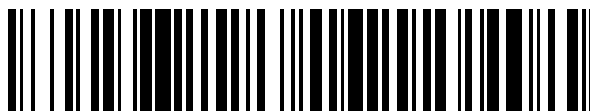


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 775 176**

51 Int. Cl.:

C10G 9/32 (2006.01)
C10B 49/22 (2006.01)
C10K 1/02 (2006.01)
C10K 3/02 (2006.01)
C10B 53/02 (2006.01)
C10G 3/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **13.04.2016 PCT/FI2016/050238**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.10.2016 WO16166413**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.04.2016 E 16722260 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.01.2020 EP 3283603**

54 Título: **Mejoramiento catalítico de vapores pirolíticos**

30 Prioridad:

17.04.2015 FI 20155290

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

24.07.2020

73 Titular/es:

**VALMET TECHNOLOGIES OY (50.0%)
Keilasatama 5
02150 Espoo, FI y
FORTUM OYJ (50.0%)**

72 Inventor/es:

**HEISKANEN, JUKKA;
KÄRKI, SARA;
VÄLIMÄKI, ERKKI;
SHENASSA, REYHANEH;
MÄNTYNIEMI, JUSSI;
JOKELA, PEKKA;
GUTIERREZ, ANDREA;
AUTIO, JOAKIM y
ASIKKALA, JANNE**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 775 176 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

Mejoramiento catalítico de vapores pirolíticos

Campo de la invención

5 La invención se refiere a un método para producir vapor pirolítico tratado catalíticamente, al vapor pirolítico obtenido de la pirólisis de materiales pirolizables, tales como biomasa y/o material derivado de residuos. La invención se refiere a un sistema para realizar el método. La invención se refiere a un método para producir producto pirolítico de alta calidad, siendo el producto pirolítico ampliamente aplicable, por ejemplo como sustituto de combustibles fósiles y/o como alimentación para la producción bioquímica.

Antecedentes de la invención

10 La pirólisis es un proceso en el que un material que comprende carbono se calienta en un reactor de pirólisis a una temperatura elevada y en ausencia de oxígeno libre (O₂) para formar vapores pirolíticos crudos. Como producto secundario se produce carbón. La temperatura elevada generalmente oscila entre 400 °C y 700 °C. Los vapores pirolíticos comprenden típicamente vapores condensables, que pueden condensarse para obtener aceite pirolítico. Tal aceite pirolítico tiene típicamente una alta acidez y una alta viscosidad, y es relativamente inestable, siendo estas propiedades el resultado de, por ejemplo, la unión de oxígeno a los componentes.

15 Típicamente, la pirólisis tiene lugar calentando un reactor de pirólisis, por lo que la biomasa dispuesta dentro del reactor se pirolizará. Calentar el reactor de pirólisis junto con la biomasa pirolizable requiere mucha energía. Por lo tanto, se necesita una fuente de energía eficiente.

20 Debido a las propiedades antes mencionadas, el aceite de pirólisis convencional se puede utilizar principalmente para producir energía, es decir, como combustible en cámaras de combustión. Por razones medioambientales, existe la tendencia a utilizar materiales renovables para sustituir algunos materiales fósiles en diversas aplicaciones, incluida la industria petrolera. La sustitución de algunos productos de petróleo fósil por bioaceite renovable requiere que el bioaceite tenga una alta calidad en términos de acidez (que debería ser baja), estabilidad (que debería ser mejor) y viscosidad (que debería ser adecuada para su uso, generalmente relativamente pequeña). Por lo tanto, la calidad de los productos pirolíticos debe ser alta. La calidad está relacionada, por ejemplo, con el contenido de oxígeno (como se definirá posteriormente) de los vapores pirolíticos.

25 La calidad de algunos productos pirolíticos puede mejorarse mediante hidrot ratamiento, es decir, un tratamiento catalítico a alta temperatura, a alta presión y con la presencia de una cantidad razonable de hidrógeno. Sin embargo, los recipientes que soportan tanto altas temperaturas como altas presiones son caros. Además, el hidrógeno es caro. De esta manera, un tratamiento catalítico conocido impone costos de inversión y uso tan altos que pueden no ser factibles desde el punto de vista de la producción comercial de combustibles a partir de productos pirolíticos.

30 La pirólisis catalítica y el hidrot ratamiento del aceite de pirólisis rápida mejoran la calidad del aceite de pirólisis. El problema con tales técnicas está relacionado con la eficiencia del proceso, donde se forman cantidades significativas de subproductos debido a la desoxigenación del aceite de pirólisis. La pirólisis catalítica también adolece de ineficiencia mientras el catalizador esté expuesto generalmente a las impurezas de, por ejemplo, biomasa que provoquen una desactivación irreversible y, por lo tanto, un alto consumo de material catalítico.

35 Por lo tanto, la mala calidad de los vapores pirolíticos y el uso ineficiente de materias primas y productos secundarios es un problema con los sistemas de pirólisis conocidos. Además, algunos métodos hacia una solución son demasiado ineficientes para su uso práctico.

40 El documento US 2013/0030064 divulga un sistema configurado para la producción de al menos un producto seleccionado del grupo que consiste en gas de síntesis, productos de síntesis Fischer-Tropsch, energía y productos químicos. Comprende un aparato de gasificación en lecho fluidizado dual. El documento US 2013/0017460 divulga un sistema y un método para producir hidrocarburos a partir de biomasa. Ciertas realizaciones del método convierten una materia prima de biomasa en un producto de hidrocarburo por hidrólisis. La conversión catalítica del gas de pirólisis resultante en el producto de hidrocarburo y dióxido de carbono ocurre en presencia de hidrógeno y vapor de agua sobre un sorbente de CO₂ con generación simultánea del hidrógeno requerido por reacción con vapor de agua.

Compendio de la invención

50 Un objetivo de la invención es mejorar, de manera rentable, la eficiencia del proceso o sistema de pirólisis capaz de producir productos pirolíticos de alta calidad; eficiencia en relación con la cantidad de materias primas utilizadas y los flujos de calor producidos y utilizados. En la presente memoria, las materias primas incluyen el material pirolizable y los materiales necesarios para calentar los materiales en la pirólisis y los flujos de calor producidos incluyen los flujos de calor de la pirólisis y otras partes del proceso.

Además, otro objetivo de la invención es mejorar el proceso con respecto a la vida útil del catalizador utilizado en el proceso, aumentando así la disponibilidad y la eficiencia, así como disminuyendo la necesidad de reemplazo del catalizador y, por lo tanto, disminuyendo el consumo de catalizador.

5 Para mejorar la calidad del producto pirolítico, se ha descubierto que los vapores pirolíticos pueden tratarse catalíticamente. También se ha observado que la desactivación de los catalizadores se reduce cuando los vapores se tratan catalíticamente, en comparación con, por ejemplo, tratar la biomasa catalíticamente en un reactor de pirólisis.

Para utilizar eficientemente los productos secundarios del tratamiento catalítico, se ha descubierto que los productos secundarios pueden quemarse eficientemente y/o su calor puede recuperarse en una caldera dispuesta en conexión con otras partes del sistema, tales como el reactor catalítico, un regenerador de catalizador o un condensador.

10 En particular, se ha descubierto que una caldera integrada de lecho fluidizado sirve bien para este propósito. Una caldera de lecho fluidizado no solo se puede utilizar para recuperar eficientemente el calor de los productos secundarios, sino que también una fuente integrada de calor de lecho fluidizado es una forma eficiente de calentar el material pirolizable, tal como la biomasa. Aún más, algunos catalizadores funcionan eficientemente también sin hidrógeno externo, y a baja presión, por lo que pueden usarse de manera rentable.

15 Mediante el uso de una caldera de lecho fluidizado como fuente de calor, el calor y/o el calor de reacción (es decir, la energía química) de los productos secundarios mencionados anteriormente se pueden usar tanto para la pirólisis como para otros fines, tales como producción de electricidad y/o calefacción urbana. La necesidad de cada uno de estos productos (es decir, producto pirolítico, calor, electricidad) puede depender de varias cosas, tales como la temperatura y/o la estación. De esta manera, mediante las realizaciones de la invención también se logra el uso eficiente de materias primas de acuerdo con estas necesidades.

20 La invención está caracterizada principalmente por la reivindicación independiente 1. En las reivindicaciones dependientes 2 a 11 y la descripción se divulgan realizaciones beneficiosas.

Descripción de los dibujos

25 La Figura 1 muestra un sistema configurado para producir un producto de vapor pirolítico tratado catalíticamente a partir de material pirolizable, teniendo el sistema una caldera de lecho fluidizado burbujeante y un lecho fluidizado de catalizador,

la Figura 2 muestra un sistema configurado para producir un producto de vapor pirolítico tratado a partir de material pirolizable, teniendo el sistema una caldera de lecho fluidizado circulante y un lecho fluidizado de catalizador,

30 la Figura 3 muestra un sistema configurado para producir un producto de vapor pirolítico tratado a partir de material pirolizable, teniendo el sistema una caldera de lecho fluidizado burbujeante integrada con un quemador de carbón y un lecho fijo de catalizador,

35 la Figura 4 muestra un sistema configurado para producir un producto de vapor pirolítico tratado a partir de material pirolizable, teniendo el sistema una caldera de lecho fluidizado burbujeante con componentes de producción de electricidad y un lecho fijo de catalizador,

la Figura 5 muestra un sistema configurado para producir un producto de vapor pirolítico tratado a partir de material pirolizable, teniendo el sistema una caldera de lecho fluidizado burbujeante con componentes de recuperación de calor y dos lechos fijos de catalizador,

40 la Figura 6 muestra un sistema similar al de la Figura 4 y medios para el tratamiento posterior de los vapores pirolíticos tratados catalíticamente,

la Figura 7 muestra la parte de pirólisis del sistema de la Figura 1 y medios para condensar y secar el vapor pirolítico tratado catalíticamente,

la Figura 8 muestra la parte de pirólisis del sistema de la Figura 1 y medios para el postratamiento de los vapores pirolíticos tratados catalíticamente; y

45 la Figura 9 muestra un sistema configurado para producir un producto de vapor pirolítico tratado a partir de material pirolizable, teniendo el sistema un reactor de catalizador de tipo descendente y un regenerador de tipo ascendente.

