

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 640 378**

51 Int. Cl.:

**E21B 47/00** (2012.01)  
**G01N 33/00** (2006.01)  
**G01V 99/00** (2009.01)  
**G06Q 50/02** (2012.01)  
**G06Q 10/06** (2012.01)  
**G06F 17/50** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.11.2014** **E 14382455 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.06.2017** **EP 3020913**

54 Título: **Método para gestionar la producción de un yacimiento petroquímico y producto de programa para el mismo**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**02.11.2017**

73 Titular/es:

**REPSOL, S.A. (50.0%)**  
**Méndez Álvaro 44**  
**Madrid E-28045 , ES y**  
**INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES**  
**CORPORATION (50.0%)**

72 Inventor/es:

**VARGAS MENDOZA, PABLO ENRIQUE;**  
**SEGURA SERRA, JOSÉ MARÍA;**  
**GONZÁLEZ MOLANO, NUBIA AURORA;**  
**MOOKANAHALLIPATNA RAMASESHA,**  
**LAKSHMIKANTHA;**  
**MENA PAZ, CARMEN NILDA;**  
**SESINI, PAULA AIDA;**  
**AUSAS, ROBERTO FEDERICO;**  
**MACKAY ESPINDOLA, FREDDY ERNESTO y**  
**ROCHA RODRIGUES, EDUARDO**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

**ES 2 640 378 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

MÉTODO PARA GESTIONAR LA PRODUCCIÓN DE UN YACIMIENTO PETROQUÍMICO Y PRODUCTO DE PROGRAMA PARA EL MISMO

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Campo de la invención

- 5 **[0001]** La presente invención se refiere a la gestión de la producción de un campo de hidrocarburos, y especialmente se refiere a la gestión de la producción de energía a partir de yacimientos petroquímicos.

Descripción de los antecedentes

- 10 **[0002]** La extracción eficaz de recursos que producen energía de un campo de yacimiento de hidrocarburos requiere un modelado preciso del yacimiento para crear un plan de desarrollo exhaustivo específico para el campo. El plan de desarrollo proporciona las directrices de producción para un horizonte de planificación dado con un programa de perforaciones seleccionado para el campo con el fin de maximizar la producción del yacimiento. Un ingeniero de desarrollo de yacimientos extrae información del modelo para los responsables de la toma de decisiones. Los responsables de la toma de decisiones seleccionan un plan de desarrollo para dedicar recursos limitados desde un punto de vista económico para conseguir unos beneficios óptimos. Independientemente de que sea para desarrollar un  
15 único pozo, o para mejorar la producción de un yacimiento de talla mundial, el nivel de análisis requerido puede ser significativo y costoso. Esto se ve agravado por una variedad de opciones de producción normalmente amplia, tal como pueden aparecer con prácticas de negocio convencionales cambiantes o al cambiar una estrategia de inversión principal.

- 20 **[0003]** Los simuladores de campo típicos en el estado de la técnica, usados para el modelado del yacimiento, normalmente modelan características de fluido del yacimiento, por ejemplo, presión de poro y/o temperatura, y características geomecánicas por separado para aproximarse a resultados realistas y fiables. En el transcurso de la producción del yacimiento, las propiedades de fluido así como el comportamiento geomecánico afectan al yacimiento, cambian la estructura y provocan deformaciones en la roca. Por ejemplo, la roca del yacimiento puede compactarse bruscamente, el poro puede obstruirse parcial o completamente reduciendo el flujo, o el poro puede ceder por completo.  
25 Esto puede provocar un hundimiento de la superficie del suelo, dañar las tuberías de revestimiento del pozo, ralentizando o impidiendo por consiguiente la extracción. La temperatura afecta a la formación de roca y a las propiedades del material de hidrocarburo, cambiando por ejemplo la viscosidad del material. Por tanto, el comportamiento geomecánico tiene un impacto físico significativo sobre la producción del yacimiento.

- 30 **[0004]** Por consiguiente, la gestión eficaz de la producción requiere el modelado de un yacimiento tanto en cuanto al flujo de fluido como a respuestas mecánicas para un comportamiento estructural. Normalmente, un ingeniero de yacimientos modela el yacimiento en cuanto al fluido con un modelo según el método de volúmenes finitos (FVM), en el que el yacimiento se segmenta en una matriz o cuadrícula de "volúmenes finitos" que rodean cada uno un nodo central o centroide. El ingeniero de yacimientos modela la deformación estructural de la roca en un modelo según el método de elementos finitos (FEM), en el que el campo de yacimiento, normalmente de forma irregular, se subdivide en  
35 una red de elementos geométricos más pequeños y más básicos, por ejemplo, cubos, conos, etc., que pueden variar en

tamaño y forma. Los planificadores acoplan y correlacionan resultados entre los modelos FEM y FVM para estimar y extraer el potencial de producción y el rendimiento económico. Por tanto, acoplar los resultados de FVM y FEM es un requisito fundamental para el modelado de producción de petróleo.

5 **[0005]** Sin embargo, debido a que estos dos modelos pueden tener celdas muy diferentes y ser redes muy diferentes, acoplar los resultados de FVM y FEM puede resultar problemático. La simulación de proyección de presión de poro/temperatura del estado de la técnica acopla datos entre los modelos basándose exclusivamente en consideraciones geométricas y matemáticas. Los enfoques de acoplamiento típicos del estado de la técnica modelan mediante mapeo, de manera iterativa, características entre modelos hasta que el mapeo converge en una solución aceptable. Sin embargo, las diferentes geometrías de cuadrícula hacen que el acoplamiento de los datos entre las dos  
10 cuadrículas diferentes sea extremadamente difícil, lo que a menudo impide la convergencia en una solución aceptable.

**[0006]** Por tanto, existe la necesidad de un mapeo preciso de datos de fluido y estructurales/geomecánicos entre cuadrículas de FVM y redes FEM diferentes incompatibles, y especialmente de una rápida convergencia en una solución aceptable para llegar a resultados realistas con un coste computacional reducido.

15 **[0007]** US2013/0231907A1 muestra un método de discretización variable para la simulación de un flujo multifásico en un yacimiento de producción de hidrocarburos. Para regiones bajo la superficie se utiliza un método de volúmenes finitos/diferencias finitas para discretizar la solución numérica de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo del fluido. Para regiones bajo la superficie con geometrías más complejas se utiliza un método de elementos finitos. Ambos métodos se combinan en un único contexto computacional.

#### SUMARIO DE LA INVENCION

20 **[0008]** La presente invención se refiere a un método y producto de programa informático para gestionar la producción de un campo de hidrocarburos, por ejemplo, la producción de un yacimiento petroquímico. El campo de hidrocarburos puede modelarse en cuanto a flujo de fluido usando el modelo según el método de volúmenes finitos (FVM) y en cuanto a deformaciones de roca usando el método de elementos finitos (FEM). Se localizan los centroides en cada celda FVM y cada elemento FEM y se identifican las celdas que se solapan con cada elemento. Tras  
25 determinar la distancia entre centroides para las celdas que se solapan, se mapean las características de fluido con respecto a los centroides de elemento FEM, ponderadas inversamente en cuanto a la distancia entre los respectivos centroides. En una ponderación de volumen inverso, un promedio ponderado de presión de poro/temperatura se proyecta desde los centroides de celda hasta los nodos de elemento FEM. La producción del campo puede ajustarse en respuesta a características de nodo de elemento FEM.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

**[0009]** Los objetos, aspectos y ventajas anteriores y otros se entenderán mejor a partir de la siguiente descripción detallada de una realización preferida de la invención con referencia a los dibujos, en los que:

**[0010]** las figuras 1A – B muestran un ejemplo de un sistema de producción de hidrocarburos, por ejemplo, para mapear con precisión datos de fluido y geomecánicos entre modelos diferentes, según una realización preferida de la presente invención;

**[0011]** la figura 2 muestra un ejemplo de etapas en mapeo de centroide a centroide para un yacimiento modelado mediante un sistema preferido;

**[0012]** las figuras 3A – D muestran ejemplos de yacimientos modelados bidimensionales (2D) y 3D (en vista en despiece ordenado) modelados con cuadrículas FVM que se solapan con redes FEM;

**[0013]** la figura 4 muestra un ejemplo de identificación de  $n$  celdas FVM que se solapan completa o parcialmente con un elemento FEM individual, el elemento FEM 2D central;

**[0014]** la figura 5 muestra un ejemplo de proyección de promedio en volumen de presión de poro y temperatura entre cada elemento FEM, ponderado por permeabilidad y conductividad de subvolumen respectivamente;

**[0015]** las figuras 6A – B muestran un ejemplo de división en subvolúmenes de elementos FEM en forma de tetraedro;

**[0016]** las figuras 7A – B muestran un ejemplo de división en subvolúmenes de elementos FEM en hexaedro de forma irregular;

**[0017]** la figura 8 muestra un ejemplo de una agrupación de subvolúmenes alrededor de un nodo común (no mostrado) individual compartido con elementos FEM adyacentes.

DESCRIPCIÓN DE REALIZACIONES PREFERIDAS

**[0018]** Tal como apreciará un experto en la técnica, los aspectos de la presente invención pueden implementarse como sistema, método o producto de programa informático. Por consiguiente, los aspectos de la presente invención pueden adoptar la forma de una realización totalmente en hardware, una realización totalmente en software (incluyendo *firmware*, software residente, microcódigo, etc.) o una realización que combine aspectos de software y hardware que pueden denominarse todos ellos generalmente en el presente documento “circuito”, “módulo” o “sistema”. Además, los aspectos de la presente invención pueden adoptar la forma de un producto de programa informático implementado en uno o más medios legibles por ordenador que tienen código de programa legible por ordenador integrado en el mismo.

**[0019]** Puede utilizarse cualquier combinación de uno o más medios legibles por ordenador. El medio legible por ordenador puede ser un medio de señal legible por ordenador o un medio de almacenamiento legible por ordenador. Un medio de almacenamiento legible por ordenador puede ser, por ejemplo, pero sin limitarse a, un sistema, aparato o dispositivo electrónico, magnético, óptico, electromagnético, de infrarrojos o semiconductor, o cualquier combinación adecuada de los anteriores. Ejemplos más específicos (lista no exhaustiva) del medio de almacenamiento legible por ordenador incluirán los siguientes: una conexión eléctrica que tiene uno o más cables, un disquete informático portátil, un disco duro, una memoria de acceso aleatorio (RAM), una memoria de solo lectura (ROM), una memoria de sólo lectura programable y borrable (EPROM o memoria Flash), una fibra óptica, una memoria de sólo lectura en disco compacto portátil (CD-ROM), un dispositivo de almacenamiento óptico, un dispositivo de almacenamiento magnético o cualquier combinación adecuada de los anteriores. En el contexto de este documento, un medio de almacenamiento legible por ordenador puede ser cualquier medio tangible que pueda contener o almacenar un programa para su uso por o en conexión con un sistema, aparato o dispositivo de ejecución de instrucciones.

