

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 797 102**

51 Int. Cl.:

C10B 47/04 (2006.01)

C10B 47/24 (2006.01)

C10B 49/10 (2006.01)

C10B 53/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **24.11.2016 E 16200502 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.03.2020 EP 3173459**

54 Título: **Procedimiento de pirólisis rápida de partículas orgánicas de biomasa con inyección a contracorriente de gases calientes**

30 Prioridad:

25.11.2015 FR 1561355

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

01.12.2020

73 Titular/es:

**COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET
AUX ENERGIES ALTERNATIVES (100.0%)
Bâtiment Le Ponant D, 25 Rue Leblanc
75015 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**RAVEL, SERGE;
CASTELLI, PIERRE y
PERRET, CHRISTIAN**

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 797 102 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 de pirólisis rápida de partículas orgánicas de biomasa con inyección a contracorriente de gases calientes

5

Campo técnico

La presente invención está relacionada con el campo de la pirólisis rápida, procedimiento por el que unas materias orgánicas sólidas se someten a unas altas temperaturas, en un entorno pobre en oxígeno o desprovisto de oxígeno, para formar otros productos, que comprenden unos gases y materia, sólida y líquida en forma de vapor (condensable a baja temperatura).

10

la invención se aplica a la pirólisis rápida de materias orgánicas de biomasa, que agrupa el conjunto de las materias orgánicas de origen vegetal, animal o fúngico, para obtener, en concreto, aceite pirolítico y coque pirolítico que pueden utilizarse, por ejemplo, como combustibles. En particular, la invención puede permitir la producción de aceite pirolítico para una sustitución parcial o total de combustibles fósiles, utilizados, por ejemplo, en una caldera.

15

La invención propone, de este modo, un procedimiento de pirólisis rápida de partículas orgánicas de biomasa implementado en un reactor de pirólisis rápida de partículas orgánicas de biomasa con una inyección a contracorriente de gases calientes neutros que entran en contacto con las partículas que caen por gravedad.

20

Estado de la técnica anterior

La pirólisis es un procedimiento bien conocido en el que unos compuestos orgánicos están sometidos a unas temperaturas elevadas, que pueden, por ejemplo, ir de 300 °C a 1.000 °C, en un entorno pobre en oxígeno o desprovisto de oxígeno para evitar la oxidación y la combustión. En estas condiciones, la materia se deshidrata, luego, experimenta una termólisis, es decir, una descomposición térmica. De este modo, la pirólisis permite, generalmente, obtener tres tipos de compuestos, a saber, coque de pirólisis o coque pirolítico, también designado por la expresión "residuo carbonoso", aceite de pirólisis o aceite pirolítico y unos gases, en concreto, unos gases no condensables, que comprenden, por ejemplo, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno (H₂), metano (CH₄), entre otros.

25

30

Se pueden considerar dos enfoques para la pirólisis, a saber, la pirólisis lenta y pirólisis rápida y se pueden considerar tres gamas de temperatura, a saber, baja, alta o muy alta temperatura.

35

Para la pirólisis lenta a baja temperatura, la materia se calienta a una temperatura moderada, normalmente entre 400 y 500 °C, que requiere, de este modo, un tiempo de estancia mayor, generalmente entre 10 y 60 minutos, con el fin de maximizar el rendimiento de materia sólida. Estas condiciones favorecen la producción de coque pirolítico en detrimento de los vapores pirolíticos y, por lo tanto, del aceite pirolítico.

40

A la inversa, la pirólisis rápida se efectúa a alta temperatura, normalmente entre 500 y 600 °C, durante un tiempo de estancia comprendido entre 1 y 10 segundos y genera, principalmente, unos vapores pirolíticos, que permiten obtener aceite pirolítico en detrimento del coque pirolítico y unos gases no condensables. La pirólisis rápida a muy alta temperatura (superior a 800 °C) favorece la producción de gases no condensables.

45

De forma más particular, la pirólisis rápida de la madera ha sido objeto de numerosos trabajos desde hace varios años y ha permitido elaborar varios tipos de procedimientos industriales de pirólisis.

El principio de la pirólisis rápida de la madera se basa en la aplicación a la madera de un flujo de calor muy fuerte, normalmente superior a 10⁵ W.m⁻², para provocar un rápido calentamiento y la degradación de la madera. Cuando esta pirólisis tiene lugar alrededor de 500 °C, la degradación produce mayoritariamente unos vapores condensables pirolíticos, que forman el aceite pirolítico, que se enfrían lo más rápido posible, luego, se recogen, normalmente al cabo de algunos segundos, con el fin de evitar que reaccionen y produzcan unos gases. El aceite pirolítico obtenido se puede utilizar, a continuación, como combustible, ya que posee un valor calorífico del orden de 16 MJ/kg. Debido a sus propiedades específicas, en concreto, en términos de viscosidad, si se desea quemarlo, es necesario, entonces, prever el empleo de quemadores adaptados.

50

55

La gran mayoría de los procedimientos industriales de pirólisis rápida de la madera de la técnica anterior se basa en la utilización de lechos fluidizados burbujeantes o circulantes. De este modo, se pueden citar, por ejemplo, los lechos fluidizados producidos por la empresa canadiense Dynamotive Energy Systems, los lechos fluidizados de la empresa americana Ensyn, el cono rotatorio de la empresa holandesa BTG BioLiquids o también la pirólisis ablativa. Las siguientes revisiones detallan estos tipos de procedimientos, a saber: la revisión "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading", A.V Bridgewater, Biomass and bioenergy, 38 (2012), 68-94; y la revisión "A review of recent laboratory research and commercial developments in fast pyrolysis and upgrading", E. Butler y col., Renewable and sustainable Energy Reviews, 15 (2011), 4.171-4.186. Otros procedimientos conocidos se divulgan en los documentos de los Estados Unidos US 2.614.069 A y US 2008/197012 A1.

60

65

5 No obstante, los procedimientos industriales de tipo conocido de la técnica anterior son relativamente complejos de pilotar y necesitan personal cualificado. Por lo demás, para alcanzar una rentabilidad aceptable, hay que prever unas instalaciones de tamaño mediano o de gran tamaño, con una producción del orden de una a algunas decenas de toneladas por hora.

Por ello, existe una necesidad de proponer un reactor de pirólisis rápida que se basa en una tecnología simple, robusto y que sea de tamaño moderado para producir mayoritariamente aceite pirolítico a una escala local.

10 Se conoce la tecnología de los reactores de flujos arrastrados (por sus siglas en francés, RFE) para unas instalaciones de producción de biocarburante de segunda generación. Estos reactores están destinados a unas instalaciones de muy gran tamaño, con una producción comprendida entre 50 y 100 toneladas por hora, que funcionan a alta presión, normalmente de 3.000 a 8.000 kPa (30 a 80 bar) y a alta temperatura, alrededor de 1.500 °C. Estos reactores sirven para la gasificación de los compuestos orgánicos para maximizar la producción de gases.

15 Si se busca maximizar la producción de aceite pirolítico con este tipo de reactor de flujo arrastrado, hay que colocarse alrededor de 500 °C y trabajar alrededor de la presión atmosférica para tener un dispositivo de diseño simplificado.

