacenamiento 144 para su uso diferido. Ventajosamente, la energía recuperada se puede utilizar para generar vapor para su uso en un proceso industrial. Dependiendo de las condiciones específicas, la red de pozos se puede instalar adyacente o próxima a un proyecto industrial existente.

La Figura 13 ilustra el protocolo general con las fases individuales delineadas. En las fases 2 a 4, la secuencia de eventos puede variar dependiendo de las condiciones ambientales, la geología, el gradiente, el tipo de roca y la variabilidad, etc. La intención es exponer la elegancia del protocolo con operaciones clave necesarias para maximizar la recuperación térmica independientemente de las condiciones, lo que es una característica distintiva de la tecnología actual.

La Figura 14 ilustra cómo los conceptos anteriores presentados se colocan en el contexto de una distribución de temperatura variable dentro de la formación objetivo, ilustrada por los contornos de isoterma. La configuración óptima de la red de pozos, el espaciado entre los ramales, la dirección del flujo y la velocidad del flujo varían según el gradiente geotérmico y la distribución de temperatura en la zona objetivo.

A continuación se hará referencia a un ejemplo del protocolo.

En general, el primer paso para optimizar un sistema de circuito cerrado es la determinación del gradiente de temperatura geotérmica en el área. El gradiente es habitualmente entre 28-35 °C/km en cuencas sedimentarias, pero puede aumentar hasta 50 °C en cuencas sedimentarias con una baja profundidad de punto de Curie (corteza delgada), y en áreas con alto flujo de calor puede ser de hasta 150 °C/km.

Se identifican las zonas objetivo para ubicar los pozos geotérmicos. A diferencia de la tecnología geotérmica tradicional, para los sistemas de circuito cerrado cualquier roca es una zona disponible ya que no se requiere permeabilidad, porosidad o características geológicas raras. Las zonas objetivo pueden ser arenisca, pizarra, limolita, lutita, dolomita, carbonatos o roca de basamento cristalina.

Algunas zonas objetivo son preferentes debido a una combinación de distribución de temperatura, conductividad térmica y velocidad de penetración de la perforación. Por lo tanto, el siguiente paso es utilizar el gradiente geotérmico para determinar la distribución de temperatura del volumen de roca como se ilustra en la Figura 14, que muestra un mapa de arriba hacia abajo de los contornos de temperatura (isotermas) de una formación dada. Las temperaturas adecuadas pueden ser de 85 °C a 250 °C o tan altas como 350 °C.

Se estima la distribución de la conductividad térmica dentro del volumen de roca. Esto puede basarse en mediciones directas, datos de laboratorio extrapolados o calcularse a partir de datos indirectos tales como velocidad sísmica, mineralogía o tipo de roca. La conductividad térmica varía de 1,7 W/m K para lutitas blandas a más de 4 W/m K para areniscas ricas en cuarzo.

El siguiente paso es determinar la resistencia a la compresión no confinada (UCS) de las zonas objetivo y luego estimar la velocidad de penetración de la perforación, que es una función importante de la resistencia a la compresión no confinada.

La tecnología geotérmica tradicional implica la búsqueda de una zona hidrotermal y luego la optimización de la planificación y el desarrollo del recurso. Por el contrario, dado que cualquier formación geológica es adecuada para sistemas de circuito cerrado, la selección de la zona objetivo puede basarse en parte en la velocidad de penetración de perforación óptima. La UCS regula la velocidad de penetración y, por lo general, varía de 40 MPa para lutitas débiles a 300 MPa para rocas de basamento cristalinas. La velocidad de penetración durante la perforación es generalmente de 5 m/h para roca dura a más de 300 m/h para roca blanda.

Se consideran todas las operaciones mecánicas y químicas unitarias para mantener la integridad del pozo de un sistema de circuito cerrado. El tipo de roca y la resistencia a la compresión no confinada determinarán en gran medida la solución óptima. Se determina si un sellador o aditivos para fluidos de trabajo son suficientes, o si se requieren revestimientos o uniones mecánicas, o cualquier combinación de estos.

Una vez identificados en gran medida los datos de entrada del diseño del subsuelo, el siguiente paso es analizar el perfil de energía dependiente de la temperatura que requiere el usuario final. Puede ser un perfil de energía térmica, energía de enfriamiento o energía eléctrica, o una combinación de ambos. Normalmente, el perfil varía a lo largo del día y de las estaciones. Asimismo, las condiciones ambientales del sitio de superficie y los precios basados en el tiempo pueden variar a lo largo del día y de la estación y, opcionalmente, pueden analizarse.

La configuración de la red de pozos en tres dimensiones está diseñada para maximizar la extracción de energía útil del volumen de roca. Parte de este diseño implica determinar el espaciado relativo entre pozos en la red para minimizar la interferencia térmica y los "puntos muertos", o áreas del volumen de roca donde la energía no se extrae de manera eficiente. El espaciado óptimo es una función de la distribución de la temperatura en la zona objetivo, la conductividad térmica y las características del fluido de trabajo y el caudal. También se deben considerar los costes de perforación. El espaciado entre pozos suele ser de entre 20 m y 120 m. El espaciado entre pozos adyacentes en la red puede variar a lo largo de la longitud de los pozos para maximizar el rendimiento, minimizar la interferencia y minimizar los "puntos muertos".