**[0020]** Un medio de señal legible por ordenador puede incluir una señal de datos propagada con código de programa legible por ordenador incorporado en la misma, por ejemplo, en banda base o como parte de una onda portadora. Tal señal propagada puede adoptar cualquiera de una variedad de formas, incluyendo, pero sin limitarse a, electromagnética, óptica o cualquier combinación adecuada de las mismas. Un medio de señal legible por ordenador puede ser cualquier medio legible por ordenador que no sea un medio de almacenamiento legible por ordenador y que pueda comunicar, propagar o transportar un programa para su uso por o en conexión con un sistema, aparato o dispositivo de ejecución de instrucciones.

**[0021]** Un código de programa incorporado en un medio legible por ordenador puede transmitirse usando cualquier medio apropiado, incluyendo pero sin limitarse a inalámbrico, por cable, por cable de fibra óptica, por RF, etc., o cualquier combinación adecuada de los anteriores.

**[0022]** Un código de programa informático para llevar a cabo las operaciones de los aspectos de la presente invención puede escribirse en cualquier combinación de uno o más lenguajes de programación, incluyendo un lenguaje de programación orientado a objetos tal como Java, Smalltalk, C++ o similares y lenguajes de programación por procedimientos convencionales, tales como el lenguaje de programación "C" o lenguajes de programación similares. El código de programa puede ejecutarse en su totalidad en el ordenador del usuario, en parte en el ordenador del usuario, como paquete de software autónomo, en parte en el ordenador del usuario y en parte en un ordenador remoto o en su totalidad en el ordenador remoto o servidor. En este último escenario, el ordenador remoto puede conectarse al ordenador del usuario a través de cualquier tipo de red, incluyendo una red de área local (LAN) o una red de área amplia (WAN), o la conexión puede realizarse a un ordenador externo (por ejemplo, a través de Internet usando un Proveedor de Servicios de Internet).

**[0023]** A continuación se describen aspectos de la presente invención con referencia a las ilustraciones de diagrama de flujo y/o diagramas de bloques de métodos, aparatos (sistemas) y productos de programa informático según las realizaciones de la invención. Se entenderá que cada bloque de las ilustraciones de diagrama de flujo y/o diagramas de bloques, y combinaciones de bloques en las ilustraciones de diagrama de flujo y/o diagramas de bloques, pueden implementarse mediante instrucciones de programa informático. Estas instrucciones de programa informático pueden proporcionarse a un procesador de un ordenador de propósito general, un ordenador de propósito especial, u

otro aparato de procesamiento de datos programable para producir una máquina, de manera que las instrucciones, que se ejecutan a través del procesador del ordenador u otro aparato de procesamiento de datos programable, crean medios para implementar las funciones/acciones especificadas en el bloque o bloques de los diagramas de flujo y/o diagramas de bloques.

5 **[0024]** Estas instrucciones de programa informático también pueden almacenarse en un medio legible por ordenador que puede controlar un ordenador, otro aparato de procesamiento de datos programable, u otros dispositivos para que funcionen de una manera particular, de manera que las instrucciones almacenadas en el medio legible por ordenador producen un artículo de manufactura que incluye instrucciones que implementan la función/acción especificada en el bloque o bloques de los diagramas de flujo y/o diagramas de bloques.

10 **[0025]** Las instrucciones de programa informático también pueden cargarse en un ordenador, otro aparato de procesamiento de datos programable, u otros dispositivos para provocar que se realicen una serie de etapas operativas en el ordenador, otro aparato programable u otros dispositivos para producir un proceso implementado por ordenador de manera que las instrucciones que se ejecutan en el ordenador u otro aparato programable proporcionen procesos para implementar las funciones/acciones especificadas en el bloque o bloques de los diagramas de flujo y/o diagramas de bloques.  
15

**[0026]** Volviendo ahora a los dibujos y, más particularmente, a las figuras 1A – B, se muestra un ejemplo de sistema de gestión de la producción de hidrocarburos 100, por ejemplo, mapear 120 de manera precisa datos de fluido y geomecánicos entre modelos diferentes para gestionar la producción de hidrocarburos del campo, según una realización preferida de la presente invención. Preferiblemente, el sistema de gestión de la producción de hidrocarburos 100 incluye un único ordenador, por ejemplo, 102, que modela y mapea datos de fluido y geomecánicos entre espacios representativos diferentes, para combinar la información en celdas de cuadrículas del método de volúmenes finitos (FVM) y elementos de red del método de elementos finitos (FEM), que representan el mismo campo o yacimiento de hidrocarburos, por lo demás posiblemente incompatibles.  
20

**[0027]** Aunque se describe con un único ordenador 102, el sistema preferido puede incluir múltiples ordenadores 102, 104, 106 (3 en este ejemplo) conectados en red 108 por cable o de manera inalámbrica, acoplados y en comunicación entre sí, y con las etapas de método 122, 130, 150 en uno único de, o distribuidas entre, los ordenadores 102, 104, 106 conectados. La red 108 puede ser, por ejemplo, una red de área local (LAN), por cable o inalámbrica (por ejemplo, Wi-Fi), Internet, una intranet o una combinación de las mismas. Normalmente, cada uno de los ordenadores 102, 104, 106 incluye uno o más procesadores, por ejemplo, una unidad central de procesamiento (CPU) 110, una memoria 112 y un almacenamiento no volátil local 114. El sistema 100 puede incluir un almacenamiento adicional, por ejemplo, almacenamiento conectado a la red (NAS) 116, y sensores 118 que recopilan de manera remota datos de producción del yacimiento, por ejemplo, de la actividad de producción, y que pasan los datos recopilados a través de la red 108 hasta los ordenadores 102, 104, 106.  
25  
30

**[0028]** El sistema preferido 100 acopla un modelo FVM de un yacimiento y un modelo FEM del yacimiento en un acoplamiento 120, principalmente de dos etapas, que proyecta la presión de poro/temperatura desde los centroides de celda hasta los nodos de elemento FEM. Preferiblemente, las proyecciones de presión de poro/temperatura son promedios ponderados, por ejemplo, ponderados en cuanto a permeabilidad/conductividad promedio y por un factor de  
35

volumen inverso (de “ponderación beta”). Preferiblemente también, el volumen inverso se basa en subvolúmenes agrupados alrededor de cada nodo. Otros factores de ponderación beta adecuados incluyen, por ejemplo, distancia inversa y promedio en volumen. Además, aunque se describe en el presente documento como mapeo de flujo de fluido (celdas FVM) con respecto a geomecánica (elementos FEM), se entiende que esto es como ejemplo únicamente.

5 **[0029]** Preferiblemente, el sistema de producción de hidrocarburos 100 empieza con modelar 122 el yacimiento usando tanto un modelo FEM como un modelo FVM. Después, el sistema 100 mapea 130 datos entre los centroides de volúmenes finitos (cubo o bloque de cuadrícula FVM) del yacimiento y los centroides de elementos finitos (elemento en tetraedro o hexaedro FEM) geomecánicos. En particular, el sistema 100 mapea características del yacimiento en centroides de elemento de red FVM con centroides de elemento de red FEM 130 en una transferencia  
10 ponderada de distancia inversa, correlacionando datos de parámetros de fluido en los centroides de red FVM y los centroides de red FEM. A continuación, el sistema preferido 100 mapea 150 datos desde los centroides de elemento FEM hasta los nodos de elemento FEM en una proyección de promedio en volumen de presión de poro/temperatura, ponderada por permeabilidad/conductividad, promediando la proyección de presión de poro y temperatura alrededor de los nodos de red FEM, ponderada por permeabilidad ( $k$ ) y conductividad ( $\lambda$ ) para cada subvolumen alrededor de cada  
15 nodo.

**[0030]** La figura 2 muestra un ejemplo de mapeo de centroide a centroide 130 para un yacimiento modelado 122 mediante un sistema preferido 100 con referencia a las figuras 1A – B. El mapeo de centroide a centroide 130 empieza con localizar 132 todos los centroides de celda tanto para la cuadrícula FVM como para la red FEM. Después, identificar 134 todas las celdas FVM que se solapan con elementos FEM; el sistema 100 determina 136 para cada celda solapada/que se solapa la distancia entre el centroide de la celda FVM que se solapa y los respectivos centroides de elemento FEM solapado. El sistema 100 mapea 138 las características de flujo de fluido desde las celdas FVM que se solapan hasta los respectivos centroides de elemento FEM solapado. Por ejemplo, el sistema 100 mapea 138 presión de poro y tensores de permeabilidad diagonal con respecto a los centroides de elemento FEM. Simultáneamente, el sistema 100 determina la norma de permeabilidad en los centroides FEM, para la norma de permeabilidad  $\|k\| =$   
20  $\sqrt{(k)_{xx}^2 + (k)_{yy}^2 + (k)_{zz}^2}$ . Finalmente, el sistema 100 proyecta 140 las características de centroide de elemento FEM en una determinación ponderada de distancia inversa con respecto a los nodos de elemento FEM. Por ejemplo, el sistema 100 puede determinar la presión y la norma de permeabilidad en cada centroide FVM en relación con los centroides de elemento FEM identificados, por ejemplo, usando un enfoque de ponderación de distancia inversa típico.

**[0031]** Las figuras 3A – D muestran ejemplos de yacimientos modelados bidimensionales (2D) y 3D (en vista  
30 en despiece ordenado) 200, 220, 240, 260 modelados con cuadrículas FVM 202, 222, 242, 262 que se solapan con una red FEM 212, 232, 252, 272 en la etapa 122 de la figura 1B. Cada cuadrícula FVM 202, 222, 242, 262 incluye una matriz o cuadrícula de celdas regulares, 204, 224, 244, 264, rectangulares/cuadradas o cúbicas en estos ejemplos. Cada red FEM 212, 232, 252, 272 incluye elementos 2D o 3D de forma irregular, 214, 234, 254, 274. El mapeo de centroide a centroide 130 empieza localizando 132 los centroides 206, 226, 246, 266 en cada celda FVM, 204, 224, 244, 264; y,  
35 localizando 132 los centroides 216, 236, 256, 276 en cada elemento FEM 214, 234, 254, 274.