Descripción detallada de las realizaciones

50 Las Figuras 1-8 muestran realizaciones de un sistema de pirólisis, es decir, un sistema adecuado para producir y configurado para producir un producto de vapor de pirólisis tratado a partir de material pirolizable de una manera eficiente en el uso de los recursos. El vapor puede mejorarse o someterse a un postratamiento, como se detallará a continuación. Como se muestra en las figuras, dicho sistema comprende una caldera 100 de lecho fluidizado, un

reactor 200 de pirólisis y un reactor catalítico 400 dispuesto para tratar catalíticamente, en un lecho 410 de catalizador, vapores pirolíticos producidos en el reactor 200 de pirólisis.

En el proceso, tanto la energía como las materias primas de pirólisis se utilizan de manera eficiente en el uso de los recursos. Así, en el proceso

- 5 – al menos algunos de los productos secundarios formados son retroalimentados al proceso y/o
- al menos algunos de los diferentes calores formados se utilizan en el proceso; opcionalmente para producir electricidad y/o calor utilizable para la producción de calor urbano, para el secado o para otros procesos industriales.

10 Las Figuras 1-8 muestran un lecho fluidizado de catalizador (Figuras 1, 2, 7 y 8), un lecho estacionario de catalizador (Figuras 3, 4 y 6) o dos lechos estacionarios de catalizador (Figura 5). Estos solo se muestran como ejemplos, y se puede usar cualquier tipo de lecho de catalizador en relación con cualquier realización.

15 Las Figuras 1-8 muestran una caldera de lecho fluidizado, tal como una caldera de lecho fluidizado circulante (Figura 2) y una caldera de lecho fluidizado burbujeante (Figura 1). Estas solo se muestran como ejemplos, y cualquier tipo de caldera de lecho fluidizado puede usarse en relación con cualquier realización. Opcionalmente, se puede usar un quemador de carbón (Figura 500) en relación con cualquier tipo de caldera de lecho fluidizado.

20 En esta descripción, material pirolizable se refiere a material que comprende carbono. Preferiblemente, el material pirolizable comprende al menos un 25% en peso (porcentaje en peso) de carbono. Preferiblemente, el material pirolizable comprende al menos un 40% en peso de carbono en términos de masa seca. El material pirolizable puede comprender o consistir en biomasa. El material pirolizable puede comprender materiales poliméricos, por ejemplo plásticos. El material pirolizable puede comprender o consistir en material derivado de residuos, tal como combustible derivado de residuos (RDF, por sus siglas en inglés) y/o combustible sólido recuperado (SRF, por sus siglas en inglés). En general, SRF es un tipo especial de RDF, y SRF tiene una calidad estandarizada.

25 La biomasa puede comprender típicamente materiales vírgenes y de desecho de origen vegetal, animal y/o de pescado o de origen microbiológico, tales como madera virgen, residuos de madera, residuos forestales, desechos, desechos municipales, desechos o subproductos industriales, desechos o subproductos agrícolas, residuos o subproductos de la industria de procesamiento de madera, desechos o subproductos de la industria alimentaria, residuos orgánicos sólidos o semisólidos de digestión anaeróbica o aeróbica, tales como residuos de la producción de biogás a partir de material lignocelulósico y/o de desecho municipal, residuos del proceso de producción de bioetanol y cualesquiera combinaciones de los mismos.

30 Adecuadamente, dicha biomasa comprende desechos y subproductos de la industria de procesamiento de la madera, tales como broza, desechos urbanos de madera, desechos de tala, astillas de madera, desechos de madera, serrín, paja, leña, materiales de madera, papel, subproductos de la fabricación de papel o procesos de la industria maderera, donde la biomasa (biomasa vegetal) se compone de celulosa y hemicelulosa, y lignina.

35 Adicionalmente o como alternativa, el material pirolizable puede comprender desechos sólidos que comprendan carbono. Los desechos sólidos pueden triturarse y/o deshidratarse, como se conoce por el procesamiento de desechos a combustible derivado de residuos (RDF). El material pirolizable puede comprender RDF. El material pirolizable puede comprender desechos municipales tales como plásticos y/o desechos biodegradables. Los materiales no pirolizables, que generalmente también son materiales no combustibles, como el vidrio y los metales, pueden eliminarse de la materia prima de desecho antes de la pirólisis. Para este propósito puede usarse una separación mecánica.

40 Con referencia a la Figura 1, una caldera 100 de lecho fluidizado está integrada con el reactor 200 de pirólisis. Esto tiene al menos tres efectos. Primero, la caldera 100 se usa por su naturaleza para recuperar calor de gases calientes. Por lo tanto, el calor de los productos secundarios del proceso y/o el calor de reacción (es decir, la energía química) de los productos secundarios del proceso pueden recuperarse mediante un intercambio 700 de calor de la caldera 100. En segundo lugar, la caldera 100 se usa por su naturaleza para producir calor, y opcionalmente también electricidad, a partir de combustible, tal como biomasa o RDF. Por lo tanto, el uso de combustible, por un lado para producir el producto de vapor pirolítico, y por otro lado para energía y/o calor, puede optimizarse en función de las necesidades. En tercer lugar, en particular el lecho fluidizado sirve de fuente de calor eficiente para la pirólisis rápida, ya que el material particulado de un lecho fluidizado puede usarse para transferir calor al reactor 200 de pirólisis, opcionalmente a través de un material catalizador, como se detallará posteriormente. Además, debido a que el material del lecho es sólido y particulado, puede entremezclarse con material pirolizable para facilitar la pirólisis rápida en el reactor 200 de pirólisis. En una realización y cuando se usa, también el reactor 200 de pirólisis comprende un lecho fluidizado que incluye el material particulado y el material pirolizable. Tal reactor 200 de pirólisis comprende medios, tales como boquillas, configurados para alimentar gas inerte al reactor, fluidizando así el material particulado en el reactor 200 de pirólisis.

55 Una caldera 100 de lecho fluidizado puede ser una caldera de lecho fluidizado burbujeante (caldera BFB, por sus siglas en inglés), como se muestra en la Figura 1, o una caldera de lecho fluidizado circulante (caldera CFB, por sus siglas en inglés), como se muestra en la Figura 2. Cuando está operativa, la caldera 100 de lecho fluidizado comprende

un lecho fluidizado 110. Por lo tanto, cuando está operativo, el lecho fluidizado 110 de la caldera 100 comprende material particulado sólido resistente al calor (es decir, incombustible) como material del lecho. Este material particulado resistente al calor se denominará primer material particulado resistente al calor siempre que se considere necesario. Por ejemplo, se puede usar arena como material particulado sólido resistente al calor. Cuando se usa en conexión con un reactor 200 de pirólisis, el material particulado resistente al calor del lecho fluidizado de la caldera de lecho fluidizado comprende preferiblemente al menos uno de los siguientes: arena, piedra caliza, caolín y alúmina.

Además, se quema algo de combustible dentro de la caldera 100 para calentar el material del material sólido particulado resistente al calor. Por lo tanto, se alimentan a la caldera 100 combustible y aire, como está representado en las Figuras 1 y 2. En particular, el combustible, tal como biomasa y/o RDF, se quema y se mezcla con el material del lecho, tal como arena.

Preferiblemente, el combustible comprende biomasa, tal como biomasa que comprenda celulosa.

Cuando se quema combustible, se produce algo de gas de combustión (es decir, primer gas de combustión). La caldera 100 de lecho fluidizado comprende además un intercambiador 700 de calor configurado para recuperar calor del primer gas de combustión a un medio de transferencia de calor, tal como vapor de agua, agua o su mezcla. Opcionalmente, y con referencia a las Figuras 1, 2, 4 y 5, el calor comprendido en vapor de agua puede usarse en una turbina 710 de vapor en conexión con un generador 720 de electricidad para la producción de electricidad. El vapor de agua enfriado, que puede comprender agua, puede recircularse nuevamente al intercambiador 700 de calor, como está representado en las Figuras 1 y 2. Como alternativa, el vapor de agua de la turbina de vapor puede usarse en otras partes del proceso, tal como para la regeneración del catalizador. Opcionalmente, el calor se puede usar (adicionalmente, como está representado en la Figura 4, o como alternativa, como está representado en la Figura 5) para otros fines tales como calefacción urbana y/o secado. En particular, el calor puede usarse para secar al menos uno de los siguientes:

- el combustible recibido, tal como biomasa y/o RDF,
- el material pirolizable, y
- el material que se recibe para su uso como combustible y el material pirolizable (véase la Figura 3).

Aunque la producción de electricidad y/o calor se muestre solo en algunas de las figuras, pueden producirse electricidad y/o calor de manera similar también en otras realizaciones. Por lo tanto, en las Figuras 5 y 8 se muestra una línea de puntos para enfatizar que estos componentes son opcionales. Obviamente, estos componentes son opcionales también en algunas otras realizaciones. La cantidad de calor y/o electricidad se puede seleccionar según las necesidades.

La atmósfera en la caldera 100 de lecho fluidizado tiene tal contenido de oxígeno libre (O_2) que el combustible puede quemarse. El contenido de oxígeno libre (O_2) en la caldera 100 puede ser, por ejemplo, de al menos un 10% en volumen (porcentaje en volumen), al menos un 15% en volumen o al menos un 20% en volumen. Se puede alimentar aire a la caldera 110. El contenido de oxígeno libre (O_2) del aire es de un 21% en volumen. La caldera de lecho fluidizado puede estar presurizada o no presurizada.