La configuración de la red de pozos también está diseñada para proporcionar suficientes pérdidas de presión por fricción hidráulica en cada lateral para controlar pasivamente la distribución del flujo entre los distintos laterales dentro de la configuración.

El equipo de superficie debe estar integrado en el diseño del sistema, ya que la salida de la infraestructura de superficie es simplemente la entrada al sistema de circuito cerrado del subsuelo. Por lo tanto, el diseño y el rendimiento del equipo de la instalación de superficie tiene un impacto en el diseño y el rendimiento del subsuelo y viceversa. Como ejemplo, un motor térmico con una temperatura de salida de 70 °C tendrá un diseño óptimo de la red de pozos subterráneos diferente al que tendrá cuando se acople a un motor térmico con una temperatura de salida de 90 °C.

La composición del fluido de trabajo dentro de la red de pozos se determina junto con el caudal óptimo a lo largo del tiempo. La composición del fluido de trabajo se selecciona para un rendimiento termodinámico óptimo, así como para

mantener la integridad del pozo. El fluido de trabajo puede ser agua, fluidos supercríticos, hidrocarburos, refrigerantes o cualquier otro fluido. Los aditivos para la integridad del pozo pueden consistir en selladores, reactivos, partículas sólidas, agentes de enlace, material de pérdida de circulación, agentes densificantes para mantener una resistencia a la compresión suficiente en el pozo o cualquier combinación. Se pueden agregar agentes reductores de arrastre al fluido de trabajo para permitir una configuración de red de pozos más grande sin alcanzar límites hidráulicos ni afectar la eficiencia termodinámica general.

El fluido de trabajo circula en la red. El caudal suele oscilar entre 40 l/s y 200 l/s de equivalente de agua a través de una red de pozos en serie. Si la red de pozos está dispuesta con circuitos de pozos paralelos o una combinación de circuitos de pozos en serie o en paralelo, el caudal total se escala en consecuencia.

La energía térmica se recupera del fluido de trabajo que circula a través de la red de pozos de circuito cerrado. Opcionalmente, el flujo se puede redistribuir dentro de la red para maximizar el rendimiento.

La energía recuperada se distribuye, almacena o convierte en electricidad. La conversión entre diversas formas de energía y almacenamiento puede estar determinada por los requisitos del usuario final y/o precios dinámicos.

Durante las operaciones, se monitoriza la temperatura del fluido y las anomalías de composición, opcionalmente se monitorizan y/o estiman los perfiles térmicos de los pozos en la red y opcionalmente se monitoriza y/o estima la integridad de los pozos en la red.

Con base en la monitorización y las estimaciones en tiempo real, se pueden implementar operaciones para optimizar el rendimiento termodinámico. Como ejemplos, estos incluyen cambios en el caudal, la dirección del flujo y la distribución del flujo entre los pozos en la red. Por ejemplo, la temperatura del fluido de salida en una parte de la red puede ser más alta de lo esperado, mientras que la temperatura del fluido en otra parte de la red puede ser baja; los caudales se pueden ajustar en consecuencia.

La integridad del pozo se puede monitorizar a través de caídas de presión medidas en toda la red de pozos, equilibrio de volumen de fluido de trabajo medido (fuga o adición de volumen), variaciones de composición y volumen y características de sólidos producidos. La reparación dinámica de los pozos se puede iniciar, por ejemplo, con aditivos de fluido de trabajo, reactivos o haciendo circular masas fluidas que contengan selladores, agentes de enlace o material de pérdida de circulación.

Se apreciará que las operaciones unitarias descritas anteriormente se pueden realizar en serie, o en paralelo en un proceso iterativo integrado, o una combinación.

El fluido de trabajo se hace circular en la red. El caudal suele estar entre 40 Us y 200 Us equivalentes de agua a través de una red de pozos en serie. Si la red de pozos está dispuesta con circuitos de pozos paralelos o una combinación de circuitos de pozos en serie o en paralelo, el caudal total se escala en consecuencia.

La energía térmica se recupera del fluido de trabajo que circula a través de la red de pozos de circuito cerrado. Opcionalmente, el flujo se puede redistribuir dentro de la red para maximizar el rendimiento.

La energía recuperada se distribuye, almacena o convierte en electricidad. La conversión entre diversas formas de energía y almacenamiento puede estar determinada por los requisitos del usuario final y/o precios dinámicos.

Durante las operaciones, se monitoriza la temperatura del fluido y las anomalías de composición, opcionalmente se monitorizan y/o estiman los perfiles térmicos de los pozos en la red y opcionalmente se monitoriza y/o estima la integridad de los pozos en la red.

Con base en la monitorización y las estimaciones en tiempo real, se pueden implementar operaciones para optimizar el rendimiento termodinámico. Como ejemplos, estos incluyen cambios en el caudal, la dirección del flujo y la distribución del flujo entre los pozos en la red. Por ejemplo, la temperatura del fluido de salida en una parte de la red puede ser más alta de lo esperado, mientras que la temperatura del fluido en otra parte de la red puede ser baja; los caudales se pueden ajustar en consecuencia.

La integridad del pozo se puede monitorizar a través de caídas de presión medidas en toda la red de pozos, equilibrio de volumen de fluido de trabajo medido (fuga o adición de volumen), variaciones de composición y volumen y características de sólidos producidos. La reparación dinámica de los pozos se puede iniciar, por ejemplo, con aditivos de fluido de trabajo, reactivos o haciendo circular masas fluidas que contengan selladores, agentes de enlace o material de pérdida de circulación.