**[0032]** La figura 4 muestra un ejemplo de identificar 134  $n$  celdas FVM que se solapan por completo, o parcialmente, con el elemento FEM 208 individual, el elemento FEM 2D central en la figura 3A. Debe observarse que aunque se describe con referencia a modelos 2D para mayor claridad y simplicidad de explicación, la descripción se

aplica también a celdas 3D, por ejemplo, los ejemplos en las figuras 3C y 3D. En este ejemplo, el elemento FEM 208 con centroide 280 se solapa con cuatro ( $n = 4$ ) celdas FVM 282-0, 282-1, 282-2, 282-3, cada una con respectivo centroide 284-0, 284-1, 284-2, 284-3. Una vez identificadas, el sistema determina 136 la distancia ( $d_i$ ) 286-0, 286-1, 286-2, 286-3 entre los centroides de celdas FVM solapadas 284-0, 284-1, 284-2, 284-3 y el centroide 280 del respectivo elemento FEM 208.

**[0033]** El sistema 100 determina 138 FVM componentes de contribución de celda en el elemento FEM 208 para cada celda. Cada una de las celdas FVM solapadas 282-0, 282-1, 282-2, 282-3 contribuye con un componente de presión de poro  $P_i$  y un tensor de permeabilidad diagonal, determinados en el centroide de celda 280 para cada elemento FEM 208. A partir de estos componentes, el sistema 100 determina una norma de permeabilidad  $||k_i||$  de elemento FEM 208 para cada elemento FEM. El sistema 100 también mapea 140 características de fluido con respecto a los centroides de elemento FEM 280 para cada elemento FEM. El sistema 100 puede mapear la presión  $P_K^c$  y la norma de permeabilidad  $||k_K^c||$  para cada centroide FEM en relación con el centroide FEM 280 particular con respecto a los centroides FVM 284-0, 284-1, 284-2, 284-3. Por ejemplo, un enfoque ponderado en distancia inversa típico se describe en Lam, N.S-N. *Spatial Interpolation Methods: A Review. Cartography and Geographic Information Science*, págs. 129–150, 1983. Tal como se describe en Lam,

$$P_K^c = \frac{\sum_{i=1}^n P_i / d_i}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i}$$

$$||k_K^c|| = \frac{\sum_{i=1}^n ||k_i|| / d_i}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i}$$

$$||\lambda_K^c|| = \frac{\sum_{i=1}^n ||\lambda_i|| / d_i}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i}$$

$$T_K^c = \frac{\sum_{i=1}^n T_i / d_i}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i}$$

**[0034]** La figura 5 muestra un ejemplo de proyección 150 en promedio en volumen inverso de la presión de poro y temperatura con respecto a nodos de elemento FEM, ponderada por subvolumen inverso de permeabilidad y conductividad. Esto empieza dividiendo 152 cada elemento FEM en subvolúmenes, un subvolumen para cada nodo de elemento. Después, el sistema 100 asocia 154 cada nodo de elemento con correspondientes características/parámetros volumétricos en el respectivo centroide de elemento. Tras segmentar todos los elementos FEM, cada nodo está rodeado por una agrupación de subvolúmenes. El sistema 100 promedia 156 el volumen inverso de subvolúmenes contiguos para cada nodo de la red FEM. Finalmente, el sistema 100 promedia 158 la presión de poro y la temperatura ponderadas por subvolumen y determina la permeabilidad/norma de conductividad en cada nodo de elemento, calculándose la norma de conductividad, en una realización de la invención, como  $||\lambda|| = \sqrt{(\lambda)_{xx}^2 + (\lambda)_{yy}^2 + (\lambda)_{zz}^2}$ .

**[0035]** Las figuras 6A – B muestran un ejemplo de dividir 152 elementos FEM en forma de tetraedro 300 en subvolúmenes, por ejemplo, el elemento 300 en la figura 3D. El elemento en forma de tetraedro 300 incluye 4 nodos 302, 304, 306, 308, el centroide 310 ( $P_K^c$ ,  $\|k_K^c\|$ ) y 6 aristas 312, 314, 316, 318, 320, 322 que definen 4 caras. En el ejemplo de la figura, los nodos de los elemento 3D 302 y 304 son nodos comunes con un elemento adyacente, que también comparte la arista 320. Para cada nodo 302, 304, 306, 308 el sistema 100 define 152 un subvolumen ( $V_K$ ) 324-0, 324-1, 324-2, 324-3 que termina en el centroide 310. Los puntos medios 326, 328, 330, 332, 334, 336 de las aristas 312, 314, 316, 318, 320, 322 son los nodos de los subvolúmenes 324-0, 324-1, 324-2, 324-3, cada uno en un extremo de una subarista, opuesto a un nodo de elemento asociado 302, 304, 306, 308 o al centroide 310.

**[0036]** Las figuras 7A – B muestran un ejemplo de dividir 152 elementos FEM en hexaedro de forma irregular en subvolúmenes para dar elementos en forma de tetraedro 350, por ejemplo, celdas 254 en la figura 3C. Las celdas en hexaedro de forma irregular 350 incluyen cada una 8 nodos 352, 354, 356, 358, 360, 362, 364, 366, el centroide 370, y 12 aristas que definen 6 caras. De nuevo, para cada nodo 352, 354, 356, 358, 360, 362, 364, 366, el sistema 100 define 152 un subvolumen 350-0, 350-1, 350-2, 350-3, 350-4, 350-5, 350-6, 350-7, que termina en el centroide 370. Los puntos medios de las aristas son los nodos de los subvolúmenes 350-0, 350-1, 350-2, 350-3, 350-4, 350-5, 350-6, 350-7, cada uno en un extremo de una subarista, opuesto a un nodo de elemento asociado 352, 354, 356, 358, 360, 362, 364, 366, o al centroide 370.

**[0037]** Tras definir 152 subvolúmenes 324-0, 324-1, 324-2, 324-3, o 350-0, 350-1, 350-2, 350-3, 350-4, 350-5, 350-6, 350-7 para todos los elementos FEM 300, 350, el sistema 100 asocia 154 cada uno de los nodos de elemento con correspondientes características/parámetros volumétricos. Por ejemplo con respecto a la figura 6B, el sistema 100 puede asociar 154 las presiones de poro  $P_K^c$ , la norma de permeabilidad  $\|k_K^c\|$ , la temperatura  $T_K^c$  y la conductividad  $\|\lambda_K^c\|$  de los subvolúmenes definidos ( $V_K$ ) 324-0, 324-1, 324-2, 324-3, con los respectivos nodos 302, 304, 306, 308; y con respecto a la figura 7B, las presiones de poro  $P_K^c$ , la norma de permeabilidad  $\|k_K^c\|$ , la temperatura  $T_K^c$  y la conductividad  $\|\lambda_K^c\|$  de los subvolúmenes definidos ( $V_K$ ) 350-0, 350-1, 350-2, 350-3, 350-4, 350-5, 350-6, 350-7, con los respectivos nodos 352, 354, 356, 358, 360, 362, 364, 366.

**[0038]** La figura 8 muestra un ejemplo de una agrupación 380 de subvolúmenes alrededor de un único nodo común 308 compartido con elementos FEM adyacentes. Cada uno de tales nodos comunes ( $j$ ), por ejemplo, los nodos 302 y 304 en las figuras 6A – B, es un nodo en múltiples subvolúmenes. Por tanto, cada nodo  $j$  tiene asociado un subvolumen  $V_K$  en múltiples elementos  $K \in \tau_j$ , donde  $\tau_j$  es el conjunto de índices de elemento que comparten el nodo/vértice  $j$ . El sistema ensambla agrupaciones de subvolúmenes adyacentes 380, agrupadas alrededor de cada uno de tales nodos comunes. Para cada agrupación de nodos FEM el sistema 100 promedia 156 el volumen inverso de subvolúmenes contiguos ( $1/V_K$ ) de cada agrupación 380. Por tanto,  $\|k_K^c\|/\|\lambda_K^c\|$  proporciona la permeabilidad/norma de conductividad del respectivo subvolumen.

**[0039]** Para cada elemento, el sistema 100 promedia 158 la presión de poro/temperatura ponderada por subvolumen inverso y la permeabilidad/norma de conductividad para cada nodo. La presión de poro/temperatura final ( $P^j/T^j$ ) en cada nodo de red ( $j$ ) se determina por

$$P^j = \frac{\sum_{K \in \tau_j} P_K^c \|k_K^c\| / V_K}{\sum_{K \in \tau_j} \|k_K^c\| / V_K}$$

$$T^j = \frac{\sum_{K \in \tau_j} T_K^c \|\lambda_K^c\| / V_K}{\sum_{K \in \tau_j} \|\lambda_K^c\| / V_K}.$$

**[0040]** Debe observarse que las soluciones al problema del flujo de fluido tienden a ser menos precisas en regiones de baja permeabilidad que en regiones de alta permeabilidad. Además, el yacimiento puede incluir regiones totalmente impermeables que requieren definir un valor mínimo o límite inferior para el campo de permeabilidad en las respectivas celdas/regiones para garantizar la convergencia. Resultados típicos en estas regiones de baja permeabilidad son imprecisos cuando se usan métodos según la técnica anterior y con frecuencia conducen a resultados por lo demás poco realistas. Por tanto, puede usarse la norma del campo de permeabilidad como factor de ponderación al determinar la presión nodal, ponderando de manera más intensa los valores de presión de celdas de regiones de alta permeabilidad. Así, el sistema 100 también determina presiones de poro/temperaturas de centroides ( $P_K^c/T_K^c$ ) a partir normas de permeabilidad/conductividad ponderadas en promedio en volumen de celdas.

**[0041]** Además, en los límites de yacimiento, el sistema 100 puede imponer condiciones límite apropiadas para la presión de poro, por ejemplo, mediante celdas fantasma que imponen las condiciones deseadas. Condiciones límite típicas corresponden a una condición sin flujo o un flujo neto especificado.

**[0042]** Ventajosamente, el sistema preferido 100 facilita el mapeo de datos entre modelos FEM y FVM para yacimientos, transfiriendo fácilmente parámetros de fluido de centroides FVM a centroides FEM del yacimiento para dos geometrías de celda diferentes. Preferiblemente, el mapeo de datos se pondera con dos factores de ponderación, un factor de ponderación petrofísico y un factor de ponderación beta, por ejemplo, un factor de ponderación beta de volumen inverso. Alternativamente, el factor de ponderación beta podría ser un factor de ponderación beta de distancia inversa o un factor de ponderación beta de promedio en volumen.

**[0043]** Además, la presente invención reduce el análisis de la producción limitando el análisis necesario a aquellas celdas FVM en una cuadrícula FVM del yacimiento que se solapan con elementos FEM del yacimiento. Por tanto, habiendo identificado y reducido las celdas FVM consideradas para la producción, el sistema preferido usa un promediado ponderado en distancia inversa para caracterizar el yacimiento. Además, en lugar de requerir una solución de sistema lineal para todo el yacimiento, la presente invención llega a una proyección local a partir de los nodos centrales. Además, en lugar de transferir datos entre proyecciones de fluido y geomecánicas del yacimiento, acoplando valores basándose únicamente en parámetros geométricos y formulaciones matemáticas, la presente invención incorpora parámetros petrofísicos al acoplar los resultados de modelado geométrico para dar resultados más realistas.