20 Sin embargo, no existen más que muy pocas soluciones descritas en la técnica anterior para permitir la producción de aceite pirolítico con un reactor de flujo arrastrado. De este modo, se conocen, principalmente, dos instalaciones piloto de pirólisis rápida con la ayuda de un reactor de flujo arrastrado, a saber: la instalación diseñada por el Instituto de Investigación americano Georgia Tech (GTRI para "Georgia Tech Research Institute") y la instalación desarrollada por la empresa belga Egemin.

25 La instalación del GTRI, prevista para un caudal de biomasa de 50 kg/h, se describe en la patente de los Estados Unidos US 4.891.459 A y se encuentra mencionada, igualmente, en la publicación "The Georgia Tech entrained flow pyrolysis process - Pyrolysis and gasification", Kovac y O'Neil, Elsevier applied science (1989), 159-179. En esta instalación, las partículas se inyectan abajo del reactor y los productos obtenidos se recogen arriba del reactor. El calentamiento se realiza por medio de un quemador externo, alimentado por propano, que permite mezclar un gas muy caliente, alrededor de 927 °C, al flujo de partículas inyectadas.

30 La instalación de Egemin, prevista para un caudal de biomasa de 200 kg/h, se menciona, por ejemplo, en la publicación "The Egemin flash pyrolysis process: commissioning and initial results", Maniatis, K y col., Advance in thermochemical biomass conversion (1994), 1.257-1.264. En esta instalación, el calentamiento se realiza por un quemador interno, alimentado por propano, que permite calentar el gas hasta aproximadamente 700 °C, con una dilución con nitrógeno para evitar unas subidas de temperatura demasiado altas.

35 En las dos instalaciones descritas más arriba, el reactor pirolítico, previsto para funcionar entre 400 y 600 °C, no es isotérmico, lo que no permite tener un buen control de la reacción, de modo que los rendimientos obtenidos son escasos, esto es, entre un 40 y un 60 %. Por otro lado, la granulometría de las partículas utilizadas, hasta 1,5 y 2,5 mm, no les permite realizar una estancia lo suficientemente largo tiempo en el reactor como para permitirles calentarse hasta el núcleo, con el fin de que se conviertan enteramente. De esta forma, el tamaño de partículas no adaptado conduce a unos escasos rendimientos de aceite pirolítico.

Exposición de la invención

40 De este modo, existe una necesidad de proponer un nuevo procedimiento que implementa un tipo de reactor de pirólisis rápida de partículas orgánicas de biomasa, que permite optimizar la producción de aceite pirolítico asegurando una transferencia de calor óptima a las partículas de biomasa.

45 La invención tiene como finalidad remediar al menos parcialmente las necesidades mencionadas anteriormente y los inconvenientes relativos a las realizaciones de la técnica anterior.

50 La invención tiene como objetivo, según uno de sus aspectos, un procedimiento según la reivindicación 1.

55 De forma ventajosa, los gases de pirólisis generados que suben con el flujo gaseoso tienen un tiempo de estancia minimizado, lo que evita su evolución por craqueo térmico.

60 Gracias a la invención, puede ser posible obtener un nuevo tipo de procedimiento de pirólisis rápida de partículas orgánicas de biomasa que permite responder a las necesidades enunciadas anteriormente. En particular, el reactor es de diseño simplificado. Por lo demás, permite mejorar los intercambios térmicos por el funcionamiento a contracorriente y, de este modo, favorece la pirólisis rápida. El flujo a contracorriente permite, igualmente, arrastrar los gases desde el momento de su producción y, en concreto, los gases condensables, de modo que su tiempo de estancia se reduce. Esto permite evitar la evolución térmica de los vapores condensables hacia unos alquitranes

denominados "secundarios", menos privilegiados. Dicho de otra manera, es posible conservar mejor los vapores condensables denominados "primarios" con respecto a otras soluciones de la técnica anterior para las que el tiempo de estancia de los gases es más largo. Por otro lado, puede ser posible realizar una integración energética del reactor por un aprovechamiento de los gases no condensables. Es posible, igualmente, utilizar el residuo carbonoso para aprovecharlo en el procedimiento o como producto combustible solo o en mezcla con el aceite de pirólisis.

El procedimiento de pirólisis rápida según la invención puede incluir, además, una o varias de las siguientes características tomadas aisladamente o según cualesquiera combinaciones técnicas posibles.

Ventajosamente, el conducto de evacuación puede desembocar en la parte superior del recinto de reacción para permitir la evacuación de los productos procedentes de la reacción de pirólisis en el recinto de reacción, migrando estos productos hacia la parte superior del recinto de reacción.

De forma privilegiada, el diámetro de las partículas puede estar comprendido entre 200 μm y 800 μm .

El diámetro del inyector tubular puede ser inferior al diámetro del recinto de reacción.

Los medios de transporte de las partículas pueden ser de cualquier tipo y, por ejemplo, pueden incluir un sistema de tornillo sin fin, un sistema de cinta vibratoria, entre otros.

Por otro lado, la invención también tiene como objetivo, según otro de sus aspectos, este procedimiento que se implementa en una instalación de pirólisis rápida de partículas orgánicas de biomasa, caracterizada por que incluye:

- un reactor de pirólisis tal como se ha definido anteriormente,
- un quemador, aguas arriba del reactor, configurado para producir los gases calientes neutros que circulan en el conducto de inyección a contracorriente de gases calientes neutros,
- un separador, aguas abajo del reactor, configurado para permitir la separación del coque pirolítico y del flujo de gases condensables y no condensables,
- un condensador, aguas abajo del separador, configurado para permitir la separación del aceite pirolítico y del flujo de gases no condensables.

La instalación puede incluir, además, unos medios de inyección de una primera parte del flujo de gases no condensables procedente del condensador hacia el quemador después de recalentamiento por la combustión de esta primera parte del flujo de gases no condensables.

La instalación puede incluir, por lo demás, unos medios de inyección de una segunda parte del flujo de gases no condensables procedente del condensador hacia un intercambiador de calor del quemador para formar los gases calientes neutros que circulan en el conducto de inyección a contracorriente de gases calientes neutros, estando el calor producido a partir del quemador alimentado por la primera parte del flujo de gases no condensables.

La instalación puede incluir, igualmente, un primer intercambiador de calor colocado aguas arriba del condensador, para precalentar la segunda parte del flujo de gases no condensables procedentes del condensador.

El procedimiento puede implementarse por medio de una instalación de pirólisis rápida tal como se ha definido anteriormente y puede incluir la etapa que consiste en utilizar los gases no condensables procedentes del condensador para calentar los gases calientes neutros que circulan en el conducto de inyección a contracorriente de gases calientes neutros y/o para formar los gases calientes neutros que circulan en el conducto de inyección a contracorriente de gases calientes neutros.

El procedimiento puede incluir, además, la etapa de inyección de un gas de arrastre en el recinto de reacción del reactor para mejorar la inyección de partículas en el recinto de reacción.