Se apreciará que las operaciones unitarias descritas anteriormente se pueden realizar en serie, o en paralelo en un proceso iterativo integrado, o una combinación.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para maximizar la recuperación de energía geotérmica dentro de una formación que tiene un gradiente geotérmico, que comprende:

determinar el gradiente geotérmico dentro del volumen de roca de dicha formación;
 formar una configuración de pozos para ubicación y posicionamiento dentro de dicho volumen de roca con la configuración de los pozos en base al gradiente geotérmico determinado para una recuperación térmica máxima, comprendiendo la configuración de los pozos un circuito cerrado que tiene un pozo de entrada y un pozo de salida y una pluralidad de pozos de interconexión laterales posicionados dentro de dicho volumen de roca y que conectan dicho pozo de entrada y dicho pozo de salida, estando dicha pluralidad de pozos de interconexión laterales sin revestimiento y en comunicación fluida con dicho pozo de entrada y dicho pozo de salida;
 sellar durante la perforación dicha pluralidad de pozos de interconexión laterales, para transferencia de calor conductiva directa desde la roca de la formación que rodea cada uno de dicha pluralidad de pozos de interconexión laterales hacia dicha pluralidad de pozos de interconexión laterales;
 seleccionar al menos un fluido de trabajo para su circulación en una secuencia predeterminada dentro de dicha configuración en base a:

la configuración de los pozos;
 la variación del gradiente geotérmico; y
 las características geológicas de la formación;

determinar la temperatura del fluido de trabajo del fluido de trabajo que se hace circular secuencialmente dentro de dicha configuración de pozos; y
 seleccionar al menos uno de:

redireccionamiento y distribución del fluido de trabajo dentro de dicha configuración;
 composición del fluido de trabajo;
 caudal del fluido de trabajo dentro de dicha configuración;
 dirección del flujo del fluido de trabajo; o combinaciones de los mismos para maximizar la recuperación de energía de dicha roca de la formación que rodea cada uno de dicha pluralidad de pozos interconectados laterales.

2. Procedimiento, según la reivindicación 1, en el que la determinación de dicho gradiente incluye determinar la distribución de temperatura dentro de dicho volumen de roca.

3. Procedimiento, según la reivindicación 1, que incluye, además, el paso de caracterizar el tipo de roca y la conductividad térmica dentro de dicho volumen de roca.

4. Procedimiento, según la reivindicación 1, en el que la selección de la composición del fluido de trabajo incluye incorporar aditivos para mantener la integridad del pozo en dicha configuración y la densidad del fluido para la resistencia a la compresión de dicha configuración de pozos.

5. Procedimiento, según la reivindicación 1, que incluye, además, el paso de controlar al menos una de la temperatura del fluido de trabajo, la integridad del pozo en dicha configuración y la recarga térmica de un pozo en dicha configuración durante la operación.

6. Procedimiento, según la reivindicación 1, que incluye, además, el paso de introducir operaciones unitarias mecánicas o químicas auxiliares y combinaciones de las mismas para mantener la integridad del pozo.

7. Procedimiento, según la reivindicación 6, en el que dichas operaciones mecánicas auxiliares incluyen introducir revestimiento y uniones multilaterales en dicha configuración de pozos en ubicaciones predeterminadas.

8. Procedimiento, según la reivindicación 6, en el que dichas operaciones químicas auxiliares incluyen introducir al menos uno de sellador químico, agentes densificantes y agentes de enlace en dicha configuración de pozos en ubicaciones predeterminadas en al menos una de una operación única y operaciones secuenciales en fases.

9. Procedimiento, según la reivindicación 1, que incluye, además, al menos uno de espaciado, angulación, apilamiento, conglomeración, interdigitación e interconexión y combinaciones de los mismos, de pozos individuales en dicha configuración dentro de dicho volumen de roca para maximizar la extracción de energía.

10. Procedimiento, según la reivindicación 9, que incluye, además, el paso de conectar selectivamente pozos de entrada y pozos de salida en ubicaciones predeterminadas en dicha configuración, en una o más ubicaciones subterráneas.

11. Procedimiento, según la reivindicación 1, en el que la circulación secuenciada incluye variación del caudal, dirección del flujo, inactividad y combinaciones de las mismas.

12. Procedimiento, según la reivindicación 1, que incluye, además, el paso de muestrear dicho fluido de trabajo en ubicaciones predeterminadas dentro de dicha configuración de pozos para determinar variaciones de composición en relación con el fluido de trabajo sin circular.

13. Procedimiento, según la reivindicación 12, que incluye, además, el paso de determinar si dichas variaciones de composición están relacionadas con factores químicos o mecánicos del pozo.

14. Procedimiento, según la reivindicación 1, que incluye, además, el paso de formar dicha configuración dentro de al menos uno de un gradiente de temperatura alto, gradiente de temperatura bajo, zona convectiva dentro de dicho gradiente, zona de alta permeabilidad dentro de dicha formación, zona de baja permeabilidad dentro de dicha formación y combinaciones de los mismos.