**[0044]** Aunque la invención se ha descrito en términos de realizaciones preferidas, los expertos en la técnica reconocerán que la invención puede ponerse en práctica con modificación dentro del espíritu y alcance de las reivindicaciones adjuntas. Está previsto que todas estas variaciones y modificaciones entren dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas. Los ejemplos y dibujos han de considerarse, por consiguiente, ilustrativos más que restrictivos.

**[0044]** Una primera realización identificada como realización n.º 1, según un aspecto de la invención, es un método para gestionar la producción de un campo de hidrocarburos, comprendiendo dicho método:

modelar propiedades de fluido de un campo de hidrocarburos en un modelo según el método de volúmenes finitos (FVM) y propiedades geomecánicas en un modelo según el método de elementos finitos (FEM);  
 modelar mediante mapeo centroides entre sí, entre dicho modelo FVM y dicho modelo FEM;  
 determinar características de fluido en cada elemento FEM en respuesta a características geomecánicas del  
 5 modelo FEM; y  
 ajustar la producción del campo en respuesta a dichas características de fluido determinadas.

**[0045]** En una realización adicional identificada como realización n.º 2, según la realización n.º 1, dicho modelo FVM incluye una pluralidad de celdas FVM que modelan propiedades de fluido de dicho campo de hidrocarburos y dicho modelo FEM incluye una pluralidad de elementos FEM que modelan propiedades geomecánicas  
 10 de dicho campo de hidrocarburos.

**[0046]** En una realización adicional identificada como realización n.º 3, según la realización n.º 2, el modelado mediante mapeo de centroides mapea propiedades de fluido ponderadas en distancia inversa desde centroides de celda FVM hasta centroides de elemento FEM.

**[0047]** En una realización adicional identificada como realización n.º 4, según la realización n.º 3, el  
 15 modelado mediante mapeo de centroides comprende:

localizar centroides en cada celda FVM y cada elemento FEM;

identificar para cada uno de dichos elementos FEM cada celda FVM que se solapa;

determinar la distancia ( $d_i$ ) desde el respectivo centroide para cada una de dichas celdas FVM que se solapan identificadas hasta el respectivo centroide del elemento FEM solapado;

20 determinar la presión de poro ( $P_i$ ), la norma de permeabilidad ( $\|k_i\|$ ), la conductividad ( $\|\lambda_i\|$ ) y la temperatura ( $T_i$ ) del centroide de celda FVM que se solapa; y

determinar la presión de poro ( $P_K^c$ ), la norma de permeabilidad ( $\|k_K^c\|$ ), la norma de conductividad ( $\|\lambda_K^c\|$ ) y la temperatura ( $T_K^c$ ) del centroide del elemento FEM solapado, ponderadas inversamente en cuanto a la distancia entre los respectivos centroides.

25 **[0048]** En una realización adicional identificada como realización n.º 5, según la realización n.º 4, la presión de poro ( $P_K^c$ ), la norma de permeabilidad ( $\|k_K^c\|$ ), la norma de conductividad ( $\|\lambda_K^c\|$ ) y la temperatura ( $T_K^c$ ) en el centroide de elemento FEM se determinan a partir de

$$P_K^c = \frac{\sum_{i=1}^n P_i / d_i}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i}$$

$$\|k_K^c\| = \frac{\sum_{i=1}^n \|k_i\| / d_i}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i}$$

$$|\lambda_k^c| = \frac{\sum_{i=1}^n |\lambda_i| / d_i}{\sum_{i=1}^n 1/d_i}$$

$$T_k^c = \frac{\sum_{i=1}^n T_i / d_i}{\sum_{i=1}^n 1/d_i}$$

**[0049]** En una realización adicional identificada como realización n.º 6, según la realización n.º 4, en cualquier celda FVM que tenga una permeabilidad por debajo de un mínimo seleccionado, la permeabilidad se establece en dicho mínimo seleccionado.

**[0050]** En una realización adicional identificada como realización n.º 7, según cualquiera de las realizaciones n.º 2-6, la determinación de características de fluido comprende:

segmentar cada elemento FEM solapado en una pluralidad de subvolumenes ( $V_K$ ), un subvolumen para cada nodo de elemento FEM; y

determinar un promedio ponderado de presión de poro y temperatura de subvolumenes ( $V_K$ ) agrupados alrededor de cada uno de dicho nodo  $j$  de elemento FEM.

**[0051]** En una realización adicional identificada como realización n.º 8, según la realización n.º 7, dicho promedio ponderado de presión de poro ( $P^j$ ) y temperatura ( $T^j$ ) se determinan a partir de

$$P^j = \frac{\sum_{K \in \tau_j} P_K^c |k_K^c| / V_K}{\sum_{K \in \tau_j} |k_K^c| / V_K}$$

$$T^j = \frac{\sum_{K \in \tau_j} T_K^c |\lambda_K^c| / V_K}{\sum_{K \in \tau_j} |\lambda_K^c| / V_K},$$

donde  $\tau_j$  es el conjunto de índices de elementos que comparten el nodo/vértice  $j$ .

**[0052]** En una realización adicional identificada como realización n.º 9, según la realización n.º 7, dicho campo de hidrocarburos es un yacimiento petroquímico y dicho promedio ponderado indica propiedades volumétricas petroquímicas en respectivas ubicaciones de nodo de elemento FEM en dicho yacimiento petroquímico.

**[0053]** En una realización adicional identificada como realización n.º 10, según otro aspecto de la invención, es un producto de programa informático para gestionar la producción de un campo de hidrocarburos, comprendiendo dicho producto de programa informático un medio que puede usarse en ordenador que tiene código de programa legible por ordenador almacenado en el mismo, haciendo dicho código de programa legible por ordenador que uno o más ordenadores que ejecutan dicho código:

modelen el fluido en un campo de hidrocarburos en un modelo según el método de volúmenes finitos (FVM) y modelen la estructura de campo de manera geomecánica en un modelo según el método de elementos finitos (FEM);

modelen mediante mapeo entre sí de propiedades de centroide entre dicho modelo FVM y dicho modelo FEM;

determinen características de fluido en cada elemento FEM en respuesta a características geomecánicas del modelo FEM; y

5 ajusten la producción del campo en respuesta a dichas características de fluido determinadas.

**[0054]** En una realización adicional identificada como realización n.º 11, según la realización n.º 10, dicho modelo FVM incluye una pluralidad de celdas FVM que modelan las propiedades de fluido de dicho campo de hidrocarburos y dicho modelo FEM incluye una pluralidad de elementos FEM que modelan propiedades geomecánicas de dicho campo de hidrocarburos, y en el que dicho código de programa legible por ordenador, que hace que dicho uno o más ordenadores modelen mediante mapeo de centroides, hace que dicho uno o más ordenadores mapeen dichas propiedades de fluido ponderadas en distancia inversa desde centroides de celda FVM hasta centroides de elemento FEM.

**[0055]** En una realización adicional identificada como realización n.º 12, según la realización n.º 11, dicho código de programa legible por ordenador, que hace que dicho uno o más ordenadores modelen mediante mapeo de centroides, hace que dicho uno o más ordenadores:

localicen centroides en cada celda FVM y cada elemento FEM;

identifiquen para cada uno de dichos elementos FEM cada celda FVM que se solapa;

determinen la distancia ( $d_i$ ) desde el respectivo centroide para cada una de dichas celdas FVM que se solapan identificadas hasta el respectivo centroide del elemento FEM solapado;

20 determinen la presión de poro ( $P_i$ ), la norma de permeabilidad ( $\|k_i\|$ ), la norma de conductividad  $\|\lambda_i\|$  y la temperatura ( $T_i$ ) del centroide de celda FVM que se solapa; y

determinen la presión de poro ( $P_K^c$ ), la norma de permeabilidad ( $\|k_K^c\|$ ), la norma de conductividad ( $\|\lambda_K^c\|$ ) y la temperatura ( $T_K^c$ ) del centroide del elemento FEM solapado, ponderadas inversamente en cuanto a la distancia entre los respectivos centroides.

**[0056]** En una realización adicional identificada como realización n.º 13, según la realización n.º 12, dicho código de programa legible por ordenador, que hace que dicho uno o más ordenadores modelen mediante mapeo de centroides, hace que dicho uno o más ordenadores determinen la presión de poro ( $P_K^c$ ), la norma de permeabilidad ( $\|k_K^c\|$ ), la norma de conductividad ( $\|\lambda_K^c\|$ ) y la temperatura ( $T_K^c$ ) que se determinan a partir de

$$P_K^c = \frac{\sum_{i=1}^n P_i / d_i}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i}$$

$$\|k_K^c\| = \frac{\sum_{i=1}^n \|k_i\| / d_i}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i}$$

$$\|\lambda_K^c\| = \frac{\sum_{i=1}^n \|\lambda_i\| / d_i}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i}$$

$$T_K^c = \frac{\sum_{i=1}^n T_i / d_i}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i}$$

**[0057]** En una realización adicional identificada como realización n.º 14, según la realización n.º 13, en cualquier celda FVM que tenga una permeabilidad por debajo de un mínimo seleccionado, dicho código de programa legible por ordenador, que hace que dicho uno o más ordenadores determinen la permeabilidad del centroide de celda FVM que se solapa, hace que dicho uno o más ordenadores establezcan la permeabilidad en dicho mínimo seleccionado.

**[0058]** En una realización adicional identificada como realización n.º 15, según la realización n.º 11, dicho código de programa legible por ordenador que hace que dicho uno o más ordenadores determinen características de fluido, hace que dicho uno o más ordenadores:

segmenten cada elemento FEM solapado en una pluralidad de subvolúmenes ( $V_K$ ), un subvolumen para cada nodo de elemento FEM; y

determinen un promedio ponderado de presión de poro y temperatura de los subvolúmenes ( $V_K$ ) agrupados alrededor de cada uno de dichos nodos de elemento FEM.

**[0059]** En una realización adicional identificada como realización n.º 16, según la realización n.º 15, dicho uno o más ordenadores determinan dicho promedio ponderado de presión de poro ( $P^j$ ) y temperatura ( $T^j$ ) que se determinan a partir de

$$P^j = \frac{\sum_{K \in \tau_j} P_K^c |k_K^c| / V_K}{\sum_{K \in \tau_j} |k_K^c| / V_K}$$

$$T^j = \frac{\sum_{K \in \tau_j} T_K^c |\lambda_K^c| / V_K}{\sum_{K \in \tau_j} |\lambda_K^c| / V_K},$$

en donde  $\tau_j$  es el conjunto de índices de elementos que comparten el nodo/vértice  $j$ .