Una idea de la invención es utilizar la energía del material particulado calentado de la caldera 100 de lecho fluidizado como fuente de calor para un proceso de pirólisis rápida en el reactor 200 de pirólisis. El primer material particulado es resistente al calor, es decir, no es dañado por el calor. El primer material particulado puede referirse a un material de lecho. Puede introducirse calor en el reactor 200 de pirólisis con o a través del primer material particulado. Con referencia a las Figuras 1 y 2, la flecha que se muestra en el canal 102 indica la transferencia de material de lecho calentado desde la caldera 100 de lecho fluidizado al reactor 200 de pirólisis, es decir, un pirolizador 200. El sistema comprende un canal 102 o canales para transportar material particulado caliente, es decir, material de lecho desde la caldera 100 de lecho fluidizado al reactor 200 de pirólisis directa o indirectamente. Como se discutió anteriormente, el material particulado se puede transportar directamente y, como se discutirá posteriormente, el material particulado se puede transportar indirectamente, tal como a través de un quemador 500 de carbón (véase la Figura 3). Además, se puede usar un intercambiador 103 de calor de tal manera que no se transfiera al reactor 200 de pirólisis nada del primer material particulado.

En las realizaciones de las Figuras 1 y 2, una vez que el material del lecho ha transferido su calor al material pirolizable en el reactor 200 de pirólisis, al menos parte del material del lecho se transporta de vuelta al horno de la caldera 100 de lecho fluidizado a través del canal 104 para ser calentado de nuevo; como se indica en la Figura 1. Junto con el material del lecho, se transportará algo de carbón desde el reactor 200 de pirólisis a la caldera 100 de lecho fluidizado para quemarlo en ésta, por lo que el calor producido por la combustión también se puede recuperar.

En una realización, la temperatura del material particulado caliente que se transporta desde la caldera 100 al reactor 200 de pirólisis o al intercambiador 103 de calor es de 550 °C a 900 °C. En una realización, el material particulado se puede enfriar antes de introducirlo en el reactor de pirólisis usando otro intercambiador de calor. El calor puede intercambiarse, por ejemplo, con el material particulado que retorna (véase el canal 104), ya que, después de la

pirólisis, el material particulado que retorna está típicamente más frío. En una realización, la temperatura del material particulado que se transporta desde el reactor 200 de pirólisis o desde el intercambiador 103 de calor a la caldera 100 es de 300 °C a 600 °C. Se ha descubierto que estas temperaturas producen tales vapores pirolíticos que son adecuados para el tratamiento catalítico. En una realización, la temperatura del material particulado que se transporta desde el reactor 200 de pirólisis es menor que la temperatura del material particulado caliente que se transporta al reactor 200 de pirólisis. El primer material particulado se transfiere de tal manera que la temperatura del primer material particulado caliente permanezca por encima de 400 °C durante toda dicha transferencia.

Además del primer o el segundo materiales particulados calientes, se alimenta material pirolizable al reactor 200 de pirólisis. En el reactor 200 de pirólisis, el material pirolizable se calienta, por lo que el material pirolizable se piroliza. En la pirólisis, el material pirolizable se calienta a una temperatura de 400 °C a 700 °C. En una realización, el reactor 200 de pirólisis no está presurizado, por lo que la pirólisis se produce a una presión sustancialmente atmosférica. Como resultado de la pirólisis, se producen vapores pirolíticos crudos; y se produce algo de carbón como un producto secundario. Parte del carbón puede separarse del gas pirolítico crudo, por ejemplo en un ciclón. Por lo tanto, parte del carbón se devuelve con el primer o el segundo materiales particulados a la caldera 100 (Figura 1) o a un quemador 500 de carbón (Figura 3) y parte del carbón sale del reactor 200 de pirólisis con vapores pirolíticos. Los vapores pirolíticos crudos pueden comprender pequeñas partículas sólidas o aerosoles líquidos, que fluyen con los otros componentes del gas pirolítico crudo. Por lo tanto, el gas pirolítico crudo puede estar sucio.

El contenido de oxígeno libre (O₂) de la atmósfera en el reactor 200 de pirólisis es relativamente bajo para evitar la quema del material pirolizable y/o los vapores pirolíticos crudos. El ambiente en el reactor 200 de pirólisis tiene un contenido de oxígeno libre (O₂) de como máximo un 3% en volumen, preferiblemente como máximo un 1% en volumen o menos de un 0,1% en volumen. La pirólisis puede tener lugar en ausencia de oxígeno libre (O₂). En particular, el contenido de oxígeno libre (O₂) en el reactor 200 de pirólisis es menor que el contenido de oxígeno libre (O₂) en el horno de la caldera 100 de lecho fluidizado; por ejemplo en al menos 15 unidades porcentuales, midiéndose el contenido de oxígeno libre (O₂) % en volumen.

Como resultado de la pirólisis, se forman vapores, aerosoles, carbón y gases no condensables. Parte del carbón se mezcla con el material del lecho en el reactor 200 de pirólisis. Los componentes restantes están incluidos en el vapor pirolítico crudo (véase la Figura 1). Típicamente, a las temperaturas de pirólisis mencionadas anteriormente, el carbón que no fluye con el vapor pirolítico crudo constituye aproximadamente un 5% en peso a un 35% en peso de los productos pirolíticos. El vapor pirolítico crudo típicamente comprende, consiste en o consiste sustancialmente en vapor de agua, gases no condensables (tales como CO, CO₂, H₂, CH₄), mezcla compleja de moléculas de hidrocarburos condensables oxigenados, carbón, coque, hollín y partículas de material de lecho, además de aerosoles que pueden comprender, por ejemplo, alquitranes condensados. En el vapor pirolítico crudo, las moléculas de hidrocarburos condensables están típicamente en forma oxigenada. El término hidrocarburo oxigenado se refiere a compuestos que comprenden átomos de hidrógeno (H), carbono (C) y oxígeno (O) unidos a otros átomos (del mismo elemento o de un elemento diferente) por enlaces químicos. Como se indicó anteriormente, el vapor pirolítico puede comprender también otros compuestos, tales como H₂O, CO y CO₂, comprendiendo átomos de oxígeno unidos a otros átomos (oxígeno o un elemento diferente).

El vapor pirolítico crudo se limpia. El vapor pirolítico crudo puede limpiarse con una disposición 210 de limpieza, que comprende al menos uno de los siguientes: un ciclón 220, un filtro 300 y un lecho protector 310. La disposición 210 de limpieza está dispuesta corriente abajo con respecto al reactor 200 de pirólisis y corriente arriba con respecto a un reactor catalítico 400. La disposición 210 de limpieza es un medio 210 para eliminar al menos algunos aerosoles y/o partículas sólidas de vapores pirolíticos crudos.

En una realización, en el reactor 200 de pirólisis, por ejemplo en un ciclón 220 del mismo, la mayoría de los sólidos, tales como carbón y material del lecho, se separan del vapor pirolítico crudo. Adicionalmente o como alternativa, los medios 210 para eliminar al menos algunos aerosoles y/o partículas sólidas pueden comprender un filtro 300 para eliminar al menos algunos aerosoles y/o partículas sólidas de dicho vapor pirolítico crudo. El filtro 300 puede ser un filtro de vapor caliente. Adicionalmente o como alternativa, los medios 210 para eliminar al menos algunos aerosoles y/o partículas sólidas pueden comprender un lecho 310 de material particulado, tal como un lecho protector 310 o un lecho de catalizador, por lo que al menos algunos de los aerosoles y/o partículas sólidas pueden adherirse a las partículas del lecho. Adicionalmente o como alternativa, los medios 210 para eliminar al menos algunos aerosoles y/o partículas sólidas pueden comprender otro ciclón (no mostrado), dispuesto después del ciclón 220.

En cuanto al filtrado de vapor caliente (HVF, por sus siglas en inglés) opcional, el vapor pirolítico, que se ha limpiado con un ciclón 220, puede transportarse también a través de una unidad HVF 300 para limpiarlo más, como se muestra en la Figura 1. En ésta, la unidad HVF 300 de filtrado opcional se muestra con una línea de trazos. Además, la unidad HVF 300 puede verse como parte de los medios 210 para eliminar al menos algunos aerosoles y/o partículas sólidas del vapor pirolítico crudo, comprendiendo los medios 210 en la Figura 1 también el ciclón 220. Aún más, puede transportarse vapor pirolítico crudo sólo a través de una unidad HVF 300, siempre que no se use un ciclón 220. En la unidad HVF 300, los vapores pirolíticos se filtran a una temperatura de filtrado. La temperatura de filtrado puede ser por ejemplo de al menos 200 °C o al menos 400 °C. La temperatura de filtrado puede ser por ejemplo como máximo de 700 °C, como máximo de 650 °C o como máximo de 550 °C. La temperatura de filtrado puede ser por ejemplo de L_i a H_i, en donde i = 1, 2, 3, 4, 5 o 6; L₁=L₂=L₃=200 °C, L₄=L₅=L₆=400 °C, H₁=H₄=700 °C, H₂=H₅=650 °C y H₃=H₆=550 °C.

El filtrado debe realizarse a una temperatura tan alta que no se produzca condensación de los componentes de los vapores pirolíticos. Esto reduce el riesgo de bloquear el filtro. La temperatura tampoco debe ser demasiado alta, para evitar el craqueo innecesario del vapor pirolítico. La temperatura en la unidad 300 de filtro de vapor caliente puede ser por ejemplo de 400 °C a 700 °C.

5 La unidad HVF 300 de filtrado comprende elementos de filtrado, tales como placas filtrantes, estando los elementos de filtrado dispuestos para detener al menos algunas partículas sólidas. Los elementos de filtrado son resistentes al calor, en particular son resistentes al calor contra la temperatura de filtrado mencionada anteriormente. Aunque no se muestre en todas las Figuras, evidentemente, la unidad HVF 300 se puede usar en combinación con otras características.