El procedimiento también puede incluir la etapa de utilización del coque pirolítico como combustible para aportar calor, en concreto, al calentamiento del gas de arrastre.

El procedimiento puede incluir, igualmente, la etapa de adición de un intercambiador de calor entre el separador y el condensador para permitir la recuperación de calor.

El procedimiento puede incluir, además, la etapa de utilización del coque pirolítico en mezcla con el aceite pirolítico para producir un combustible.

El procedimiento de pirólisis rápida según la invención puede incluir una cualquiera de las características enunciadas en la descripción, tomadas aisladamente o según cualesquiera combinaciones técnicamente posibles con otras características.

Breve descripción de los dibujos

La invención se podrá comprender mejor a la lectura de la descripción detallada que va a seguir, de un ejemplo de implementación no limitativo de esta, así como al examen de las figuras, esquemáticas y parciales, del dibujo adjunto, en el que:

- 5
- la figura 1 representa un esquema que ilustra un ejemplo de reactor de pirólisis rápida de acuerdo con el procedimiento de la invención,
 - la figura 2 ilustra, en forma gráfica, la granulometría de las partículas utilizadas en el reactor de la figura 1, con una distribución que representa el porcentaje de partículas en función de su diámetro del tipo de la distribución

10

 - las figuras 3A, 3B y 3C ilustran respectivamente la trayectoria de las partículas de biomasa, la temperatura de los gases y la fracción molar de vapor de agua en el recinto de reacción del reactor de la figura 1, según una primera configuración,
 - la figura 4 representa la evolución de la fracción de masa de materia seca no pirolizada en las partículas del reactor de la figura 1, en función del tiempo, según una primera configuración,

15

 - las figuras 5A, 5B y 5C ilustran respectivamente la trayectoria de las partículas de biomasa, la temperatura de los gases y la fracción molar de vapor de agua en el recinto de reacción del reactor de la figura 1, según una segunda configuración,
 - la figura 6 representa la evolución de la fracción de masa de materia seca no pirolizada en las partículas del reactor de la figura 1, en función del tiempo, según una segunda configuración y

20

 - la figura 7 representa un esquema que ilustra un ejemplo de instalación de pirólisis rápida de acuerdo con el procedimiento de la invención, que incluye el reactor de pirólisis rápida de la figura 1.

En el conjunto de estas figuras, unas referencias idénticas pueden designar unos elementos idénticos o análogos.

25

Por lo demás, las diferentes partes representadas en las figuras no lo están necesariamente según una escala uniforme, para hacer las figuras más legibles.

Exposición detallada de un modo de realización particular

30

En toda la descripción, se observa que los términos superior e inferior deben considerarse con respecto a la dirección vertical, dirección en la que las partículas caen bajo el efecto de la gravedad terrestre. En particular, la parte superior del recinto de reacción está situada por encima de la parte inferior del recinto de reacción. Dicho de otra manera, la parte superior es la parte alta del recinto y la parte inferior es la parte baja del recinto. Por otro lado,

35

las expresiones aguas arriba y aguas abajo deben considerarse con respecto al sentido de transcurso normal del flujo considerado (de aguas arriba hacia aguas abajo), en particular, el flujo de gases y/o de partículas.

Con referencia a la figura 1, se ha representado esquemáticamente un ejemplo de realización de un reactor 1 de pirólisis rápida de partículas orgánicas 2 de biomasa de acuerdo con el procedimiento de la invención.

40

Las partículas orgánicas 2 de biomasa pueden ser de cualquier tipo, que están realizadas a base de materias orgánicas de origen vegetal, animal y/o fúngico. Pueden presentarse en forma de un polvo de partículas 2 de biomasa.

45

De este modo, el reactor 1 incluye, en primer lugar, un recinto tubular de reacción 3, en el que se produce la reacción de pirólisis de las partículas 2.

Este recinto de reacción 3 está formado por un cuerpo principal cilíndrico 3c en los extremos del que están situadas la parte superior 3a y la parte inferior 3b del recinto de reacción 3. Estas partes superior 3a e inferior 3b son de forma troncocónica. Sin embargo, la invención no se limita a este tipo de forma. Las partes superior 3a e inferior 3b podrían, como variante, ser de forma cilíndrica, en concreto, de mismo diámetro que el cuerpo principal cilíndrico 3c.

Por otro lado, el reactor 1 incluye un dispositivo de inyección 4 de las partículas 2 en la parte superior 3a del recinto de reacción 3.

55

Este dispositivo de inyección 4 incluye un depósito 4a o tolva 4a, de partículas 2, que incluye las partículas 2 destinadas a experimentar la reacción de pirólisis en el recinto de reacción 3. Este depósito 4a está situado exteriormente al recinto de reacción 3.

60

El dispositivo de inyección 4 incluye, además, un inyector tubular 4c de las partículas 2 en el recinto de reacción 3, que permite la inyección de un caudal estable y conocido de partículas 2.

Este inyector tubular 4c está situado en la parte superior 3a del recinto de reacción 3. Está presente en la parte alta, seguido por una forma cilíndrica en la parte baja al nivel de la que se efectúa la expulsión de las partículas 2. El diámetro D_i de la parte cilíndrica del inyector tubular 4c es ventajosamente inferior al diámetro D_r del cuerpo cilíndrico 3c del recinto de reacción 3. La boquilla de salida del inyector tubular 4c puede equiparse ventajosamente

con un deflector de las partículas que permite un reparto más amplio de las partículas en el reactor. Además, la altura útil del recinto de reacción 3 se define para permitir un tiempo de caída de las partículas 2 que sea suficiente para que estas puedan experimentar la reacción de pirólisis enteramente.

5 Por lo demás, el dispositivo de inyección 4 incluye unos medios de transporte 4b de las partículas 2 procedentes del depósito 4a hacia el inyector tubular 4c, externos al recinto de reacción 3. Estos medios de transporte 4b pueden ser de cualquier tipo. En el ejemplo representado, están formados por un tornillo sin fin. Como variante, también podrían estar formados por una cinta vibratoria, por ejemplo.

10 La inyección de las partículas 2 por mediación del dispositivo de inyección 4 en el recinto de reacción 3 permite formar, entonces, un flujo que cae por gravedad FG de partículas 2 en el recinto de reacción 4, para dejar que las partículas 2 atraviesen una parte de la altura del recinto de reacción 3 y antes de su parte inferior 3b.

15 Durante la inyección de las partículas 2 en el inyector tubular 4c, unos medios de inyección N de un gas de arrastre, por ejemplo, nitrógeno, se colocan en el inyector tubular 4c del dispositivo de inyección 4, con el fin de mejorar y de ayudar a la inyección de las partículas 2 en el recinto de reacción 3. La inyección de un gas neutro de arrastre de este tipo sirve, igualmente, de inertización de la distribución de partículas 2 hacia el recinto de reacción 3 y, de este modo, permite evitar el retorno de gases de pirólisis hacia el dispositivo de inyección 4.