**[0060]** En una realización adicional identificada como realización n.º 17, según la realización n.º 15, dicho campo de hidrocarburos es un yacimiento petroquímico y dicho promedio ponderado indica propiedades volumétricas petroquímicas en respectivas ubicaciones de nodo de elemento FEM en dicho yacimiento petroquímico.

**[0061]** En una realización adicional identificada como realización n.º 18, según el primer aspecto de la invención, un método para gestionar la producción de un yacimiento petroquímico comprende:

modelar un campo de hidrocarburos en un modelo según el método de volúmenes finitos (FVM) que incluye una pluralidad de celdas FVM;

modelar un campo de hidrocarburos en un modelo según el método de elementos finitos (FEM) que incluye una pluralidad de elementos FEM;

localizar centroides en cada celda FVM y cada elemento FEM;

identificar para cada uno de dichos elementos FEM cada celda FVM que se solapa;

determinar la distancia ( $d_i$ ) desde el respectivo centroide para cada una de dichas celdas FVM que se solapan identificadas hasta el respectivo centroide del elemento FEM solapado;

determinar la presión de poro ( $P_i$ ), la norma de permeabilidad ( $||k_i||$ ) y la temperatura ( $T_i$ ) del centroide de celda FVM que se solapa;

5 determinar la presión de poro ( $P_K^c$ ), la norma de permeabilidad ( $||k_K^c||$ ), la norma de conductividad ( $||\lambda_K^c||$ ) y la temperatura ( $T_K^c$ ) del centroide del elemento FEM solapado ponderadas inversamente en cuanto a la distancia entre los respectivos centroides;

segmentar cada elemento FEM solapado en una pluralidad de subvolúmenes ( $V_K$ ), un subvolumen para cada nodo de elemento FEM;

10 determinar un promedio ponderado de presión de poro ( $P^j$ ) y temperatura ( $T^j$ ) de los subvolúmenes ( $V_K$ ) agrupados alrededor de cada uno de dichos nodos de elemento FEM; y

ajustar la producción del campo en respuesta a dichas características de fluido determinadas.

**[0062]** En una realización adicional identificada como realización n.º 19, según la realización n.º 18, la presión de poro ( $P_K^c$ ), la norma de permeabilidad ( $||k_K^c||$ ), la norma de conductividad ( $||\lambda_K^c||$ ) y la temperatura ( $T_K^c$ ) se determinan a partir de

15

$$P_K^c = \frac{\sum_{i=1}^n P_i / d_i}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i}$$

$$||k_K^c|| = \frac{\sum_{i=1}^n ||k_i|| / d_i}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i}$$

$$||\lambda_K^c|| = \frac{\sum_{i=1}^n ||\lambda_i|| / d_i}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i}$$

$$T_K^c = \frac{\sum_{i=1}^n T_i / d_i}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i}$$

**[0063]** En una realización adicional identificada como realización n.º 20, según la realización n.º 19, en el que en cualquier celda FVM que tenga una permeabilidad por debajo de un mínimo seleccionado, la permeabilidad se establece en dicho mínimo seleccionado, y dicho promedio ponderado de presión de poro ( $P^j$ ) y temperatura ( $T^j$ ) se determinan a partir de

20

$$P^j = \frac{\sum_{K \in \tau_j} P_K^c ||k_K^c|| / V_K}{\sum_{K \in \tau_j} ||k_K^c|| / V_K}$$

$$T^j = \frac{\sum_{K \in \tau_j} T_K^c \|\lambda_K^c\| / V_K}{\sum_{K \in \tau_j} \|\lambda_K^c\| / V_K}.$$

REIVINDICACIONES

1. Método de gestión de la producción de un yacimiento petroquímico, comprendiendo dicho método:

modelar un campo de hidrocarburos en un modelo según el método de volúmenes finitos (FVM) que incluye una pluralidad de celdas FVM;

5 modelar un campo de hidrocarburos en un modelo según el método de elementos finitos (FEM) que incluye una pluralidad de elementos FEM;

modelar mediante mapeo centroides entre sí, entre dicho modelo FVM y dicho modelo FEM,

determinar características de fluido en cada elemento FEM en respuesta a características geomecánicas del modelo FEM; y

10 ajustar la producción del campo en respuesta a dichas características de fluido determinadas, en el que el modelo mediante mapeo se caracteriza porque comprende:

- localizar centroides en cada celda FVM y cada elemento FEM;
- identificar para cada uno de dichos elementos FEM cada celda FVM que se solapa;
- determinar la distancia ( $d_i$ ) desde el respectivo centroide para cada una de dichas celdas FVM que se solapan identificadas hasta el respectivo centroide del elemento FEM solapado;
- 15 - determinar la presión de poro ( $P_i$ ), la norma de permeabilidad ( $||k_i||$ ) y la temperatura ( $T_i$ ) del centroide de la celda FVM que se solapa;
- determinar la presión de poro ( $P_K^c$ ), la norma de permeabilidad ( $||k_K^c||$ ), la norma de conductividad ( $||\lambda_K^c||$ ) y la temperatura ( $T_K^c$ ) del centroide del elemento FEM solapado, ponderadas inversamente en cuanto a la
- 20 distancia entre los respectivos centroides;
- segmentar cada elemento FEM solapado en una pluralidad de subvolúmenes ( $V_K$ ), un subvolumen para cada nodo de elemento FEM;
- determinar un promedio ponderado de presión de poro ( $P^j$ ) y temperatura ( $T^j$ ) de subvolúmenes ( $V_K$ ) agrupados alrededor de cada uno de dichos nodos de elemento FEM.

25 2. Método según la reivindicación 1, en el que la presión de poro ( $P_K^c$ ) del centroide de elemento FEM, la norma de permeabilidad ( $||k_K^c||$ ) del centroide de elemento FEM, la norma de conductividad ( $||\lambda_K^c||$ ) del centroide de elemento FEM y la temperatura ( $T_K^c$ ) centroide de elemento FEM se determinan a partir de

$$P_K^c = \frac{\sum_{i=1}^n P_i / d_i}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i}$$

$$||k_K^c|| = \frac{\sum_{i=1}^n ||k_i|| / d_i}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i}$$

$$||\lambda_K^c|| = \frac{\sum_{i=1}^n ||\lambda_i|| / d_i}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i}$$

$$T_K^c = \frac{\sum_{i=1}^n T_i / d_i}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i}.$$

3. Método según cualquier reivindicación anterior, en el que el promedio ponderado de presión de poro ( $P^j$ ) y temperatura ( $T^j$ ) se determinan a partir de

$$P^j = \frac{\sum_{K \in \tau_j} P_K^c |k_K^c| / V_K}{\sum_{K \in \tau_j} |k_K^c| / V_K}$$

$$T^j = \frac{\sum_{K \in \tau_j} T_K^c |\lambda_K^c| / V_K}{\sum_{K \in \tau_j} |\lambda_K^c| / V_K}.$$

4. Método según cualquier reivindicación anterior, en el que en cualquier celda FVM que tiene una permeabilidad por debajo de un mínimo seleccionado, la permeabilidad se establece en dicho mínimo seleccionado.

5 5. Método según cualquier anterior, en el que al segmentar cada elemento FEM solapado en una pluralidad de subvolúmenes ( $V_K$ ), un subvolumen para cada nodo de elemento FEM; la segmentación verifica que:

- el número de subvolúmenes ( $V_K$ ) es igual al número de nodos del elemento FEM,
- cada nodo del elemento FEM está contenido en un subvolumen ( $V_K$ ) de dicha segmentación del elemento FEM.

10 6. Producto de programa informático adaptado para llevar a cabo un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