10 En cuanto al lecho protector 310 opcional (véase la Figura 2), el vapor pirolítico limpio, que se ha limpiado con un ciclón 220, también puede transportarse a través del lecho protector 310 para limpiarlo más, como se muestra en la Figura 2. Un lecho protector 310 comprende un lecho de material sólido inerte o sustancialmente inerte de gran área superficial para atrapar físicamente las impurezas. La limpieza en el lecho protector debe realizarse a una temperatura suficientemente baja para evitar el craqueo innecesario del vapor pirolítico. La temperatura en el lecho protector puede ser por ejemplo de 400 °C a 700 °C.

Un lecho protector 310 puede ser un lecho protector móvil o fluidizado, de manera similar a un lecho fluidizado 410 de catalizador de la Figura 1. Como alternativa, un lecho protector 310 puede ser un lecho fijo, de manera similar a un lecho fijo 410 de catalizador (o lechos fijos de catalizador) de las Figuras 3, 4, 5 o 6.

20 Adicionalmente, o como alternativa a un primer ciclón 220, se pueden usar ciclones posteriores para limpiar aún más los vapores pirolíticos. Además, tal ciclón posterior (tal como un segundo o un tercer ciclón) puede comprender material de lecho protector.

Aunque no se muestre, se pueden usar tanto un lecho protector 310 como un filtro 300 de vapor caliente; opcionalmente en combinación con otro ciclón. Preferiblemente, se usa al menos un ciclón 220 para limpiar vapores pirolíticos crudos; es decir, la disposición 210 de limpieza comprende preferiblemente al menos un ciclón 220. El ciclón 220 es preferiblemente el primer componente de la disposición 210 de limpieza en la dirección del flujo de los vapores, porque no necesita tanto mantenimiento como otros equipos de limpieza. Además, en caso de que la disposición de limpieza comprenda al menos dos ciclones (220 y otro), los ciclones son preferiblemente los dos primeros componentes de la disposición 210 de limpieza en la dirección del flujo de los vapores. Por lo tanto, la disposición de limpieza puede comprender, en la dirección del flujo de los vapores pirolíticos, (i) solo el ciclón 220; (ii) el ciclón 220 y el filtro 300 de vapor caliente; (iii) el ciclón 220 y el lecho protector 310; (iv) el ciclón 220, el filtro 300 de vapor caliente y el lecho protector 310; (v) el ciclón 220, el lecho protector 310 y el filtro 300 de vapor caliente; (vi) el ciclón 220, el otro ciclón y el filtro 300 de vapor caliente; (vii) el ciclón 220, el otro ciclón y el lecho protector 310; (viii) el ciclón 220, el otro ciclón, el filtro 300 de vapor caliente y el lecho protector 310; o (ix) el ciclón 220, el otro ciclón, el lecho protector 310 y el filtro 300 de vapor caliente. Además, el material del lecho protector puede disponerse en el otro ciclón y/o puede usarse un ciclón adicional después del otro ciclón y antes de otros componentes de la disposición 210 de limpieza.

40 Después de la eliminación de al menos algo de carbón y otras partículas contaminantes y/o aerosoles del vapor pirolítico crudo mediante dicha limpieza, el vapor pirolítico se denominará vapor pirolítico limpio (véase la Figura 1). Con referencia a la Figura 1, el vapor pirolítico limpio se transporta en las tuberías 230 y 232; o en ausencia del filtro 300 en una tubería 230. El vapor pirolítico limpio se transporta a un reactor catalítico 400.

45 El gas pirolítico limpio comprende moléculas de hidrocarburos condensables oxigenados, aerosoles y gases no condensables, además de carbón. La cantidad relativa de carbón depende, por ejemplo, del grado de limpieza. Típicamente, el carbón constituye como máximo un 1% en peso (porcentaje en peso) o como máximo un 0,5% en peso del gas pirolítico limpio que se transporta al reactor catalítico 400. Por lo tanto, en los medios 210 para eliminar al menos algunos aerosoles y/o partículas sólidas de vapores pirolíticos crudos, el gas pirolítico crudo se limpia preferiblemente de tal manera que se transporte con vapores pirolíticos limpios al reactor catalítico 400 como máximo un 1% en peso o como máximo un 0,1% en peso del carbón producido por la pirólisis.

50 Mediante esta eliminación, y debido a que la mayoría de las impurezas de los vapores pirolíticos permanecen con el carbón residual, que se separa en los medios 210, los vapores pirolíticos limpios comprenden menos impurezas que los vapores pirolíticos crudos. La limpieza es beneficiosa porque el carbón, los metales alcalinos y otros componentes inorgánicos del vapor pirolítico aumentan la tasa de desactivación de los catalizadores del lecho 410 de catalizador. En general, los catalizadores se desactivan, por ejemplo, debido a la deposición de coque, la acumulación de metales alcalinos, la sinterización del material activo (por ejemplo metal) y el soporte, y la acumulación del producto en el catalizador. Así, los vapores pirolíticos limpios pueden tratarse catalíticamente sin que el catalizador sea degradado por las impurezas; o al menos la velocidad de degradación del catalizador es mucho más lenta. Además, cuanto mejor se realiza la limpieza, mayor es el tiempo de vida de los catalizadores en el reactor 400 de catalizador. Preferiblemente, la limpieza se realiza al menos en el grado mencionado anteriormente. También preferiblemente, los medios 210 comprenden el ciclón 210 y al menos uno de los siguientes: (i) otro ciclón, (ii) el filtro 300 de vapor caliente y (iii) el lecho protector 310.

- El material pirolizable y/o el combustible para la caldera 100 de lecho fluidizado pueden comprender biomasa sólida, tal como plantas y/o trozos de plantas. Adicionalmente o como alternativa, la biomasa puede comprender aceites de origen biológico. Preferiblemente, el material pirolizable comprende al menos un 50% en peso de biomasa sólida; más preferible al menos un 90% en peso de biomasa sólida. También preferiblemente, el material pirolizable comprende al menos un 50% en peso seco (porcentaje en peso de materia sólida seca respecto a la materia seca total, de la que se ha eliminado el agua mediante secado) de biomasa sólida; más preferible al menos un 90% en peso seco de biomasa sólida. Esto tiene el efecto beneficioso de que la misma biomasa puede usarse como combustible de la caldera 110 y como material pirolizable. El término "sólido" se refiere aquí a materiales que son sólidos a todas las temperaturas por debajo de 70 °C a presión atmosférica.
- En una realización, el material pirolizable comprende celulosa. En una realización, el material pirolizable comprende al menos un 10% en peso de celulosa. En una realización, el material pirolizable comprende madera. En una realización, el material pirolizable comprende al menos un 90% en peso de sólidos que tienen su origen en la agricultura (incluida la silvicultura). En una realización, el material pirolizable comprende al menos un 90% en peso de sólidos que tienen su origen en la madera.
- El material catalizador del lecho 410 de catalizador puede seleccionarse de acuerdo con los requisitos de calidad para el vapor pirolítico tratado. El material catalizador del lecho 410 de catalizador puede seleccionarse de acuerdo con el tipo de biomasa utilizada como material pirolizable. En particular, el catalizador del lecho 410 de catalizador puede seleccionarse para vapores pirolíticos obtenibles por pirolización de biomasa. El catalizador se selecciona de tal manera que el contenido de oxígeno, y opcionalmente también la acidez, sean suficientemente bajos, como se discutirá posteriormente.
- Los parámetros del proceso, tales como temperatura y/o presión en el reactor 200 de pirólisis, afectan al rendimiento y la calidad del vapor de pirólisis crudo y limpio obtenido de la pirólisis.
- En una realización, la temperatura en el reactor 200 de pirólisis es de 400 °C a 700 °C. En una realización, la presión en el reactor 200 de pirólisis es como máximo de 2 bares(a) (presión absoluta en bares), o como máximo de 1,5 bares(a). El proceso puede no estar presurizado. En una realización, la temperatura en el reactor 200 de pirólisis es de 400 °C a 700 °C y la presión en el reactor 200 de pirólisis es como máximo de 1,5 bares(a). El proceso puede no estar presurizado.
- La presión razonablemente baja del reactor 200 de pirólisis simplifica el equipo, porque los recipientes de alta temperatura y alta presión requerirían selecciones especiales de material. De esta manera, el proceso puede simplificarse, en comparación con un reactor 200 de pirólisis de alta presión. Como proceso más simple es más fácil de implementar, por lo que es posible mejorar la disponibilidad y reducir los costos de inversión.
- En una realización, la presión en el reactor 200 de pirólisis es mayor o igual que la presión en el lecho 410 de catalizador, en particular la presión de los vapores en el mismo. En una realización, la temperatura en el reactor 200 de pirólisis es de 400 °C a 700 °C y la presión en el reactor 200 de pirólisis es mayor que, sustancialmente igual a, o igual a la presión en el reactor catalítico 400. Preferiblemente, la presión en el reactor catalítico 400 es sustancialmente igual a la presión en el reactor 200 de pirólisis. Esto tiene el efecto de que no se necesita compresor entre el reactor 200 de pirólisis y el reactor catalítico 400; simplificando así aún más el proceso. Además, preferiblemente la presión en la caldera 100 es mayor que, sustancialmente igual a, o igual a la presión en el reactor 200 de pirólisis. Esto tiene el efecto de que no se necesita compresor entre la caldera 100 y el reactor 200 de pirólisis.
- Desde el reactor 200 de pirólisis, los vapores pirolíticos se transportan, a través de la disposición 210 de limpieza, a un reactor catalítico 400. En particular, al menos algunos de los vapores pirolíticos limpios se transportan desde los medios 210 para separar el carbón de los vapores pirolíticos crudos, tales como el ciclón 220, al reactor catalítico 400. Esto tiene el efecto de que se transporta sustancialmente menos carbón al reactor catalítico 400, en comparación con el transporte del gas pirolítico crudo a un reactor catalítico. Las impurezas podrían deteriorar el catalizador del reactor 400.
- Los vapores pirolíticos limpios pueden transportarse en una tubería 230 o en tuberías 230, 232 para transportar vapor pirolítico desde el reactor 200 de pirólisis al reactor catalítico 400. El sistema puede comprender una tubería 230, 232 para transportar al menos algo de vapor pirolítico limpio desde los medios 210 para separar el carbón de los vapores pirolíticos crudos al reactor catalítico 400.
- El material catalítico del lecho 410 de catalizador del reactor catalítico 400 se selecciona preferiblemente de tal manera que las reacciones catalíticas tengan lugar a baja presión; en particular a una presión inferior a la del reactor 200 de pirólisis. Esto tiene dos efectos. Primero, los costos de inversión para el reactor catalítico 400 permanecen bajos, ya que no necesita resistir una presión alta. En segundo lugar, no hay necesidad de un compresor o un ventilador para facilitar el flujo de los vapores pirolíticos limpios desde el reactor 200 de pirólisis al reactor catalítico 400. Los catalizadores y las condiciones de funcionamiento preferibles se discutirán a continuación.
- El objetivo principal del catalizador es desoxigenar los hidrocarburos condensables oxigenados, que están incluidos en el vapor pirolítico limpio. Tales reacciones de desoxigenación desoxigenan al menos algunos de los hidrocarburos oxigenados a hidrocarburos, o al menos a hidrocarburos menos oxigenados. En la reacción, al menos parte del