20 Además, el reactor 1 incluye, igualmente, un conducto de evacuación 5 que desemboca en la parte superior 3a del recinto de reacción 3 para permitir la evacuación de los productos procedentes de la reacción de pirólisis en el recinto de reacción 3, estando estos productos arrastrados hacia la parte superior 3a del recinto de reacción 3 y que comprenden unos gases, que forman un flujo de gases condensables y no condensables FR y unas partículas pirolizadas 2', destinados a formar respectivamente aceite pirolítico, unos gases no condensables y coque pirolítico, también llamado "residuo carbonoso".

25 Por otro lado, con el fin de realizar una reacción de pirólisis rápida de flujo arrastrado en contracorriente, el reactor 1 también incluye un conducto de inyección a contracorriente 6 de gases calientes neutros en la parte inferior 3b del recinto de reacción 3.

30 Este conducto de inyección a contracorriente 6 permite formar un flujo a contracorriente FC de gases calientes neutros que entran en contacto con el flujo que cae por gravedad FG de partículas 2, para generar la reacción de pirólisis rápida de las partículas 2.

35 La temperatura de estos gases calientes neutros que forman el flujo a contracorriente FC está preferentemente comprendida entre 500 y 600 °C, mientras que el diámetro de las partículas 2 contenidas en el flujo que cae por gravedad FG de partículas 2 está comprendido preferentemente entre 200 µm y 1 mm, ventajosamente entre 200 µm y 800 µm.

40 El caudal de gases calientes que forman el flujo a contracorriente FC y el diámetro Dr del cuerpo principal 3c del recinto de reacción 3 se calculan de modo que la velocidad de los gases calientes sea suficiente para arrastrar las partículas pirolizadas 2' hacia la parte superior 3a del recinto de reacción 3.

45 Dentro del recinto de reacción 3, la reacción de pirólisis se lleva a cabo de la manera descrita a continuación. Cuando las partículas 2 del flujo que cae por gravedad FG se encuentran con los gases calientes del flujo a contracorriente FC, estas partículas 2 se calientan y pierden su agua residual. Cuando las partículas 2 alcanzan una temperatura de aproximadamente 300 °C, la reacción de pirólisis comienza a realizarse. Las partículas 2 continúan, entonces, recalentándose hasta estar en equilibrio con la temperatura de los gases calientes, que, ellos, se enfrían. Desde el momento del inicio de la reacción de pirólisis, las partículas 2 liberan unos gases condensables y no condensables que forman el flujo de gases FR. Las partículas 2 pierden, de este modo, una gran parte de su volumen y de su masa, en concreto, del orden de un 85 % a la temperatura de aproximadamente 500 °C a 550 °C, estando un 70 % de la masa convertida en gases condensables destinados a formar aceite de pirólisis y un 15 % en gases no condensables. La densidad de las partículas 2 se vuelve, entonces, escasa y a partir de un cierto caudal de gases calientes, las partículas, entonces, pirolizadas 2' están arrastradas hacia arriba del reactor 1 en su parte superior 3a con el flujo de gases condensables y no condensables FR para ser evacuadas a través del conducto de evacuación 5.

60 A título de ejemplo, con un recinto de reacción 3 que comprende un cuerpo principal 3c de diámetro Dr igual a aproximadamente 20 cm y de altura Al igual a aproximadamente 3,6 m, un caudal de partículas 2 de biomasa igual a aproximadamente 10 kg/h y un caudal de gases calientes en el flujo a contracorriente FC del orden de 80 Nm³/h, se obtiene una velocidad de los gases calientes del orden de 2 m/s, lo que permite que casi un 95 % de las partículas 2, de diámetro comprendido entre 0,1 y 1 mm, experimente la reacción de pirólisis.

65 Con el fin de evaluar el funcionamiento del reactor de pirólisis rápida 1 según la invención, se han realizado diferentes simulaciones con el software Fluent de simulación de mecánica de los fluidos.

De este modo, se ha considerado un caudal de partículas 2 de biomasa del orden de 10 kg/h, siendo estas partículas 2 unas partículas de madera con una tasa de humedad de un 7 % y presentando una granulometría del tipo de la distribución de Rosin-Rammler en relación con el diámetro D_p de las partículas 2, representada en la figura 2. Estas partículas 2 presentan, de este modo, un diámetro medio del orden de 0,500 mm, un diámetro mínimo del orden de 0,350 mm y un diámetro máximo del orden de 1 mm.

Por otro lado, se ha considerado que el recinto de reacción 3 incluye un cuerpo principal 3c de diámetro D_r del orden de 20 cm, siendo sus paredes adiabáticas. El inyector tubular 4c presenta, por su parte, un diámetro D_i del orden de 5 cm.

Las partículas 2 de biomasa se inyectan, por lo demás, con la ayuda de un gas de arrastre en forma de nitrógeno a una velocidad del orden de 0,1 m/s y a una temperatura de aproximadamente 27 °C. El flujo a contracorriente FC incluye, por su parte, nitrógeno inyectado a aproximadamente 550 °C.

Se han simulado y optimizado dos configuraciones en función de la altura A_I del cuerpo principal 3c del recinto de reacción 3 y de la velocidad de inyección del flujo a contracorriente FC.

Primera configuración

En la primera configuración, la altura A_I del cuerpo principal 3c del recinto de reacción 3 es de 3,6 m, mientras que la velocidad de inyección del flujo a contracorriente FC es de 1 m/s.

Con el fin de cuantificar la prestación del reactor 1, se definen dos indicadores:

- la tasa de pirólisis τ_p que corresponde a la relación entre el caudal de masa de los productos de pirólisis obtenidos y el caudal de masa de las partículas de biomasa secas inyectadas, esto es:

$$\tau_p = [\text{caudal de masa de los productos de pirólisis obtenidos} / \text{caudal de masa de las partículas de biomasa inyectadas}],$$

- el rendimiento r_g de alquitranes no craqueados que corresponde a la relación entre el caudal de alquitranes no craqueados obtenido y el caudal de alquitranes obtenido idealmente con una pirólisis completa y en ausencia de craqueo, esto es:

$$r_g = [\text{caudal de alquitranes no craqueados obtenido} / \text{caudal de alquitranes obtenido idealmente con pirólisis completa y ausencia de craqueo}].$$

De este modo, en esta primera configuración con inyección del flujo a contracorriente FC a 1 m/s y altura A_I del cuerpo principal 3c del recinto de reacción 3 a 3,6 m, la pirólisis de las partículas 2 de biomasa se realiza con una tasa τ_p igual a un 99 %, mientras que el rendimiento de alquitranes no craqueados r_g es de un 98 %.

De este modo, la pirólisis está prácticamente completa y el rendimiento de alquitranes no craqueados está muy cercano al máximo, siendo la cinética de craqueo lenta. Esto significa, entonces, que los alquitranes primarios salen del reactor 1 sin experimentar una evolución y, por lo tanto, pueden recuperarse, a saber, condensados, en forma de aceite pirolítico.

Las figuras 3A, 3B y 3C ilustran respectivamente la trayectoria de las partículas de biomasa, la temperatura de los gases expresada en Kelvin (K) y la fracción molar de vapor de agua en el recinto de reacción 3 del reactor 1. Por lo demás, la figura 4 representa la evolución de la fracción de masa F_m de materia seca no pirolizada en las partículas 2 en función del tiempo t , expresado en segundos.