15. Procedimiento, según la reivindicación 1, que comprende, además:

controlar la variación del perfil térmico entre pozos próximos en dicha configuración, incluyendo dicho control:

seleccionar dicha configuración de pozos dentro de dicho volumen de roca en función de la distribución de temperatura dentro de dicho volumen de roca; y
espaciar los pozos de dicha configuración para reducir la interferencia térmica y la recuperación térmica ineficiente entre pozos próximos para maximizar la recuperación de energía con dicho fluido de trabajo de dicho volumen de roca.

16. Procedimiento, según la reivindicación 15, que incluye los pasos de

introducir un primer fluido de trabajo en un primer pozo de dichos pozos para absorber energía térmica de la roca de la formación circundante en dicho gradiente desde un máximo hasta un mínimo a través de dicho pozo;
introducir un segundo fluido de trabajo en un segundo pozo de dichos pozos para absorber energía térmica de la roca de la formación circundante en dicha formación desde un máximo hasta un mínimo a través de dicho pozo, siendo el sentido del primer flujo de fluido opuesto al de dicho segundo flujo de fluido para inducir consistencia térmica dentro del volumen de roca próximo a dichos pozos en ausencia de mínimos y máximos térmicos.

17. Procedimiento, según la reivindicación 1, que incluye, además, la integración de una disposición de superficie con dicho circuito para utilizar la energía térmica recuperada.

18. Procedimiento, según la reivindicación 17, en el que dicha disposición de superficie comprende al menos una de una disposición de generación de vapor para uso en operación industrial, una disposición de generación de energía, una disposición de almacenamiento de energía, una red de distribución para distribución selectiva de energía a configuraciones de pozos vinculados y combinaciones de las mismas.

19. Procedimiento, según la reivindicación 1, que incluye, además, el paso de introducir un agente reductor de arrastre en dicho fluido de trabajo para permitir una configuración de red de pozos expandida mientras se mantiene un rendimiento hidráulico óptimo.

20. Procedimiento, según la reivindicación 1, que incluye, además, el paso de proporcionar suficientes pérdidas de presión por fricción hidráulica en cada uno de la pluralidad de dichos pozos de interconexión lateral para controlar pasivamente la distribución del flujo dentro de las secciones laterales dentro de dicha configuración.

21. Procedimiento, según la reivindicación 1, que incluye, además, el paso de determinar la interacción entre la conductividad térmica y la velocidad de penetración de la perforación para el posicionamiento y la ubicación de dicho pozo dentro de dicho volumen de roca.