oxígeno (O) que está unido a los hidrocarburos oxigenados se elimina de los hidrocarburos oxigenados, desoxigenando así estos hidrocarburos. El oxígeno eliminado forma con otros componentes del vapor pirolítico otros compuestos que contienen oxígeno, tales como agua (H₂O), monóxido de carbono (CO) y/o dióxido de carbono (CO₂). Además, se pueden formar algunos hidrocarburos ligeros e hidrocarburos oxigenados como resultado de las reacciones.

5 Para ilustrar la importancia de la utilización de productos secundarios, como ejemplo, la pirólisis de biomasa seca puede producir un 20% en peso de biocrudo y un 80% en peso de productos secundarios, por ejemplo

- 31% en peso de fracción rica en agua,
- 12% en peso de carbón, que se produce en el reactor 200 de pirólisis y se quema en el proceso,
- 10 – 2% en peso de coque, que se produce en el reactor 400 de catálisis y puede quemarse cuando el catalizador se regenera y/o posteriormente, y
- 35% en peso de gases no condensables.

Todas las cifras se dan en porcentaje en peso con respecto a la masa de biomasa seca.

15 La eficiencia en cuanto a los recursos del proceso se puede aumentar cuando se utilizan los productos secundarios. Estos productos secundarios contienen calor y/o calor de reacción, que puede recuperarse y utilizarse en el proceso. Aún más, se puede utilizar el calor del producto pirolítico tratado mismo.

Los ejemplos de utilización de productos secundarios y calor incluyen:

- transportar la fracción de agua desde un separador 815 (véanse las Figuras 7 y 8) a la caldera 100 para utilizar la energía química de los componentes de la fracción de agua,
- 20 – recuperar calor de un condensador 810 configurado para condensar vapor pirolítico tratado (Figura 7), incluyendo
 - recuperar calor del producto de vapor pirolítico tratado y
 - recuperar calor del gas no condensable entremezclado con el producto de vapor pirolítico,
- transportar gases no condensables desde un condensador 810, configurado para condensar vapor pirolítico tratado, de vuelta al proceso,
- 25 – regenerar el catalizador y transportar el segundo gas de combustión así formado de vuelta al proceso,
- transportar el carbón desde el reactor 200 de pirólisis a la caldera 100 (véase, por ejemplo, la Figura 8) para quemarlo, y utilizar el calor obtenido al quemar el carbón,
- transportar el carbón desde el reactor 200 de pirólisis a un quemador 500 de carbón (véase, por ejemplo, la Figura 3) para quemarlo, y utilizar el calor obtenido al quemar el carbón, por ejemplo mediante los intercambiadores de calor de la caldera 100 (véase el cuarto gas de combustión),
- 30 – transportar otros productos secundarios desde el postratamiento 800 de vuelta al proceso,
- recuperar calor del postratamiento 800 y utilizar el calor, y
- recuperar calor del reactor 200 de pirólisis (Figura 3) y utilizar el calor.

35 Aunque no se muestre en todas las figuras, cualquier utilización de este tipo es preferible en cada una de tales realizaciones cuando sea posible.

En cuanto a las alternativas anteriores, el método comprende

- condensar al menos parte del producto de vapor pirolítico tratado para obtener un condensado crudo, produciendo así algo de gas no condensable como producto secundario,
- 40 – alimentar al menos parte del gas no condensable de vuelta al proceso, corriente arriba con respecto a dicha condensación,
- regenerar el catalizador y transportar el segundo gas de combustión así formado de nuevo al proceso, al reactor catalítico 400 o corriente arriba con respecto al reactor 200 de pirólisis o a este último,
- transferir parte del carbón a la caldera de lecho fluidizado o al quemador de carbón,

- quemar el carbón en la caldera de lecho fluidizado o el quemador de carbón para producir calor,
- recuperar el calor producido al quemar el carbón.

En esta descripción, el contenido de oxígeno del vapor pirolítico puede referirse al peso total de los átomos de oxígeno que estén unidos en uno o varios compuestos condensables que comprendan al menos carbono, oxígeno e hidrógeno en relación con el peso total de tales compuestos condensables del vapor pirolítico que comprende carbono e hidrógeno (por ejemplo, hidrocarburos e hidrocarburos oxigenados). Una sustancia condensable estará en forma condensada (es decir, líquida) a presión atmosférica a una temperatura de 60 °C a 25 °C; tal como a 60 °C o a 25 °C. Por lo tanto, este contenido de oxígeno se mide en % en peso (base seca). Típicamente, el contenido de oxígeno de los vapores pirolíticos limpios en base seca es de un 30% en peso a un 50% en peso. A la inversa, un gas no condensable es gas que no es una sustancia condensable en el sentido anterior.

En esta descripción, el contenido de oxígeno del vapor pirolítico puede referirse al peso total de los átomos de oxígeno de biocrudo o biocrudo en bruto que estén unidos en compuestos que comprendan al menos carbono, oxígeno e hidrógeno en relación con el peso total del biocrudo o biocrudo en bruto, respectivamente. El biocrudo, por otro lado, se puede obtener del vapor pirolítico tratado catalíticamente como remanente después de la condensación y separación de la fracción rica en agua. La condensación puede tener lugar a una temperatura de 60 °C como máximo, por ejemplo como máximo a 25 °C, como se indicó anteriormente (véase la palabra "condensable"). La temperatura de condensación puede ser de al menos 5 °C. La condensación y la separación se muestran en la Figura 7. Para determinar la eficiencia del tratamiento catalítico, antes del tratamiento catalítico puede condensarse (a la temperatura y presión mencionadas anteriormente) el vapor pirolítico crudo y puede separarse del mismo la fracción rica en agua para obtener un primer contenido de oxígeno para el vapor pirolítico no tratado; y después del tratamiento catalítico puede condensarse (a la temperatura y presión mencionadas anteriormente) el vapor pirolítico tratado y puede separarse del mismo la fracción rica en agua para obtener un segundo contenido de oxígeno para el vapor pirolítico tratado. El remanente después de la condensación y la separación de la fracción rica en agua puede llamarse biocrudo en bruto (cuando se aplica a vapores pirolíticos no tratados) y biocrudo (cuando se aplica a vapores pirolíticos tratados catalíticamente, véase la Figura 7).

Debido a las reacciones de desoxigenación, el contenido de oxígeno (véase cualquiera de las dos definiciones anteriores) del vapor pirolítico tratado es menor que el contenido de oxígeno del vapor pirolítico no tratado (es decir, crudo o limpio) (véase la Figura 1). El contenido de oxígeno del vapor pirolítico tratado puede ser inferior al contenido de oxígeno del vapor pirolítico no tratado (es decir, crudo o limpio) en al menos 15 unidades porcentuales o en al menos 25 unidades porcentuales, cuando el contenido de oxígeno se mide en % en peso.

Además, en una realización, el vapor pirolítico crudo o limpio se trata catalíticamente de tal manera que el índice de acidez total (TAN, por sus siglas en inglés) de una composición obtenida del vapor pirolítico tratado como remanente después de la condensación y separación de la fracción rica en agua esté entre 0 y 50. Para obtener más detalles sobre el TAN, consulte la norma ASTM D664-81. La composición que tiene tal TAN se indica como "biocrudo" en la Figura 7. La condensación puede tener lugar a una temperatura que sea como máximo de 60 °C, por ejemplo como máximo de 25 °C, como se indicó anteriormente (véase la palabra "condensable"). La temperatura de condensación puede ser de al menos 5 °C. La presión de condensación para esta definición es atmosférica (101 kPa).

En el reactor catalítico 400, al menos parte del vapor pirolítico limpio en forma de vapor se transporta a través de un lecho 410 de catalizador que comprende material catalizador. En una realización, un lecho 410 de catalizador que comprende material catalizador está dispuesto dentro de un reactor catalítico 400 de tal manera que al menos parte del vapor pirolítico limpio está dispuesto para fluir a través del lecho 410 de catalizador dentro del reactor catalítico 400.

Mediante el transporte de vapor pirolítico en forma de vapor a través del lecho 410 de catalizador, el catalizador en el lecho 410 cataliza reacciones químicas en el vapor pirolítico que mejoran las propiedades de los vapores pirolíticos. De esta manera, el tratamiento catalítico aumenta la calidad de los vapores pirolíticos. Se ha descubierto que la calidad de los vapores pirolíticos se ve afectada por al menos uno de los siguientes aspectos y muy probablemente por todos ellos:

- el material catalizador utilizado,
- la temperatura del lecho de catalizador,
- la presión en el lecho de catalizador, y
- la composición del material pirolizable.