Se constata, de este modo, que las partículas 2, después de secado y pirólisis, se evacuan por arriba del recinto de reacción 3 en el estado de residuo carbonoso prácticamente en su totalidad. Solo las partículas 2 más grandes no suben y permanecen abajo del recinto 3 con una pirólisis menos completa. De este modo, un 93 % de la masa saliente de partículas se evacua por arriba, estando las 7 % restantes recogidas abajo. Por lo demás, la zona fría del recinto de reacción 3 está situada arriba de este. Además, el vapor de agua sube inmediatamente después de haberse producido por las partículas 2.

Por otro lado, la altura A_I de 3,60 m se ha optimizado para una velocidad de inyección del flujo a contracorriente FC de 1 m/s. Esto significa que una altura mayor no permitiría mejorar el rendimiento del reactor 1. A la inversa, una altura más escasa haría disminuir este mismo rendimiento.

Segunda configuración

En la segunda configuración, la altura A_I del cuerpo principal 3c del recinto de reacción 3 es de 3 m, mientras que la velocidad de inyección del flujo a contracorriente FC es de 1,5 m/s.

Las figuras 5A, 5B y 5C ilustran respectivamente la trayectoria de las partículas de biomasa, la temperatura de los gases expresada en Kelvin (K) y la fracción molar de vapor de agua en el recinto de reacción 3 del reactor 1. Por lo demás, la figura 6 representa la evolución de la fracción de masa F_m de materia seca no pirolizada en las partículas 2 en función del tiempo t , expresado en segundos.

De este modo, se ha podido constatar que aumentar la velocidad de inyección del flujo a contracorriente FC a 1,5 m/s presenta dos ventajas: con una velocidad de inyección de 1,5 m/s, todas las partículas 2 vuelven a salir por arriba del recinto de reacción 3, con la excepción de una ínfima parte; por otro lado, la altura del recinto de reacción optimizada 3 se lleva a 3 m. Como contrapartida, la prestación del reactor 1 es peor, puesto que la tasa de pirólisis τ_p es de un 88 % y que el rendimiento r_g de alquitranes no craqueados es de un 87 %.

En este momento, se va a describir con referencia a la figura 7 una instalación 10 de pirólisis rápida de partículas orgánicas 2 de biomasa que comprende un reactor 1 de pirólisis rápida tal como el descrito anteriormente con referencia a la figura 1.

Como se puede ver esto en esta figura 7, la instalación 10 incluye, además del reactor 1, un quemador 11 que comprende un intercambiador de calor I, colocado aguas arriba del reactor 1 y configurado para producir los gases calientes que forman el flujo a contracorriente FC que circula en el conducto de inyección a contracorriente 6 de gases calientes.

Por lo demás, la instalación 10 incluye un separador 12 (o ciclón), que forma un dispositivo de filtración, colocado aguas abajo del reactor 1 y configurado para permitir la separación de coque pirolítico C o residuo carbonoso C, por filtración a una temperatura superior a 250 °C y de un flujo de gases condensables y no condensables FR' a partir de los productos procedentes de la reacción de pirólisis del recinto de reacción 3, que comprende un flujo de gases condensables y no condensables FR a la temperatura TR del orden de 400 °C y unas partículas pirolizadas 2'.

Además, la instalación 10 incluye, igualmente, un condensador 14, colocado aguas abajo del separador 12 y configurado para permitir la producción de aceite pirolítico Ac y de un flujo de gases no condensables FR" a partir del flujo de gases condensables y no condensables FR' procedente del separador 12. En este condensador 14, la temperatura es preferentemente lo más baja posible, en concreto, del orden de 0 °C para un procedimiento industrial.

De forma ventajosa, la instalación prevé una integración energética del flujo de gases no condensables FR" con la formación de un circuito cerrado para hacer el procedimiento de pirólisis rápida con más prestación.

En particular, la instalación 10 incluye unos medios de inyección en forma de un primer circulador Ci_1 para permitir inyectar una primera parte FR''_1 del flujo de gases no condensables FR" procedente del condensador 14 hacia el quemador 11 después de recalentamiento de esta primera parte FR''_1 por combustión de estos gases no condensables en mezcla con un flujo de aire A. El metano M se utiliza, por su parte, preferentemente para el precalentamiento durante las fases de arranque o como complemento para mantener la temperatura. Hay que observar que también se puede utilizar un solo circulador para las dos líneas FR''_1 y FR''_2 , con una válvula de ajuste sobre cada línea para ajustar los caudales respectivos.

Por lo demás, la instalación 10 incluye unos medios de inyección en forma de un segundo circulador Ci_2 para permitir inyectar una segunda parte FR''_2 del flujo de gases no condensables FR" procedente del condensador 14 hacia el intercambiador de calor I del quemador 11 para formar el flujo a contracorriente FC de gases calientes que circulan en el conducto de inyección a contracorriente 6 de gases calientes.

Más particularmente, el quemador 11, más precisamente la cámara en la que se coloca el quemador 11, incluye un intercambiador de calor I en el que circula la segunda parte FR''_2 del flujo de gases no condensables FR", estando esta recalentada por la primera parte FR''_1 del flujo de gases no condensables FR", ella misma calentada por su combustión con el flujo de aire A y de metano M. Después de paso por el quemador 11, esta primera parte del flujo de gases no condensables FR''_1 se evacua en forma de humos por la salida EF del quemador 11 después de haber cedido su calor al flujo de gases no condensables FR''_2 por mediación del intercambiador de calor I.

La utilización de los gases no condensables FR" al nivel del quemador 11 es ventajosa en la medida en que los cálculos muestran que la energía contenida en estos gases no condensables es del orden de 8 MJ/Nm³, lo que es suficiente para aportar el calor necesario al reactor 1. No obstante, para disponer de un cierto margen de potencia, es posible, igualmente, aportar un complemento de gas externo al quemador, en concreto, de gas natural o de otro tipo de gas combustible.

Por supuesto, la invención no se limita al ejemplo de realización que se acaba de describir. El experto en la materia puede aportar a ella diversas modificaciones, según las reivindicaciones.

En particular, puede ser posible recuperar el residuo carbonoso C que proviene del separador 12 y quemarlo, por

ES 2 797 102 T3

ejemplo, por mediación del flujo de aire A y de metano M, para inyectarlo, igualmente, en el quemador 11 y aportar calor adicional al reactor 1.

5 Por lo demás, también puede ser posible colocar un intercambiador de calor al nivel del temple, es decir, entre el separador 12 y el condensador 14, para recuperar calor y utilizarlo para precalentar el flujo a contracorriente FC de gases calientes antes de su entrada en el recinto de reacción 3.