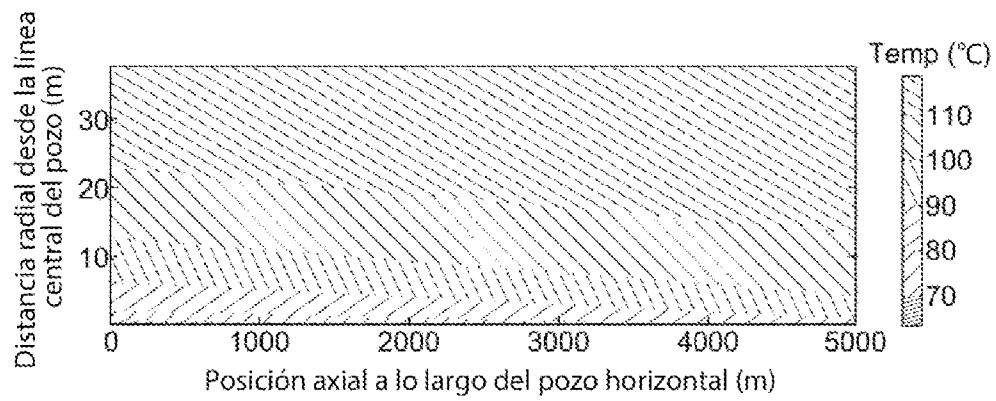


FIG. 1

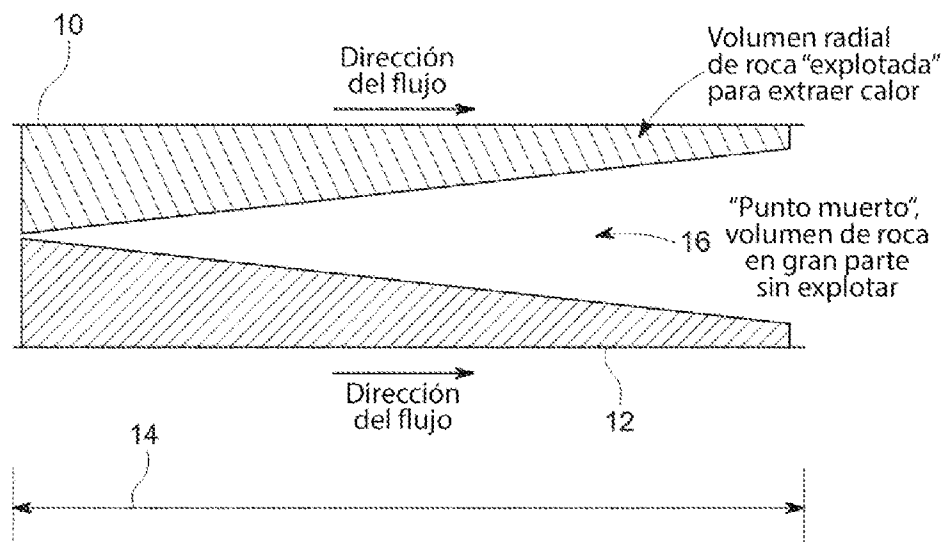


FIG. 2

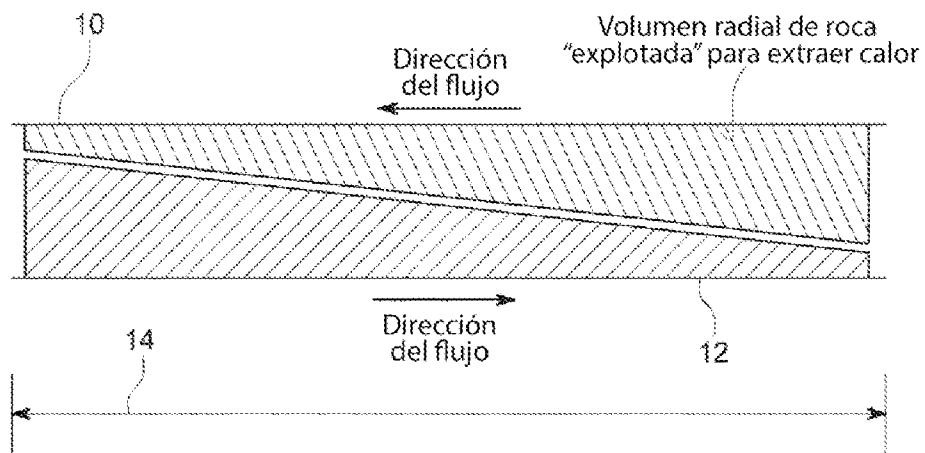


FIG. 3

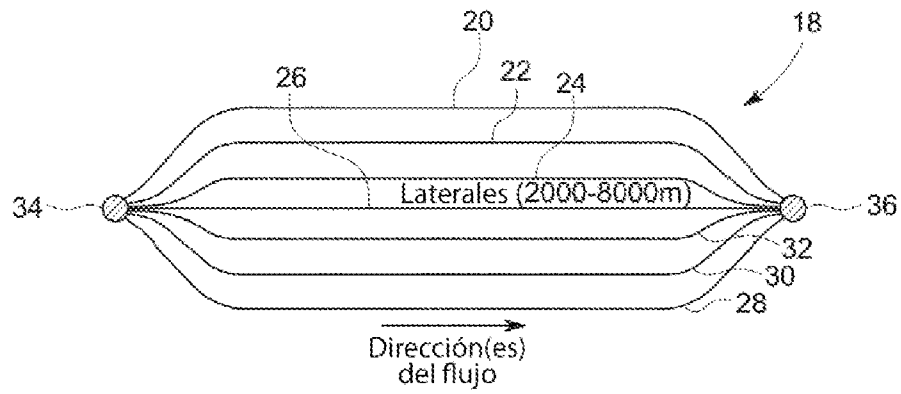