El material catalizador puede seleccionarse de tal manera que mejore eficazmente las propiedades del vapor pirolítico obtenible del material pirolizable utilizado. Los tipos preferibles de materiales pirolizables se discutieron anteriormente. El material catalizador puede seleccionarse de tal manera que mejore eficazmente la calidad del vapor pirolítico obtenible del material pirolizable en un proceso de pirólisis rápida, en el que el material pirolizable se calienta

poniéndolo en contacto con el primer o el segundo materiales particulados. El material catalizador puede seleccionarse de tal manera que mejore eficazmente las propiedades del vapor pirolítico obtenible de biomasa, por ejemplo biomasa de origen agrícola.

5 Por lo tanto, el material catalizador tiene al menos una funcionalidad desoxigenante. Este material catalizador puede seleccionarse de un grupo de catalizadores que tengan al menos una de las funcionalidades siguientes y preferiblemente todas ellas: deshidratación, condensación, craqueo, desoxigenación, descarboxilación, descarbonilación, despolimerización y desaromatización. Preferiblemente, el material catalizador se selecciona de un grupo de catalizadores que tengan, además de la funcionalidad desoxigenante, al menos una de las funcionalidades siguientes y más preferiblemente todas ellas: condensación, descarbonilación y descarboxilación. Preferiblemente, el material catalizador es un catalizador multifuncional.

10 El catalizador puede seleccionarse de zeolitas de origen natural, zeolitas sintéticas y combinaciones de las mismas. El catalizador puede ser un catalizador de zeolita ZSM-5. Otros catalizadores de zeolita que pueden usarse pueden incluir ferrierita, zeolita Y, zeolita beta, mordenita, MCM-22, ZSM-23, ZSM-57, SUZ-4, EU-1, ZSM-11, (S)A1P0-31, SSZ-23, y similares. También se pueden usar catalizadores sin zeolita; por ejemplo, WO_x/ZrO_2 y fosfatos de aluminio.

15 El catalizador puede comprender un metal y/o un óxido de metal. Los metales y/u óxidos adecuados pueden incluir, por ejemplo, níquel, paladio, platino, titanio, vanadio, cromo, manganeso, hierro, cobalto, cinc, cobre, galio y/o cualquiera de sus óxidos, entre otros. En algunos casos pueden incluirse elementos promotores seleccionados de los elementos de tierras raras, es decir, los elementos 57-71, cerio, circonio o sus óxidos, o combinaciones de estos, para modificar la actividad, estructura y/o estabilidad del catalizador. Además, en algunos casos, las propiedades de los catalizadores (por ejemplo, estructura de poros, tipo y/o número de sitios ácidos, etc.) pueden elegirse para producir selectivamente un producto deseado.

20 Adicionalmente o como alternativa, se puede usar un catalizador de óxido de metal que incluya óxidos de al menos un metal del grupo 2, el grupo 3 (incluidos los lantánidos y actínidos) o el grupo 4 de la tabla periódica de elementos (nueva notación IUPAC). El catalizador de óxido de metal también puede incluir más de un óxido de diferentes componentes metálicos. Los metales del grupo 2 que pueden incluirse como un componente de óxido en el catalizador son berilio, magnesio, calcio, estroncio, bario, radio y combinaciones de los mismos. Los ejemplos de óxidos preferidos que contienen al menos un metal del grupo 2 incluyen, pero no se limitan a, uno o más de los siguientes: óxidos de magnesio, óxidos de calcio e hidrotalcita ($Mg_3Al_2(CO_3)(OH)_{16} \cdot 4H_2O$), que puede calcinarse para formar un catalizador básico de óxido de magnesio y aluminio, que representa un catalizador de óxido de metal del grupo 2. Los metales del grupo 3 (incluidos los lantánidos y los actínidos) que son de origen natural y se pueden incluir como un componente de óxido en el catalizador son escandio, itrio, lantano, actinio, cerio, praseodimio, neodimio, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio, lutecio, torio, protactinio y uranio. Los ejemplos de metales preferidos del grupo 3 incluyen, pero no se limitan a, itrio, cerio, praseodimio y combinaciones de los mismos. Los metales del grupo 4 que se pueden incluir como un componente de óxido en el catalizador son titanio, circonio y hafnio.

25 Un ejemplo de un metal preferido del grupo 4 incluye circonio.

30 En una realización, el catalizador comprende una zeolita que tiene una estructura de poro jerárquica que varía de 5 a 20 angstroms de tamaño de poro, una matriz no zeolítica con una estructura de poro jerárquica que varía de aproximadamente 100 a aproximadamente 5.000 angstroms de tamaño de poro, y un aglutinante. La matriz puede comprender una arcilla o una mezcla de arcilla. En algunas realizaciones, la matriz comprende sílice, alúmina, una sílice-alúmina, óxido de metal de transición o una combinación de los mismos. El óxido de metal de transición puede ser dióxido de titanio o dióxido de circonio. El aglutinante puede ser una sílice, un fosfato o un polisilicato de amonio.

35 En una realización, la temperatura del lecho 410 de catalizador es de 400 °C a 700 °C. Las reacciones en el reactor catalítico pueden aumentar la temperatura de los vapores pirolíticos. En una realización, la presión de los vapores en el lecho 410 de catalizador es menor o igual que la presión de los vapores en el reactor 200 de pirólisis. En una realización, la presión de los vapores en el lecho 410 de catalizador es inferior a 2 bares(a). En una realización, la presión de los vapores en el lecho 410 de catalizador es inferior a 1,5 bares(a).

40 En una realización, la temperatura del lecho de catalizador es de 400 °C a 700 °C y la presión en el lecho 410 de catalizador es menor o igual que la presión en el reactor 200 de pirólisis. Aquí, la presión se refiere a la de los vapores en el reactor catalítico 400 o el reactor 200 de pirólisis.

45 En una realización, la temperatura del lecho de catalizador es de 400 °C a 700 °C, la presión en el lecho 410 de catalizador es menor o igual que la presión en el reactor 200 de pirólisis, y la temperatura en el reactor 200 de pirólisis es de 400 °C a 700 °C. Aquí, la presión se refiere a la de los vapores en el reactor catalítico o el reactor de pirólisis.

50 Para disminuir los costos de uso, el catalizador se selecciona de tal manera que el catalizador sea efectivo también en ausencia de hidrógeno (H_2) o en presencia de solo pequeñas cantidades de hidrógeno (H_2); en contraste con algunos catalizadores que funcionan solo en presencia de una cantidad sustancial de hidrógeno. Algunos de los catalizadores antes mencionados son efectivos también para bajas cantidades de hidrógeno. En el método, la presión parcial de hidrógeno de los vapores en el lecho 410 de catalizador es inferior a 0,5 bares, inferior a 0,4 bares o inferior a 0,2 bares.

Como se indicó anteriormente, los catalizadores antes mencionados funcionan sin la adición de hidrógeno externo al proceso antes del reactor catalítico 400 o a este último. Por lo tanto, en el método, no se alimenta hidrógeno externo (H_2) al proceso entre el reactor 200 de pirólisis y el lecho 410 de catalizador o al lecho 410 de catalizador. Esto también mejora el uso eficiente de las materias primas, ya que el hidrógeno es razonablemente caro y difícil de manejar de manera segura, lo que implica mayores costos de inversión.

De esta manera, al menos parte del vapor pirolítico se trata catalíticamente y se produce algo de vapor pirolítico tratado. De esta manera, el calor se produce y utiliza de manera eficiente, y se produce un producto de vapor pirolítico de alta calidad. El vapor pirolítico tratado puede verse como un producto del proceso. Además, el vapor pirolítico tratado puede condensarse, y después de tal condensación puede separarse una fracción rica en agua (véase la Figura 7).

En una realización se usa el mismo tipo de materia prima, por ejemplo biomasa, como combustible para la caldera 100 de lecho fluidizado y como material pirolizable para el reactor 200 de pirólisis (véase la Figura 3). En consecuencia, la materia prima se recibe con los medios 170. La materia prima recibida se divide, con los medios 172 adecuados, en dicho combustible y dicho material pirolizable. El combustible se alimenta a la caldera 100 de lecho fluidizado con medios 152 adecuados y el material pirolizable se alimenta al reactor 200 de pirólisis con los medios 160. Variando la relación entre combustible y materia prima, se puede controlar la salida del proceso: cuánto de la materia prima se usa para la producción de calor y/o energía y cuánto se usa para la producción del producto pirolítico tratado. Está claro que tal división se puede usar en combinación con otras características.

El método comprende regenerar al menos algo de material catalizador del lecho 410 de catalizador, produciendo así un segundo gas de combustión. En conexión con un lecho fluidizado 410 de catalizador (véanse las Figuras 1 y 2) o un lecho burbujeante de catalizador, puede usarse un regenerador 420 para regenerar el catalizador mientras se usa el reactor 400 de catalizador. Sin embargo, un lecho fijo de catalizador no puede regenerarse al mismo tiempo que se usa para el tratamiento catalítico de vapores pirolíticos. Si solo se usa un lecho fijo de catalizador (véase la Figura 3 o 4), la producción de vapores pirolíticos debe detenerse durante la regeneración del catalizador. Sin embargo, la producción de electricidad, calor o aceite de pirólisis sin tratar puede continuar durante la regeneración si se elude el lecho fijo de catalizador. Esto minimiza el tiempo de inactividad del proceso y, por lo tanto, aumenta la disponibilidad y la producción de productos utilizables, lo que aumenta la eficiencia del proceso. Cuando se utilizan al menos dos lechos fijos 410a, 410b de catalizador (véase la Figura 5), se puede utilizar uno de los lechos 410a, 410b, mientras se regenera el catalizador del otro (410b, 410a, respectivamente). La Figura 5 muestra una realización, en la que el catalizador de cada uno de tales reactores catalíticos 400, 400b que no se usa para tratar el vapor pirolítico se regenera en el propio reactor catalítico alimentando cantidades suficientes de oxígeno al mismo (compárese con la Fig. 4). Como es evidente, en otro momento ese mismo reactor 400, 400b puede usarse para el tratamiento catalítico. Como alternativa, los dos reactores catalíticos 400a, 400b podrían compartir un regenerador 420 común, en el que el catalizador podría regenerarse. Como alternativa, cada reactor catalítico 400, 400b puede tener su propio regenerador 420 (no mostrado). Además, estas opciones se pueden elegir libremente para cualquier tipo de caldera de lecho fluidizado, para cualquier tipo de unidad de mejoramiento, independientemente de la presencia o el contenido de la disposición 210 de limpieza, e independientemente de los entornos de proceso en el reactor pirolítico 200 o en el reactor catalítico 400.