10 Además, el residuo carbonoso C y el aceite de pirólisis Ac obtenidos se pueden mezclar, con el fin de formar una mezcla, designada por el término "slurry" ("pasta") en inglés, que presenta un mejor poder calorífico en términos de combustión que el aceite de pirólisis solo.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de pirólisis rápida de partículas orgánicas (2) de biomasa, **caracterizado por que** se implementa por medio de un reactor (1) de pirólisis rápida de flujo arrastrado de partículas orgánicas (2) de biomasa, que incluye:

- un recinto tubular de reacción (3), en el que se produce la reacción de pirólisis de las partículas (2), que comprende una parte superior (3a) y una parte inferior (3b), opuesta a la parte superior (3a),
- un dispositivo de inyección (4) de las partículas (2) en la parte superior (3a) del recinto de reacción (3), que permite formar un flujo que cae por gravedad (FG) de partículas (2) en el recinto de reacción (4),
- un conducto de evacuación (5) de los productos procedentes de la reacción de pirólisis presentes en el recinto de reacción (3), que comprende unos gases y unas partículas pirolizadas (2'), destinados, en concreto, a formar aceite pirolítico, coque pirolítico y unos gases no condensables,
- un conducto de inyección a contracorriente (6) de gases calientes neutros en la parte inferior (3b) del recinto de reacción (3), que permite formar un flujo a contracorriente (FC) de gases calientes neutros que entran en contacto con el flujo de partículas (2) que cae por gravedad (FG), para generar la reacción de pirólisis rápida de las partículas (2), incluyendo el procedimiento la etapa de inyección a contracorriente de gases calientes neutros en el recinto de reacción (3) del reactor (1) con respecto a la inyección de las partículas (2), que caen por gravedad, destinadas a experimentar la reacción de pirólisis rápida, estando la temperatura de los gases calientes neutros comprendida entre 500 y 600 °C y estando el diámetro de las partículas (2) comprendido entre 200 µm y 1 mm,

incluyendo el dispositivo de inyección (4) de las partículas (2) un depósito (4a) de partículas (2), que contiene las partículas (2) y que está dispuesto exteriormente al recinto de reacción (3), un inyector tubular (4c) de las partículas (2), situado en la parte superior (3a) del recinto de reacción (3), y unos medios de transporte (4b) de las partículas (2) procedentes del depósito (4a) hacia el inyector tubular (4c),
incluyendo el reactor unos medios de inyección (N) de un gas de arrastre en la parte superior (3a) del recinto de reacción (3), en el inyector tubular (4c) del dispositivo de inyección (4), e incluyendo el procedimiento la etapa de inyección de dicho gas de arrastre en el recinto de reacción (3) del reactor (1) para mejorar la inyección de partículas (2) en el recinto de reacción (3).

2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado por que** el conducto de evacuación (5) desemboca en la parte superior (3a) del recinto de reacción (3) para permitir la evacuación de los productos procedentes de la reacción de pirólisis en el recinto de reacción (3), migrando estos productos hacia la parte superior (3a) del recinto de reacción (3).

3. Procedimiento según las reivindicaciones 1 o 2, **caracterizado por que** el diámetro de las partículas (2) está comprendido entre 200 µm y 800 µm.

4. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** el diámetro (Di) del inyector tubular (4c) es inferior al diámetro (Dr) del recinto de reacción (3).

5. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** los medios de transporte (4b) de las partículas (2) incluyen un sistema de tornillo sin fin o un sistema de cinta vibratoria.

6. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** se implementa por medio de una instalación (10) de pirólisis rápida de partículas orgánicas (2) de biomasa, que incluye:

- el reactor (1) de pirólisis rápida,
- un quemador (11), aguas arriba del reactor (1), configurado para producir los gases calientes neutros que circulan en el conducto de inyección a contracorriente (6) de gases calientes neutros,
- un separador (12), aguas abajo del reactor (1), configurado para permitir la separación del coque pirolítico (C) y del flujo de gases condensables y no condensables (FR'),
- un condensador (14), aguas abajo del separador (12), configurado para permitir la separación del aceite pirolítico (Ac) y del flujo de gases no condensables (FR").

7. Procedimiento según la reivindicación 6, **caracterizado por que** la instalación incluye unos medios de inyección (Ci₁) de una primera parte (FR"₁) del flujo de gases no condensables (FR") procedente del condensador (14) hacia el quemador (11) después de recalentamiento por la combustión de esta primera parte (FR"₁) del flujo de gases no condensables (FR").

8. Procedimiento según las reivindicaciones 6 o 7, **caracterizado por que** la instalación incluye unos medios de inyección (Ci₂) de una segunda parte (FR"₂) del flujo de gases no condensables (FR") procedente del condensador (14) hacia un intercambiador de calor (I) del quemador (11) para formar los gases calientes neutros que circulan en el conducto de inyección a contracorriente (6) de gases calientes neutros, estando el calor producido a partir del quemador (11) alimentado por la primera parte (FR"₁) del flujo de gases no condensables (FR").

9. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 6 a 8, **caracterizado por que** incluye la etapa que consiste en utilizar los gases no condensables procedentes del condensador (14) para calentar los gases calientes neutros que circulan en el conducto de inyección a contracorriente (6) de gases calientes neutros y/o para formar los gases calientes neutros que circulan en el conducto de inyección a contracorriente (6) de gases calientes neutros.
- 5
10. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que incluye la etapa de utilización del coque pirolítico (C) como combustible para aportar calor, en concreto, al calentamiento del gas de arrastre (N).
- 10
11. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que incluye la etapa de añadidura de un intercambiador de calor entre el separador (12) y el condensador (14) para permitir la recuperación de calor.
12. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que incluye la etapa de utilización del coque pirolítico (C) en mezcla con el aceite pirolítico (Ac) para producir un combustible.