FIG. 4

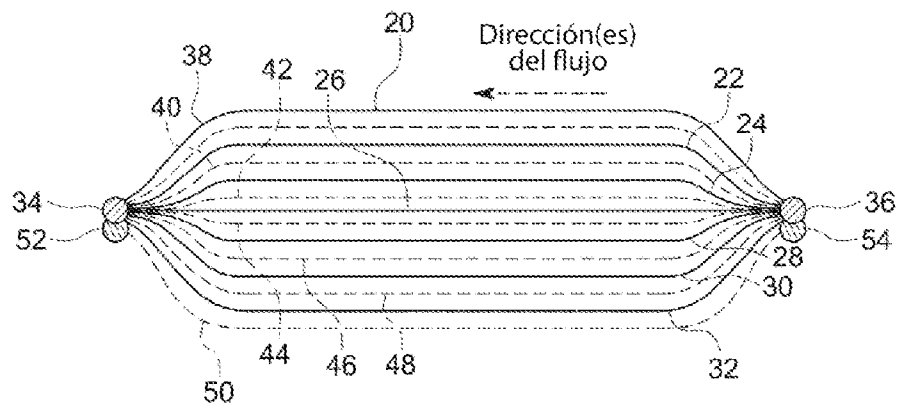


FIG. 5

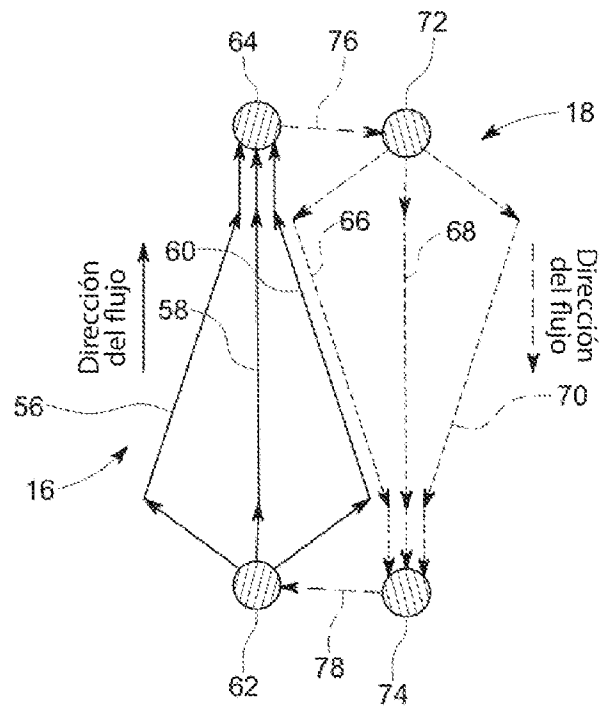


FIG. 6

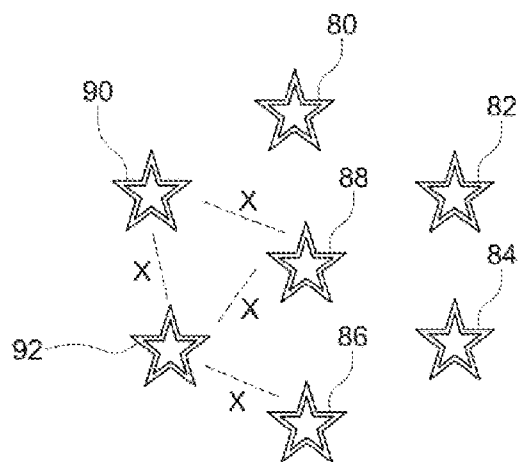


FIG. 7