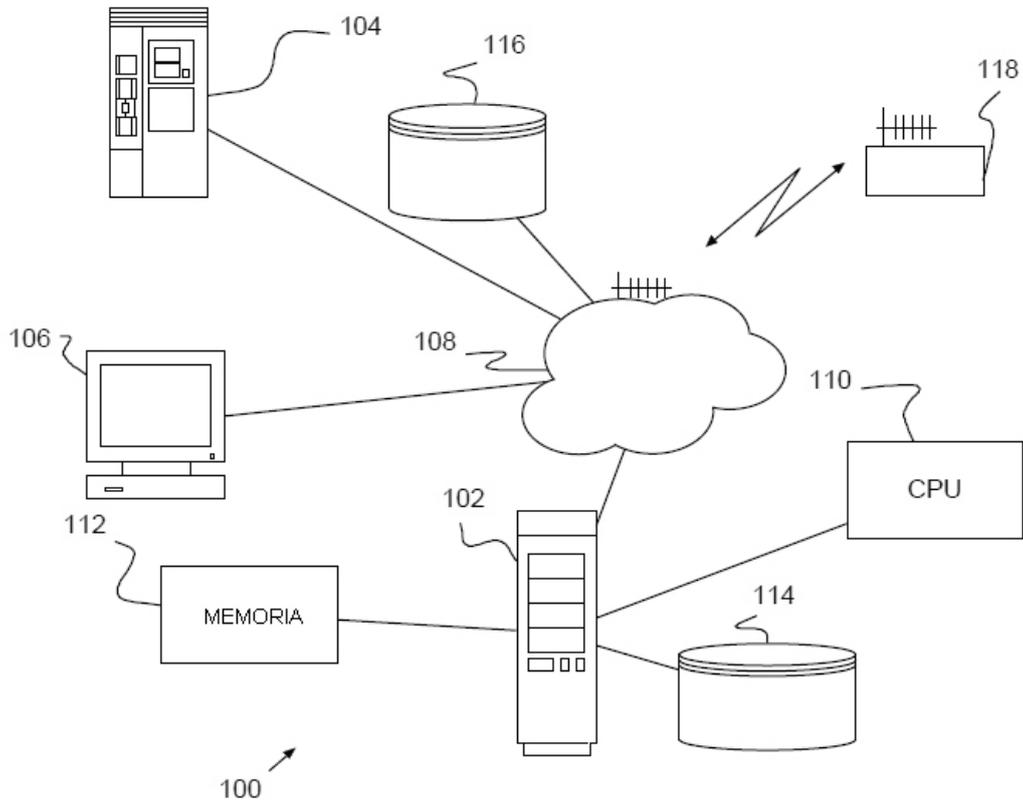


Fig. 1A

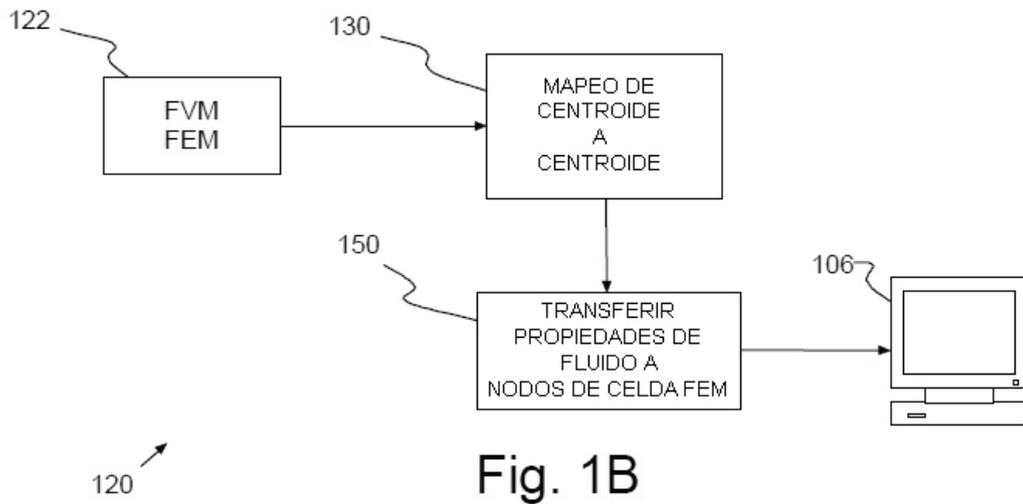


Fig. 1B

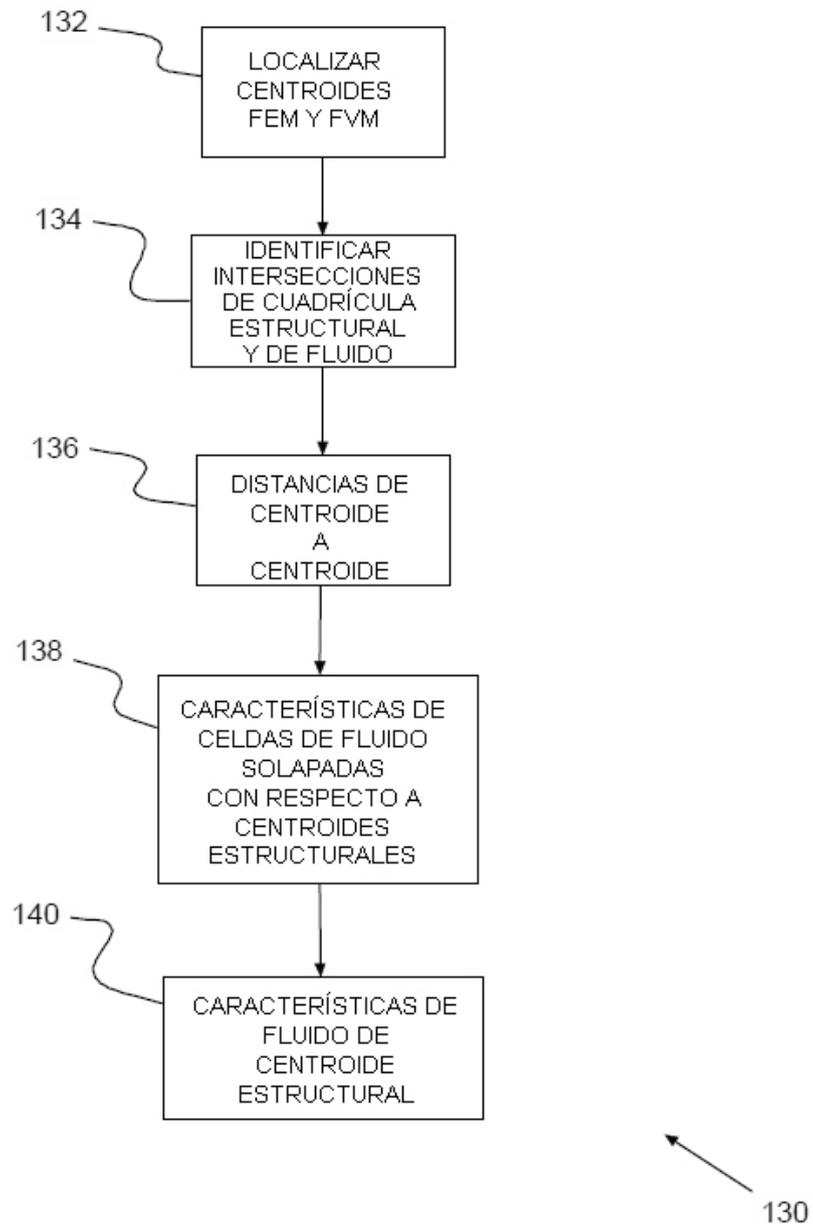


Fig. 2

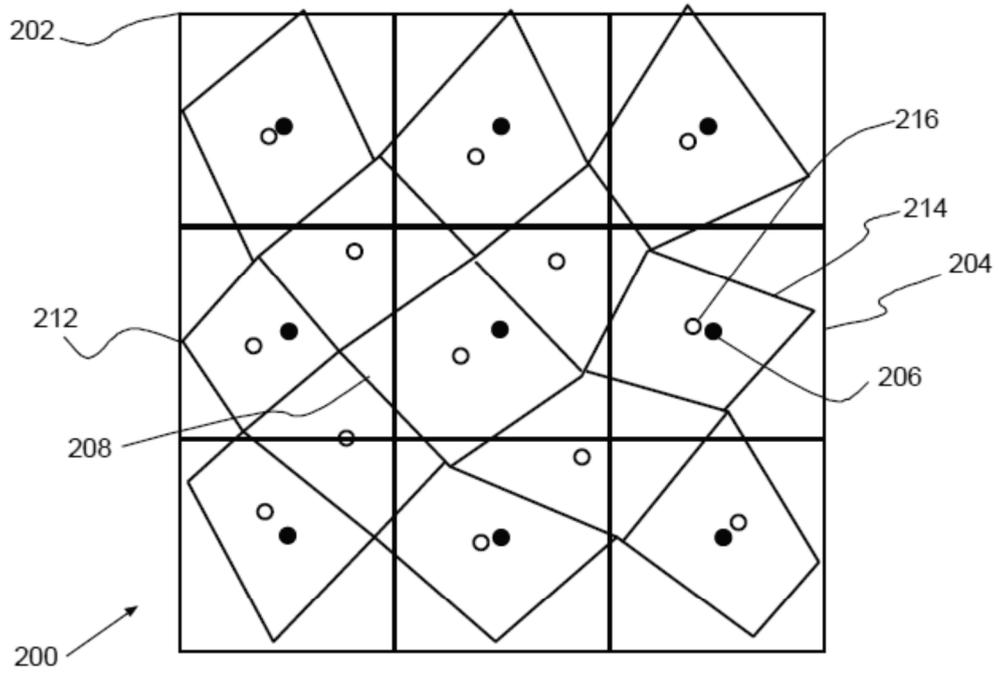


Fig. 3A

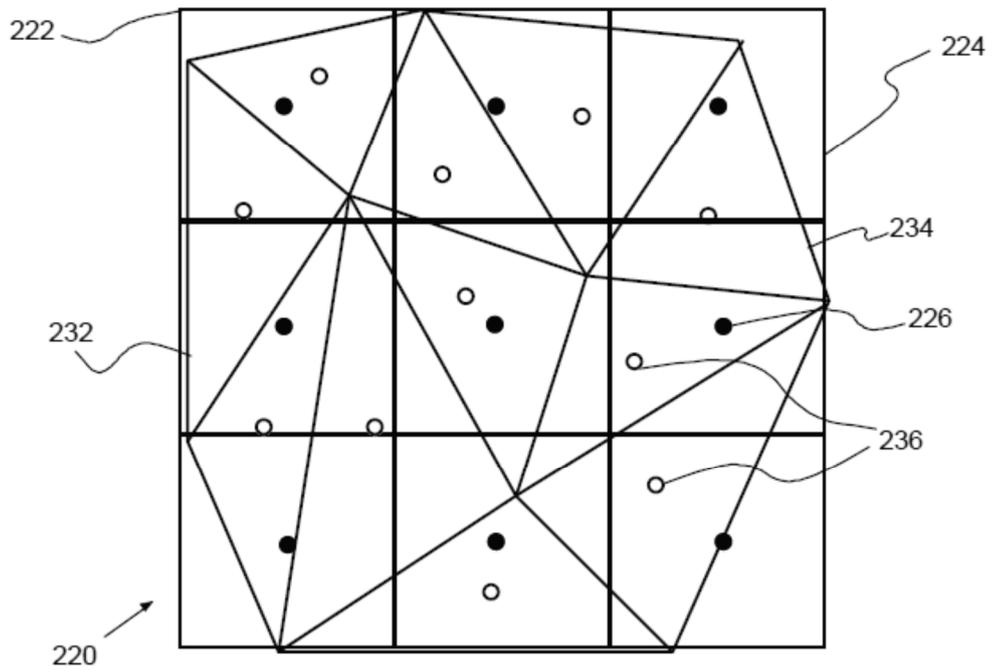