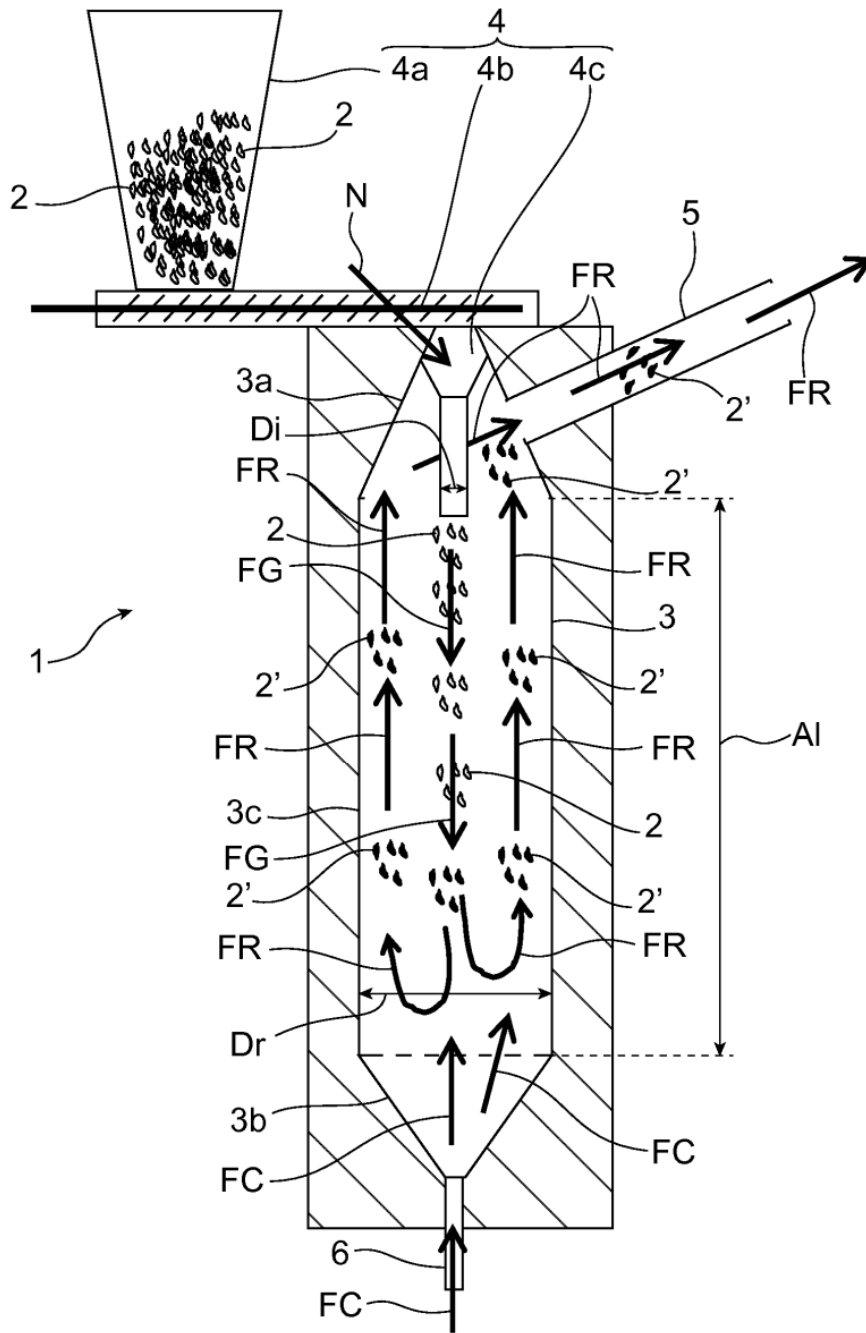


FIG. 1

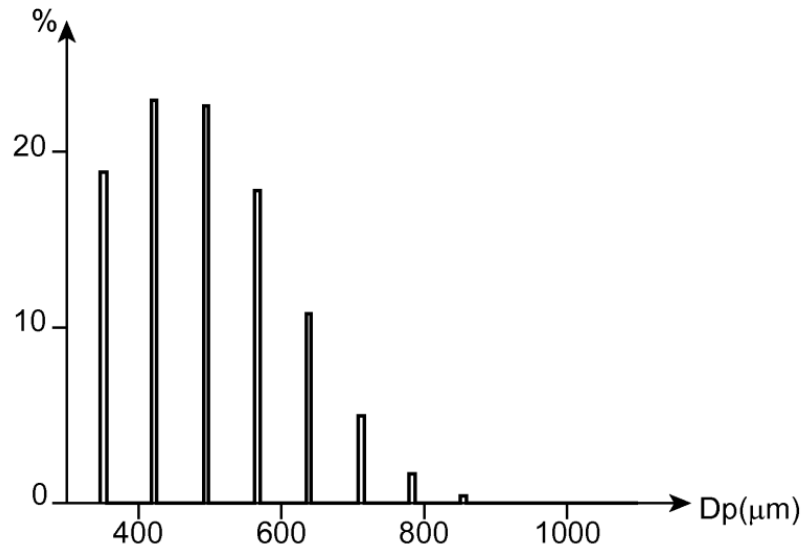


FIG. 2

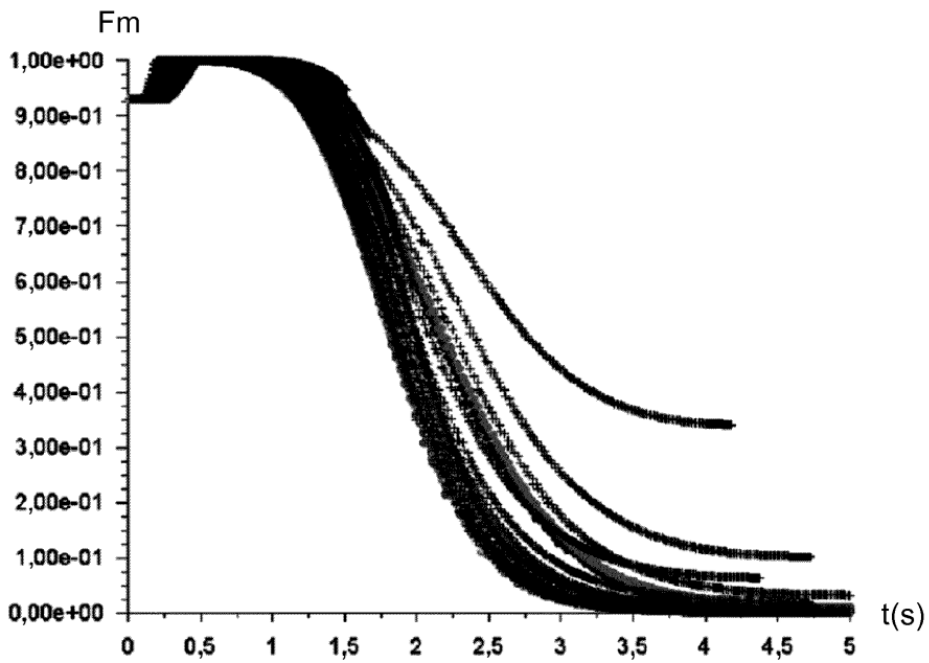
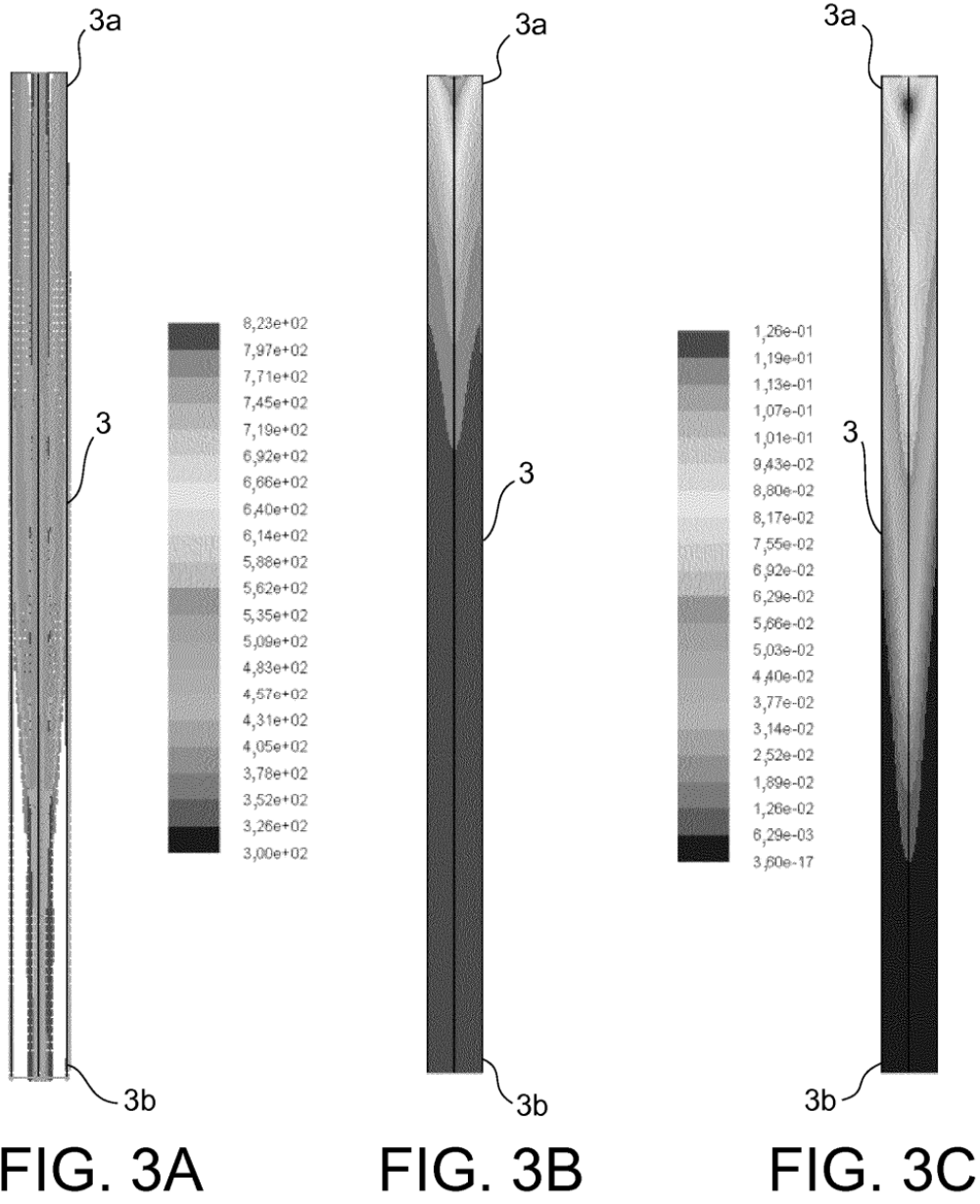