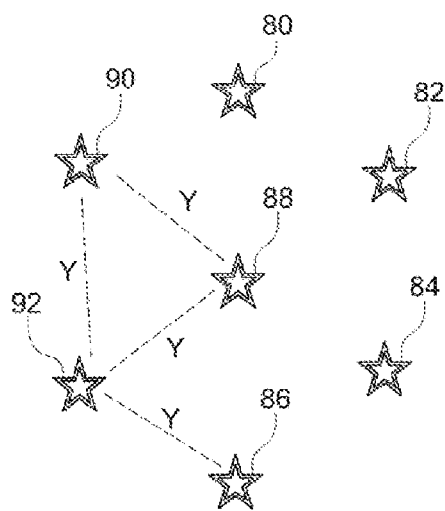


FIG. 8

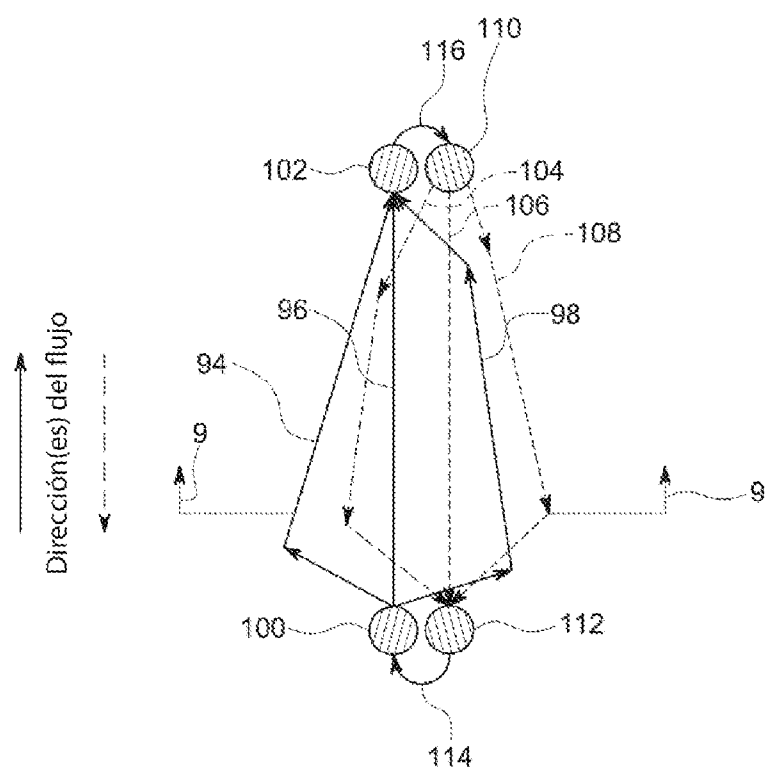


FIG. 9

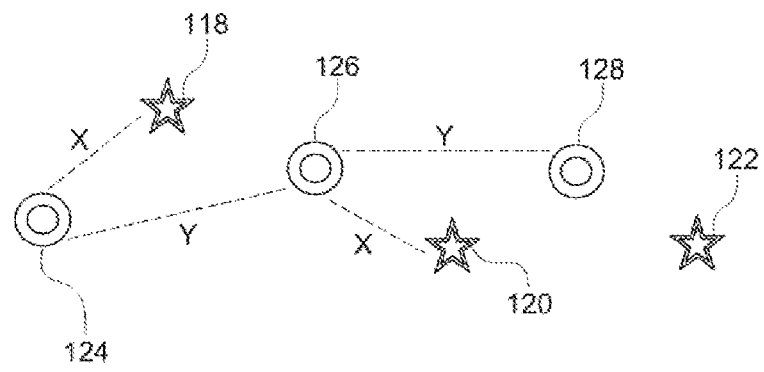


FIG. 10

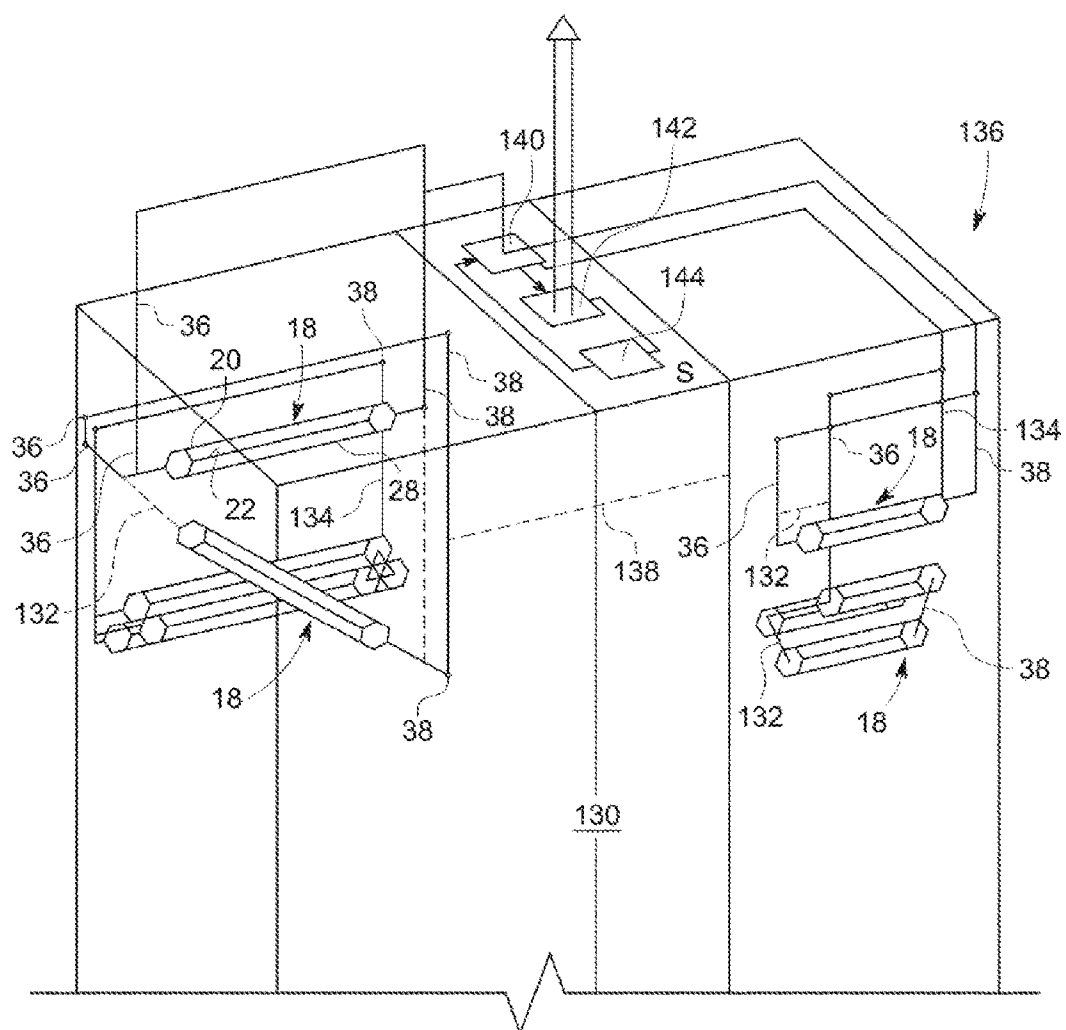