Fig. 3B

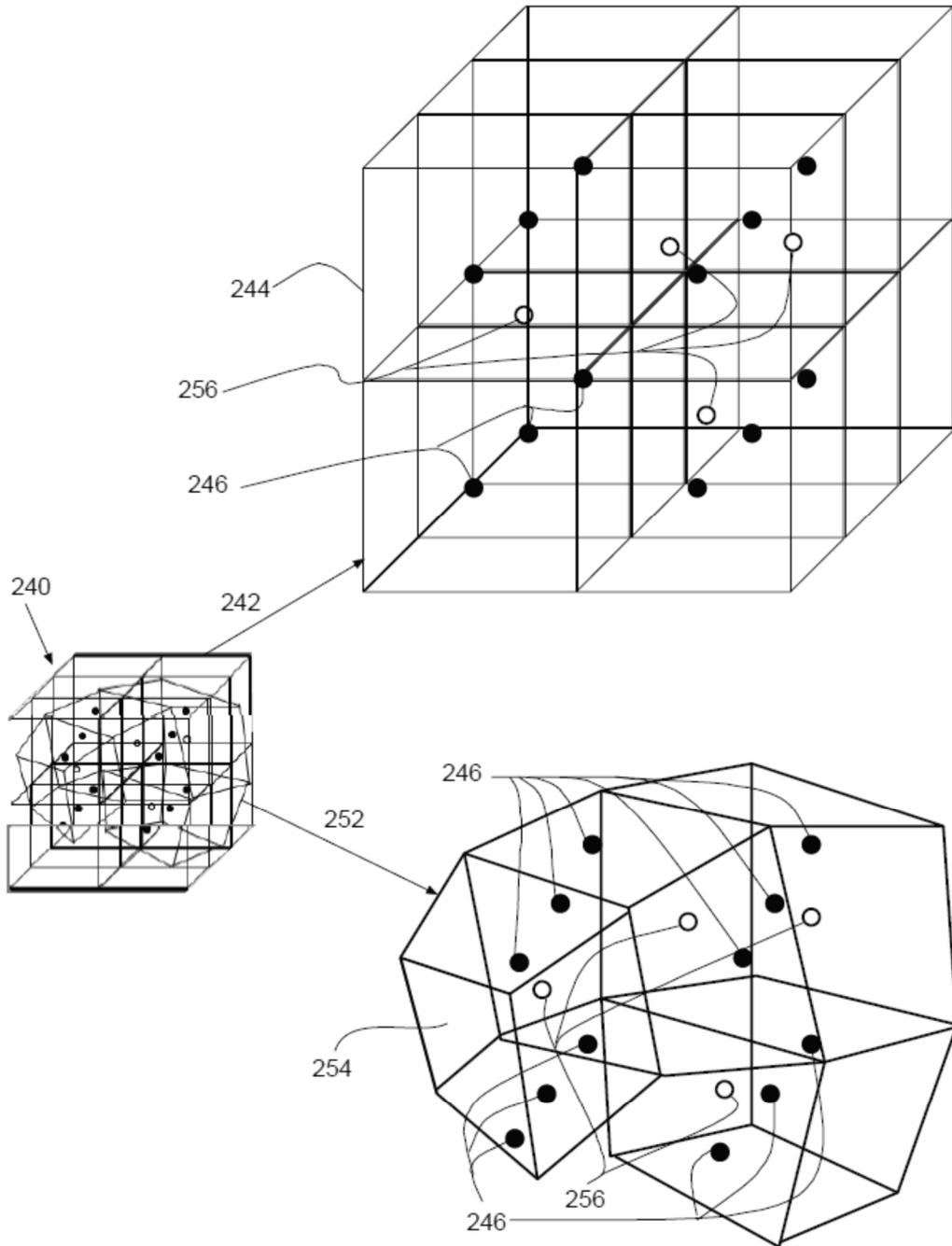


Fig. 3C

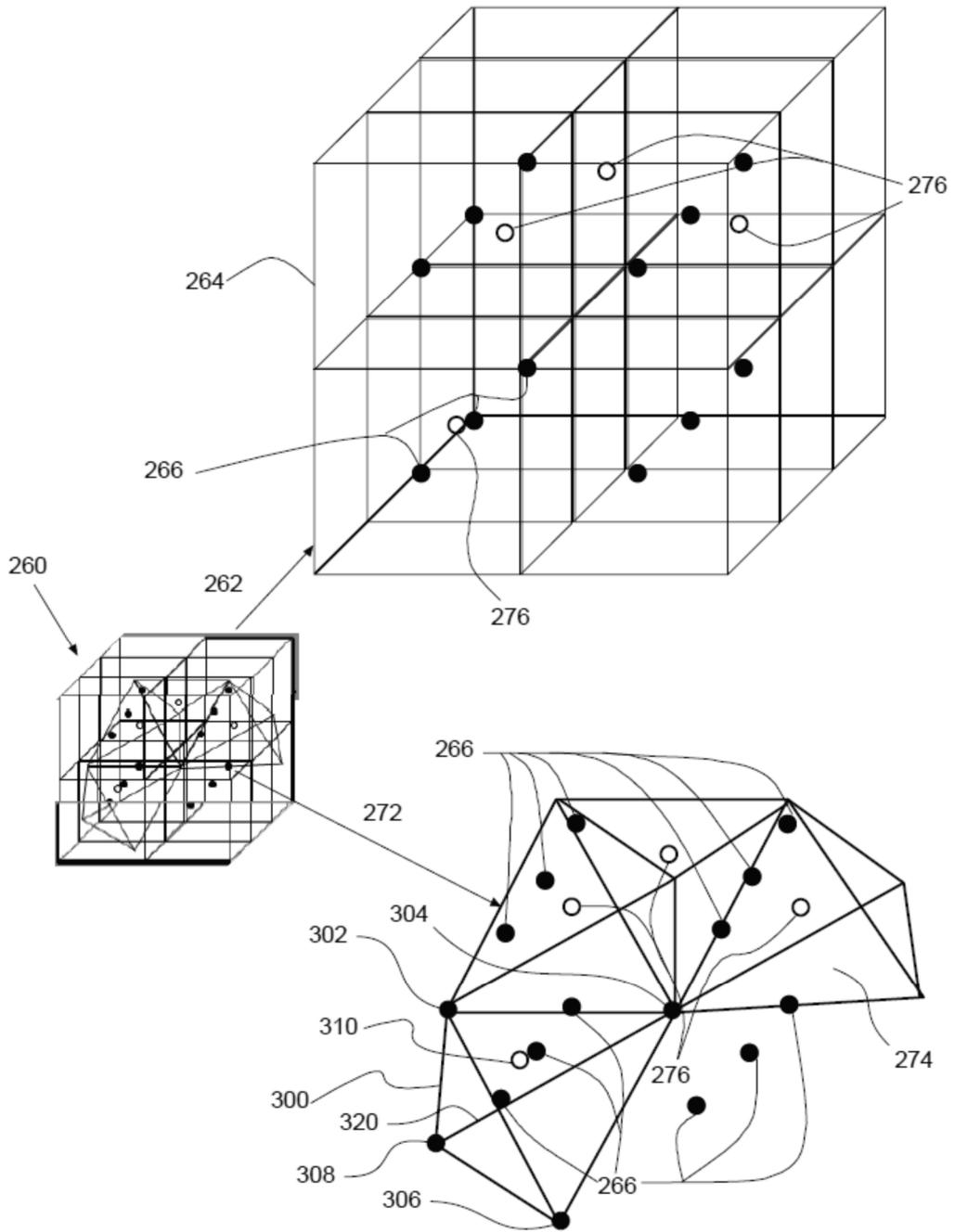


Fig. 3D

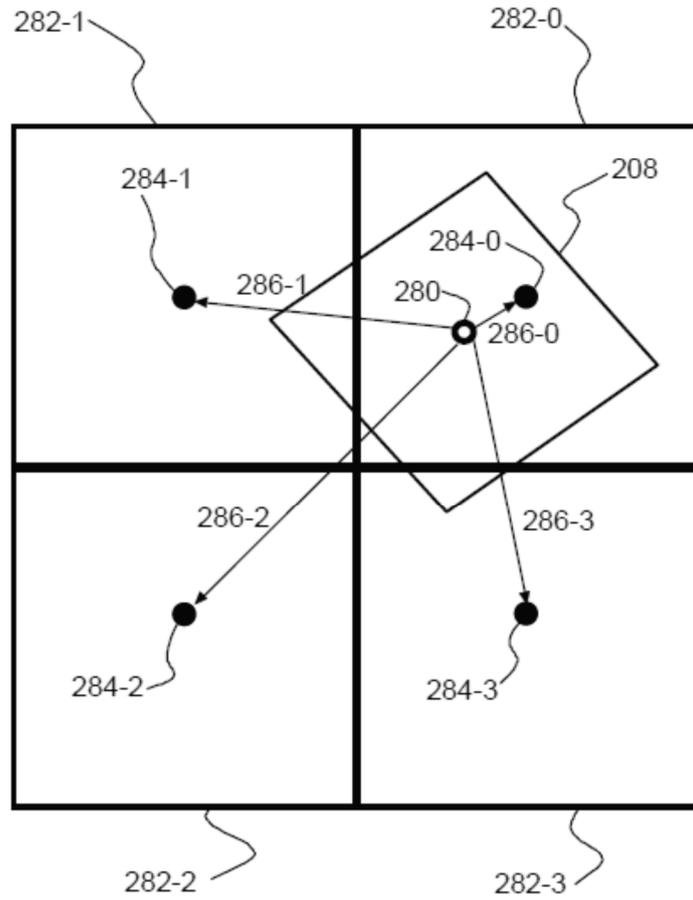


Fig. 4

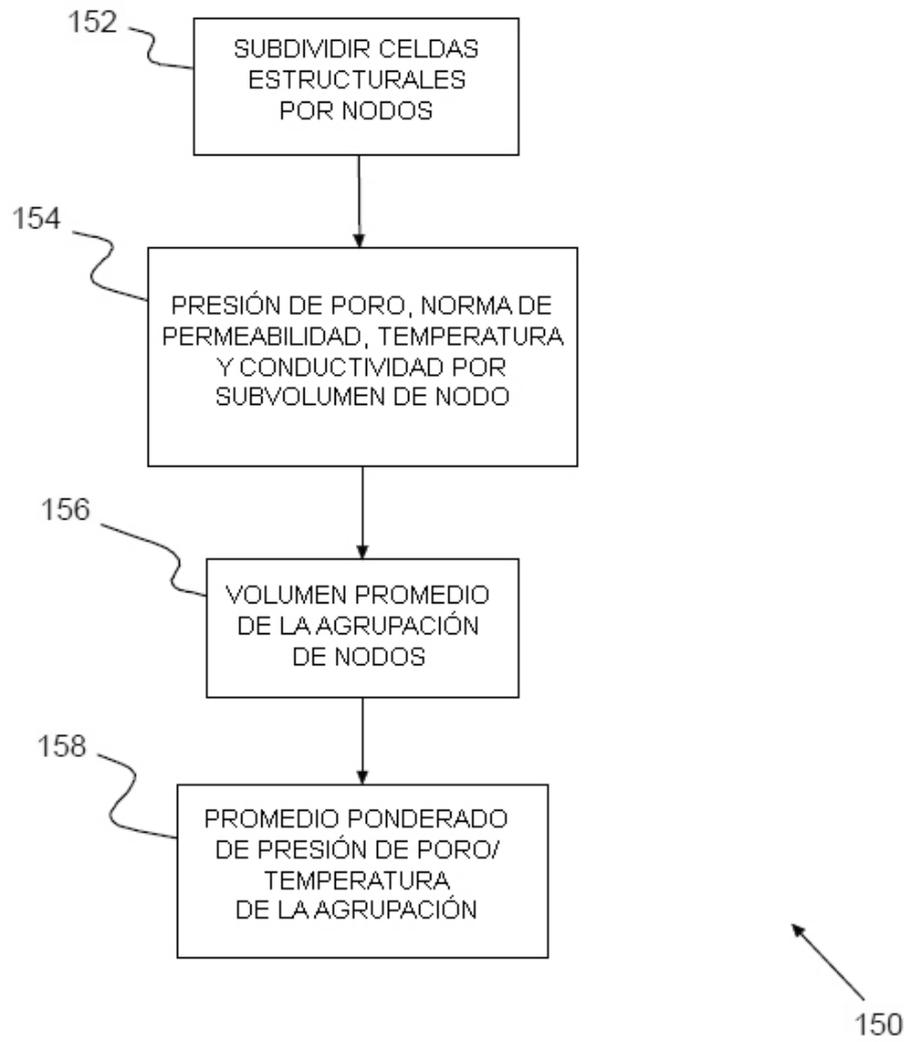


Fig. 5