La regeneración se puede utilizar para recuperar la actividad del catalizador, cuando se ha producido una desactivación debido a reacciones de desactivación reversibles, tales como el depósito de coque y/o la acumulación del producto. Por el contrario, la regeneración no reactiva los catalizadores en la parte en que hayan sido desactivados por procesos irreversibles, tales como la acumulación de otras impurezas distintas del carbón. Por lo tanto, además de la regeneración, parte del catalizador se puede reemplazar agregando algo de catalizador de reposición, lo que permite mantener el nivel de actividad optimizado del catalizador. Tal catalizador de reposición se puede alimentar al proceso o sistema, por ejemplo a un regenerador 420 o un reactor catalítico 400, 400a, 400b.

En la regeneración del catalizador se forma un segundo gas de combustión, que comprende al menos algunos óxidos de carbono (CO y/o CO_2). Al menos parte del segundo gas de combustión se transporta de vuelta al proceso, al reactor catalítico 400 o corriente arriba con respecto al reactor 200 de pirólisis o a este último. Tal segundo gas de combustión puede transportarse a la caldera 100 de lecho fluidizado, por ejemplo al horno de la misma. Así, el calor de los gases de combustión de la regeneración se puede recuperar con los intercambiadores 700 de calor de la caldera. Esto está ilustrado en las Figuras 1, 2, 4 y 5. El sistema correspondiente comprende medios, tales como una tubería, configurados para transportar gas de combustión desde el regenerador 420 o el reactor 400 de catalizador a la caldera 100 de lecho fluidizado.

Dependiendo de las necesidades, el catalizador del lecho 410 puede regenerarse en presencia de oxígeno libre (O_2) y vapor de agua (H_2O). El oxígeno libre puede estar incluido en aire. En ese caso, además de los óxidos de carbono, también se producirán al menos algo de hidrógeno libre (H_2), metano (CH_4) e hidrocarburos ligeros. Los componentes que comprendan al menos hidrógeno (unido) (H) también podrían utilizarse en otras etapas del proceso. Como se indicó anteriormente, también en este caso, la temperatura a la que se regenera el catalizador es preferiblemente como máximo de $1.000\text{ }^\circ\text{C}$; preferiblemente como alternativa o adicionalmente al menos de $400\text{ }^\circ\text{C}$. La presión en la regeneración es típicamente atmosférica, tal como de 0,5 bares(a) a 1,5 bares(a). Se puede generar vapor de agua para la regeneración, por ejemplo a partir de la fase rica en agua del vapor pirolítico tratado; véase la Figura 7, "agua".

Como alternativa o adicionalmente, se puede extraer vapor de agua del ciclo de vapor de la central eléctrica, por ejemplo como el vapor de agua a baja presión después de la turbina 710 de vapor.

Además de la regeneración, el material catalizador del lecho 410 de catalizador puede ser depurado. La depuración se puede realizar para limpiar el material del catalizador de vapores, líquidos y/o aerosoles que hayan quedado atrapados dentro y sobre la estructura del catalizador, que a menudo es una estructura porosa. La depuración se puede realizar en una unidad de depuración separada (no mostrada). Se puede alimentar vapor de agua y/o hidrógeno a la unidad de depuración para depurar el catalizador. Las condiciones en la unidad de depuración se seleccionan de acuerdo con el catalizador.

Con referencia específicamente a la Figura 1, en una realización, el reactor catalítico 400 comprende un lecho fluidizado 410 de catalizador. En el lecho fluidizado de catalizador, el material catalizador forma el lecho fluidizado de catalizador. El lecho fluidizado de catalizador se forma colocando el catalizador sobre una rejilla 422 y alimentando gas inerte fluidizante (por ejemplo, a través de boquillas 424) hacia el catalizador. El gas inerte fluidizante se alimenta de tal manera que el flujo de gas inerte sea guiado hacia arriba, por lo que el flujo del gas inerte fluidifica el catalizador. En esta realización, el sistema comprende medios 421 para alimentar gas inerte fluidizante al reactor catalítico y medios (tales como la rejilla 422 y las boquillas 424) para fluidizar el material catalizador. Como se indica en la Figura 1, el vapor pirolítico puede fluir en la misma dirección que el gas inerte fluidizante. Sin embargo, como alternativa, el vapor pirolítico puede fluir en dirección opuesta (es decir, hacia abajo), o en cualquier otra dirección, tal como en una dirección horizontal a través de un lecho fluidizado de catalizador. El lecho fluidizado de catalizador puede ser un lecho fluidizado circulante o un lecho fluidizado burbujeante. Como alternativa a un lecho fluidizado de catalizador, se puede usar un lecho móvil de catalizador.

Como ejemplo, la Figura 9 muestra una realización en la que los vapores pirolíticos fluyen hacia abajo a través del lecho 410 de catalizador en el reactor catalítico 400. Además, el catalizador del lecho 410 se mueve gradualmente hacia abajo en el reactor catalítico 400. De esta manera, el vapor pirolítico y el catalizador fluyen simultáneamente en el reactor catalítico 400. Se puede lograr una mezcla suficiente de catalizador y vapor pirolítico, si es necesario, con un diseño mecánico que provoque flujos más turbulentos y la suspensión de partículas deseada en el reactor catalítico 400. Puede influirse en el tiempo de contacto entre el catalizador y el vapor pirolítico, por ejemplo, mediante la altura del reactor catalítico 400 y/o la velocidad de flujo del vapor pirolítico.

Al lado del reactor catalítico 400 está dispuesto un regenerador 420. En el regenerador 420, el catalizador usado se recibe en la parte inferior del regenerador. Durante la regeneración, el catalizador se mueve hacia arriba y se regenera utilizando el gas que contiene oxígeno, tal como aire. Opcionalmente, el catalizador se puede fluidizar en el regenerador utilizando al menos algunos de los gases no condensables (véase la Figura 7). Desde una parte superior del regenerador 420, el catalizador regenerado se transfiere al reactor 400 de catalizador. La transferencia de catalizador entre los reactores 400, 420 puede mejorarse mediante un transportador adecuado, tal como un tornillo (o tornillos).

Con referencia a la Figura 1, el gas inerte fluidizante utilizado en el reactor catalítico 400 puede comprender nitrógeno y/o el gas no condensable (véase la Figura 7). El gas no condensable puede separarse de otros componentes del vapor pirolítico tratado condensando el vapor pirolítico tratado en un condensador 810. El gas inerte fluidizante puede comprender nitrógeno y/o el gas no condensable de tal manera que el gas inerte comprenda como máximo un 10% en volumen de gas que no sea nitrógeno ni el gas no condensable. Preferiblemente, el gas inerte fluidizante comprende como máximo un 1% en volumen de gas que no sea nitrógeno ni el gas no condensable; o el gas inerte consiste en nitrógeno, el gas no condensable. Si el gas inerte fluidizante comprende al menos parte del gas no condensable, el sistema comprende medios 812 para transportar parte del gas no condensable al reactor 400, tal como a las boquillas 424; opcionalmente mezclando el gas no condensable con otro gas inerte antes de alimentarlo al reactor 400 (y las boquillas 424 del mismo).

Además, el lecho fluidizado 410 de catalizador de la Figura 1 está conectado a un regenerador 420 dispuesto para regenerar el catalizador del lecho 410 de catalizador. En tal disposición, parte del material catalizador se transporta desde el lecho 410 de catalizador al regenerador 420. En el regenerador, el material catalizador se regenera como se discutió anteriormente. Desde el regenerador 420, parte del material catalizador regenerado se transporta de vuelta al lecho 410 de catalizador. Parte del catalizador se puede reemplazar agregando algo de catalizador de reposición, permitiendo así mantener el nivel de actividad optimizado del catalizador. Se puede transportar algo de catalizador nuevo al lecho 410 de catalizador con el catalizador regenerado.

Al regenerar el catalizador, los contaminantes se queman y se forma un segundo gas de combustión. Como se indica en las Figuras 1, 2 y 5, en una realización, al menos parte del segundo gas de combustión se transporta desde el regenerador a la caldera 100 de lecho fluidizado. El segundo gas de combustión está caliente, y el calor comprendido por los gases de combustión puede así utilizarse eficazmente con el intercambiador 700 de calor de la caldera. Como alternativa o adicionalmente, el segundo gas de combustión puede transportarse al quemador 500 de carbón o al quemador 600 de gas (Figura 3), siempre que estén presentes. Como se indicó anteriormente, también se puede recuperar así el calor de reacción de los compuestos oxidables del segundo gas de combustión.

En las Figuras 1 y 2, se usa un lecho fluidizado 410 de catalizador. El regenerador 420 puede usarse en el mismo como se discutió anteriormente. En una realización, el catalizador se regenera, y el gas de combustión resultante se transporta de vuelta al proceso, corriente arriba con respecto al reactor 200 de pirólisis o a este último. El sistema comprende una tubería 430 correspondiente (véanse las Figuras 1, 2, 4, 5, 7 y 8).

5 La Figura 4 muestra otra realización del sistema de pirólisis. La realización de la Figura 4 comprende, como el reactor catalítico 400, un reactor catalítico 400 que tiene un lecho estacionario (es decir, fijo) 410 de catalizador. A diferencia de un lecho fluidizado de catalizador (véanse las Figuras 1-3), el material catalizador en el lecho estacionario 410 de catalizador no fluye durante el funcionamiento. Esto proporciona un equipo más simple que un lecho fluidizado de catalizador y, por lo tanto, reduce los costos de inversión.