FIG. 11

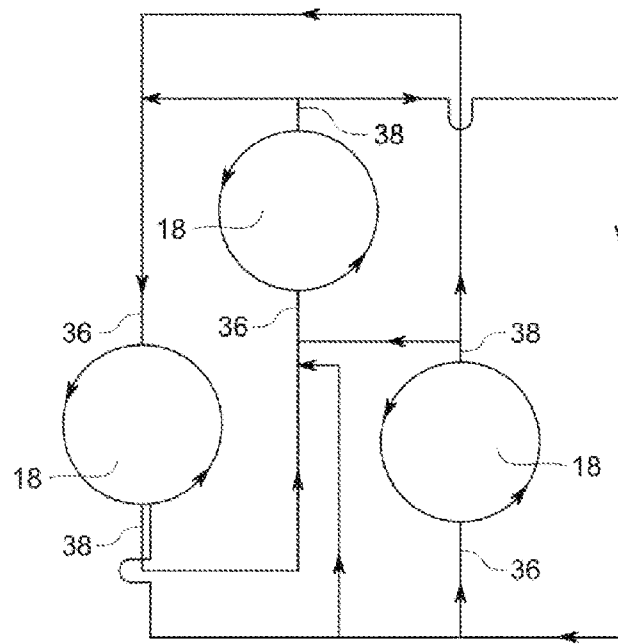


FIG. 12

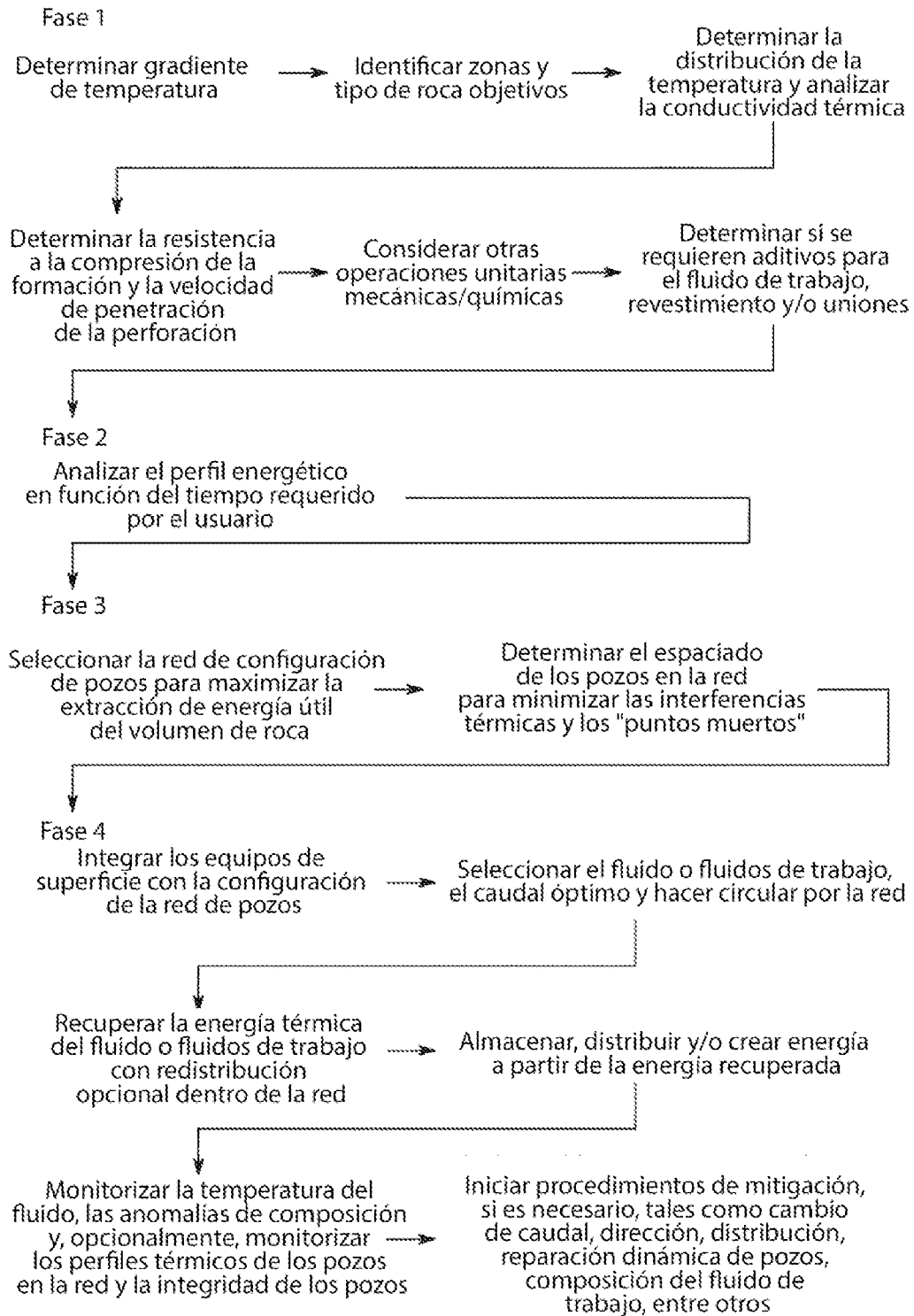


FIG. 13

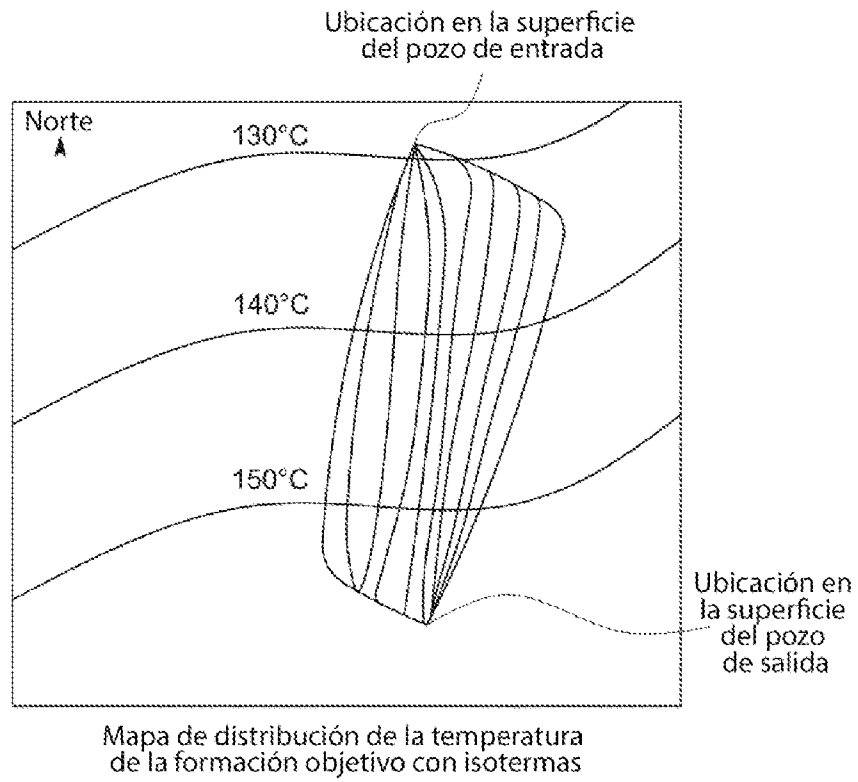


FIG. 14