FIG. 4



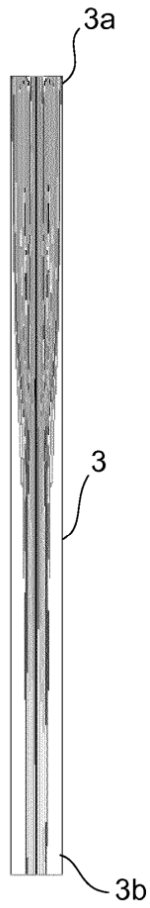


FIG. 5A

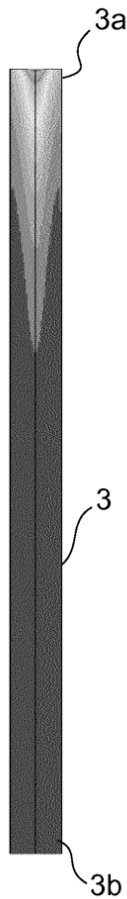
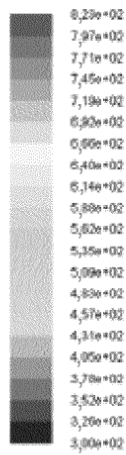


FIG. 5B

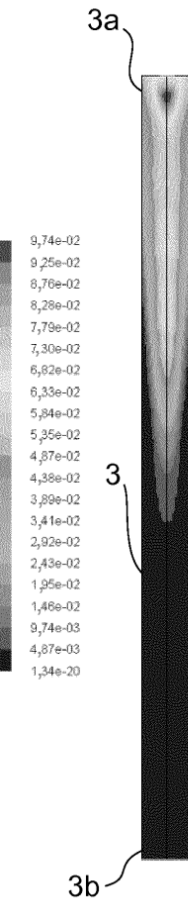
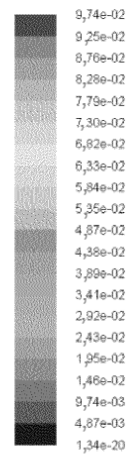


FIG. 5C

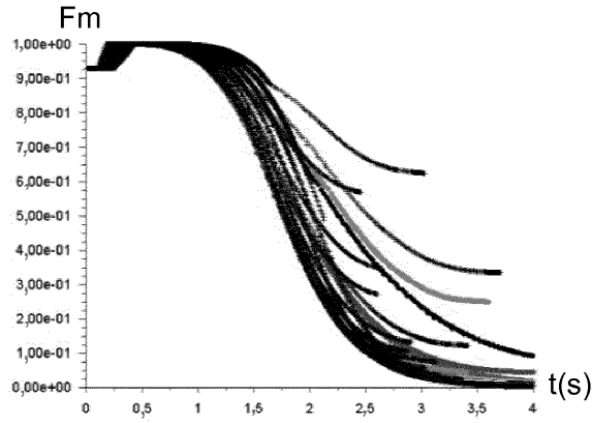


FIG. 6

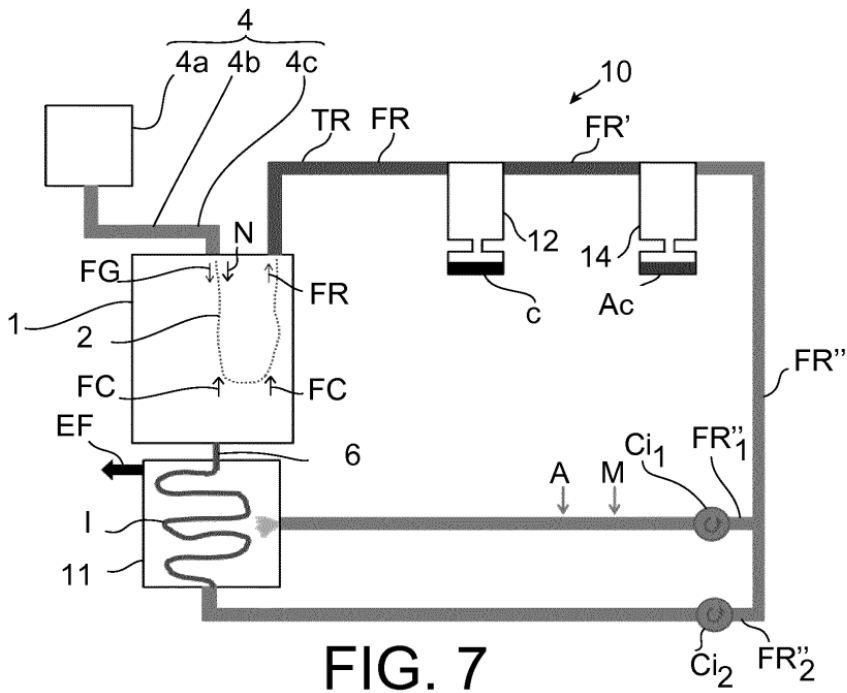


FIG. 7