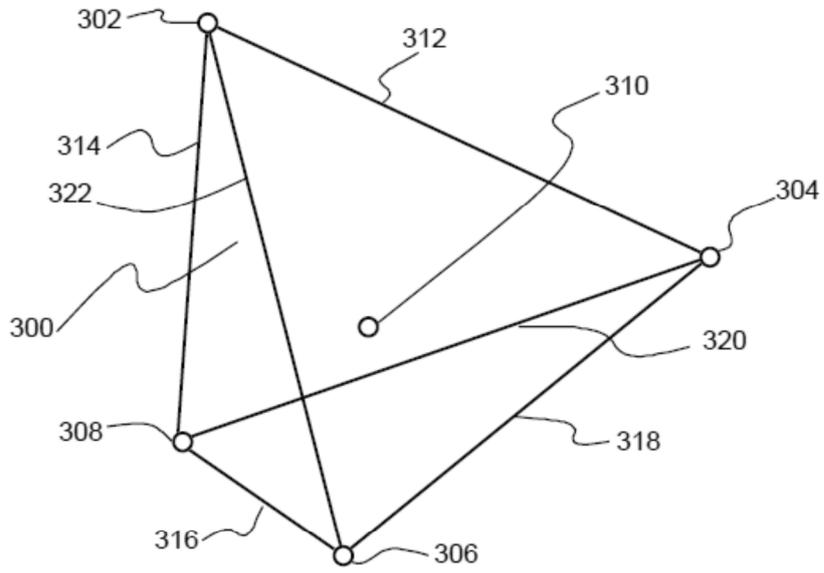


Fig. 6A

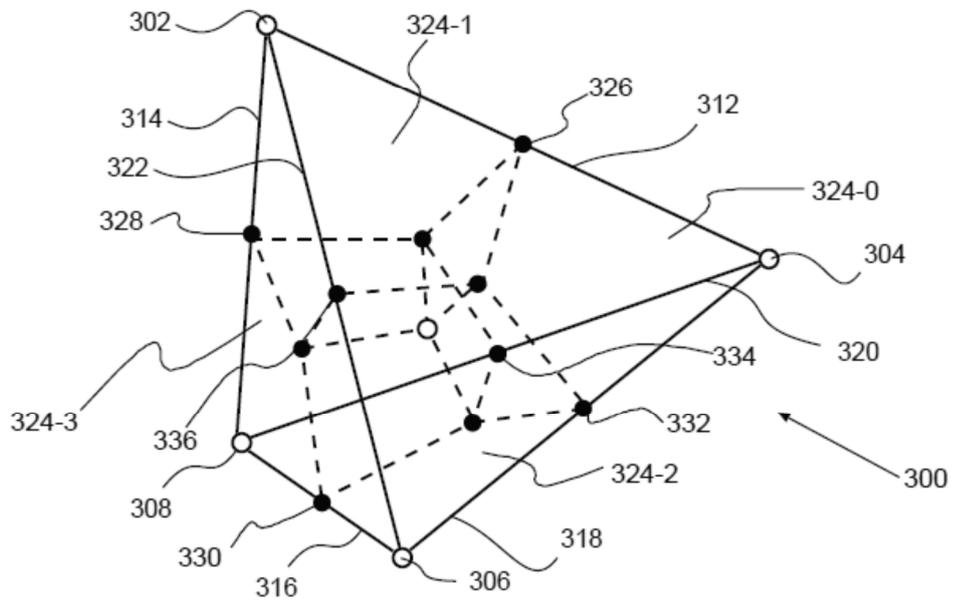


Fig. 6B

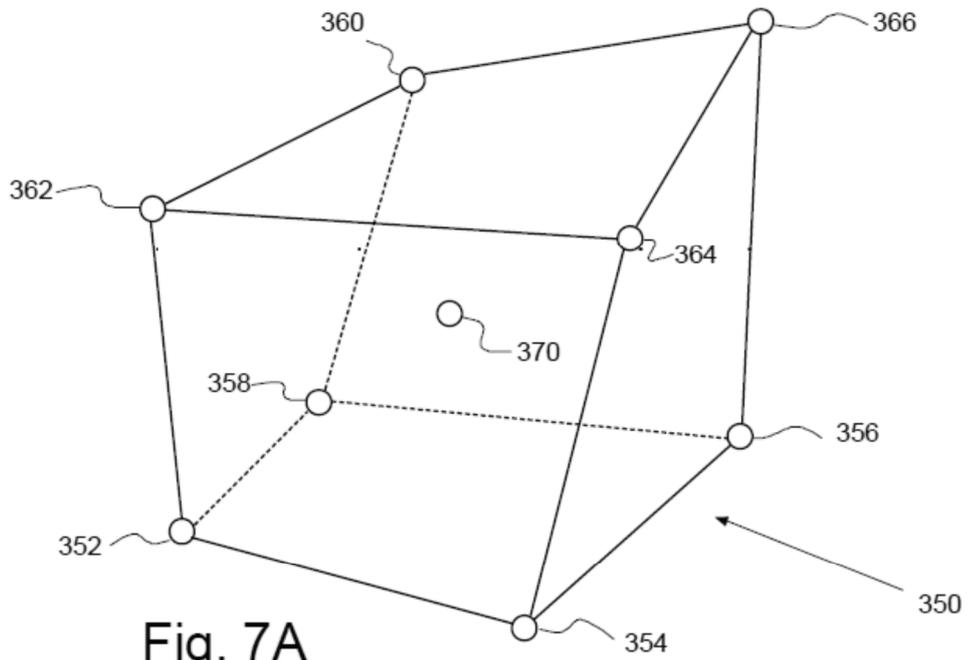


Fig. 7A

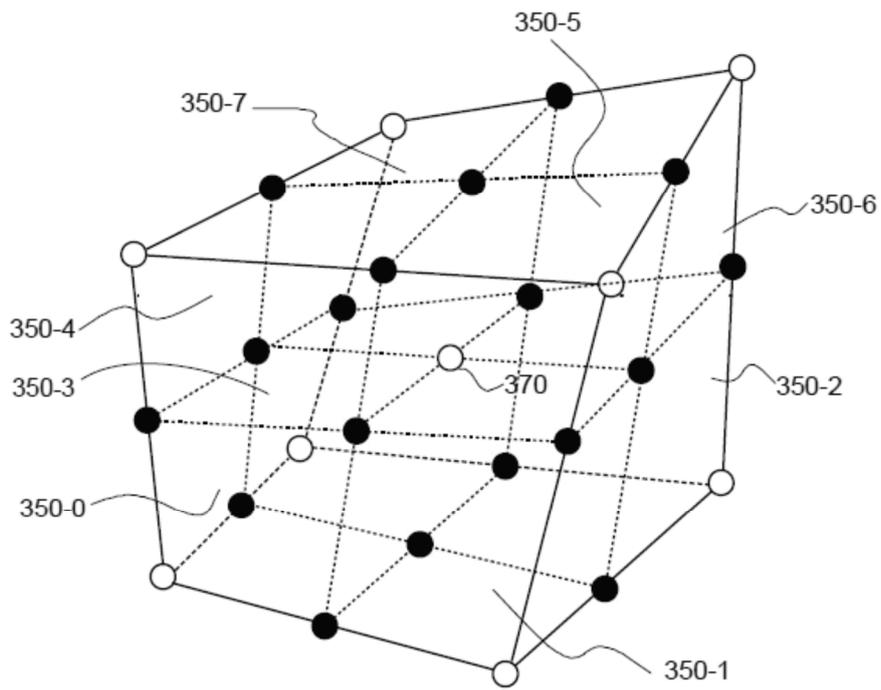


Fig. 7B

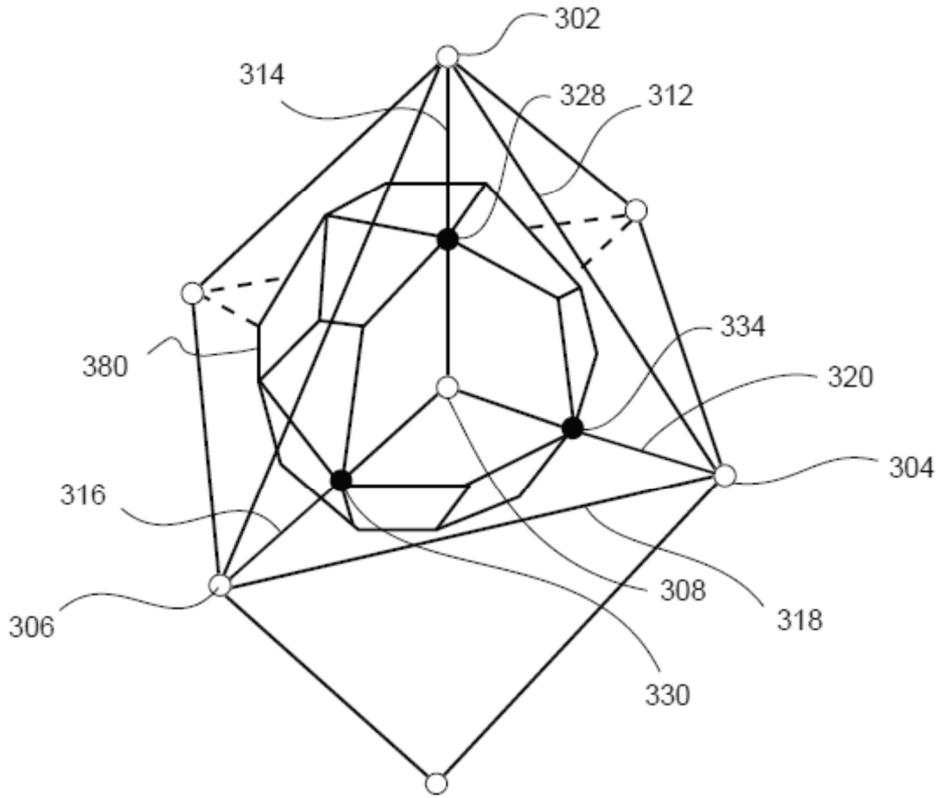


Fig. 8