10 Sin embargo, el lecho de catalizador no puede regenerarse al mismo tiempo que se usa para tratar catalíticamente los vapores pirolíticos crudos. También en tal realización, el vapor pirolítico puede fluir en cualquier dirección a través del lecho de catalizador.

En la realización de la Figura 4, el proceso de pirólisis puede detenerse durante el tiempo en que el material catalítico del lecho 410 de catalizador se esté regenerando. Como alternativa, se puede eludir el lecho de catalizador y se puede producir aceite de pirólisis rápida. Se observa que toda la caldera 100 de lecho fluidizado puede funcionar todo el tiempo; solo la pirólisis (o al menos la mejora catalítica) debe detenerse para la regeneración del catalizador. Esto se puede lograr simplemente deteniendo la alimentación de material al reactor 200 de pirólisis y/o deteniendo el flujo de vapor de pirólisis crudo desde el reactor 200 de pirólisis al reactor catalítico 400. Por lo tanto, una realización de un método para producir vapores pirolíticos tratados comprende durante un primer tiempo producir el producto de vapor de pirólisis tratado; y durante un segundo tiempo regenerar el material catalizador del lecho 410 de catalizador, siendo el primer tiempo diferente del segundo. Además, en una realización, los vapores pirolíticos no se tratan catalíticamente durante el segundo tiempo. En la regeneración se forma un segundo gas de combustión. El segundo gas de combustión puede transportarse a la caldera 100 de lecho fluidizado, tal como al horno de la misma, o a un quemador 500 de carbón o un quemador 600 de gas (véase la Figura 3). El catalizador puede regenerarse en el reactor catalítico 400; o se puede usar un regenerador 420 separado.

Con referencia a la Figura 5, se puede lograr también un funcionamiento continuo con dos lechos fijos de catalizador. El primer reactor catalítico 400a y el segundo reactor catalítico 400b de la Figura 5 incluyen un primer lecho fijo 410a de catalizador y un segundo lecho fijo 410b de catalizador, respectivamente. Al menos parte del vapor pirolítico crudo en forma de vapor se transporta a través del primer lecho 410a de catalizador que comprende material catalizador sobre un soporte. Al mismo tiempo puede regenerarse el material catalizador del segundo lecho 410b de catalizador. El material catalizador del segundo lecho 410b de catalizador puede regenerarse en el segundo reactor catalítico 400b (como es el caso en la Figura 5) o en un regenerador separado.

Con referencia a la Figura 3, la pirólisis misma puede ser catalítica. Es decir, el reactor 200 de pirólisis puede comprender material catalizador para catalizar la reacción pirolítica que tiene lugar en el reactor 200. La realización de la Figura 3 comprende un quemador 500 de carbón de baja temperatura. El quemador 500 de carbón de baja temperatura se usa para quemar (u oxidar al menos parcialmente) el carbón producido en el reactor 200 de pirólisis. En la realización de la Figura 3, al menos parte del carbón formado en el reactor 200 de pirólisis se transporta desde el reactor 200 de pirólisis al quemador 500 de carbón, y se quema en el mismo. El calor así formado puede recuperarse en el quemador 500 de carbón, al material particulado del quemador 500 de carbón, o con un intercambiador de calor en el quemador 500 de carbón y/o en un quemador 600 de gas.

Como el carbón comprende solo cantidades relativamente pequeñas de residuos quemables, la temperatura dentro del quemador 500 de carbón permanece más baja que en el lecho fluidizado 110 de la caldera 100 de lecho fluidizado. Además, la temperatura del quemador 500 de carbón se puede mantener baja suministrando cantidades subestequiométricas de oxígeno libre (O₂) al quemador 500 de carbón. Esto se indica mediante el texto "un poco de aire" en la Figura 3. En la Figura 3, el quemador 500 de carbón también es un reactor de lecho fluidizado y está dispuesto para suministrar al reactor 200 de pirólisis segundo material particulado resistente al calor calentado. El segundo material particulado puede comprender material catalizador. Los catalizadores adecuados para el segundo material particulado incluyen los mismos catalizadores que los mencionados anteriormente para el lecho 410 de catalizador.

50 La temperatura en el quemador de carbón es preferiblemente como máximo de 700 °C o como máximo de 650 °C. Así, en una realización, el combustible o el material pirolizable que no ha sido tratado térmicamente no se alimenta al quemador 500 de carbón. Naturalmente, el residuo de carbón del reactor 200 de pirólisis puede transportarse al quemador 500 de carbón con el material particulado. Como alternativa, la baja temperatura puede lograrse quemando solo pequeñas cantidades de combustible en el quemador 500 de carbón. Aún más, puede mantenerse baja la cantidad de aire para disminuir la temperatura.

Dado que el quemador 500 de carbón puede tener un bajo contenido de oxígeno libre (O₂), los (terceros) gases de combustión producidos en el mismo pueden tener algunos componentes que puedan oxidarse. Por lo tanto, los terceros gases de combustión pueden transportarse a un quemador 600 de gas separado. Como alternativa, los terceros gases de combustión podrían transportarse a la caldera 100 de lecho fluidizado para quemarlos en la misma.

Además, desde el quemador 600 de gas, los gases de combustión pueden transportarse a la caldera de lecho fluidizado para recuperar calor contenido en los gases de combustión (véase la Figura 3).

5 En la práctica, el quemador 500 de carbón típicamente no produce suficiente cantidad de calor para la pirólisis. Por lo tanto, para controlar la temperatura en el reactor 200 de pirólisis, se puede usar algo del primer material particulado caliente del lecho fluidizado 110 de la caldera 100 de lecho fluidizado para calentar el segundo material particulado. Con referencia a la Figura 3, se puede usar un intercambiador 103 de calor para calentar el segundo material particulado con el calor del primer material particulado. Después del intercambiador 103 de calor, el primer material particulado enfriado puede transportarse de vuelta a la caldera 100.

10 Dado que la cantidad de calentamiento puede ser relativamente baja, en una realización, parte del primer material particulado calentado puede entremezclarse con el segundo material particulado calentado y/o transportarse al reactor 200 de pirólisis. Para equilibrar la cantidad de material o materiales particulados que circulan en el reactor 200 de pirólisis y el quemador 500 de carbón, se puede transportar algo de material particulado desde el quemador 500 de carbón a la caldera fluidizada 100.

15 En la Figura 3, como en la Figura 1, la flecha en el canal 102 indica la transferencia de material particulado resistente al calor calentado desde la caldera 100 de lecho fluidizado, de tal manera que el calor del primer material particulado se utilizará en el reactor 200 de pirólisis. En la Figura 3, el canal 102 está dispuesto para transportar el primer material particulado al intercambiador 103 de calor. En la Figura 3, el canal 502 está dispuesto para transportar el segundo material particulado desde el intercambiador 103 de calor al reactor 200 de pirólisis. En la Figura 3, como en la Figura 1, la flecha en el canal 104 indica la transferencia del primer material particulado resistente al calor de vuelta a la caldera 100 de lecho fluidizado para calentarlo de nuevo.

20 En ausencia del intercambiador 103 de calor, el material o los materiales particulados pueden transferirse indirectamente desde el reactor 200 de pirólisis a la caldera 100. Esta transferencia tiene lugar indirectamente, es decir, a través del canal 504 y el quemador 500 de carbón. Aún más, en ausencia del intercambiador 103 de calor, parte de los materiales particulados pueden transferirse directamente entre la caldera 100 de lecho fluidizado y el reactor 200 de pirólisis.

25 Como es evidente, el quemador 500 de carbón se puede usar en conexión con una caldera de lecho fluidizado burbujeante, como se muestra en la Figura 3, pero también en conexión con una caldera de lecho fluidizado circulante (véase la Figura 2, aunque no se muestre en la misma un quemador 500 de carbón).

30 En la Figura 3, el sistema comprende un canal 502 para transportar segundo material particulado caliente al reactor 200 de pirólisis. La caldera 100 está conectada al intercambiador 103 de calor en el canal 502. La caldera 100 podría conectarse igualmente bien al canal 502 sin el intercambiador de calor. La caldera 100 podría conectarse igualmente bien al canal 504 para transportar segundo material particulado y carbón desde el reactor 200 de pirólisis al quemador 500 de carbón; o a un intercambiador de calor en el canal 504. La caldera 100 podría conectarse igualmente bien al quemador 500 de carbón; o a un intercambiador de calor en el quemador 500 de carbón. En los dos últimos casos (no mostrados en la Figura 3) y en ausencia de un intercambiador de calor, al menos parte del material particulado resistente al calor se transportaría indirectamente, es decir, a través del quemador 500 de carbón, desde la caldera 100 al reactor 200 de pirólisis. En las realizaciones correspondientes a la Figura 3, el primer material particulado se usa para calentar el segundo material particulado que se ha hecho circular desde el quemador 500 de carbón al reactor 200 de pirólisis. Esto puede hacerse a través de un intercambiador de calor, o poniendo parte del primer material particulado en contacto con el segundo material particulado.

35 Para controlar la temperatura del reactor 200 de pirólisis, se puede recuperar calor del reactor 200 de pirólisis con un intercambiador 705 de calor. El calor se puede utilizar, por ejemplo, formando una única circulación de medio de transferencia de calor, comprendiendo la circulación el intercambiador 705 de calor del reactor de pirólisis y el intercambiador 700 de calor de la caldera. Como alternativa, el intercambiador 705 de calor del reactor 200 de pirólisis podría incluirse en otra circulación, por ejemplo para secar biomasa o para calentar el agua de alimentación para la caldera 100.

40 Un beneficio del mejoramiento catalítico de vapores pirolíticos es que, al colocar el reactor catalítico 400 después del reactor 200 de pirólisis, el material catalítico del reactor 400 no está expuesto a impurezas de material pirolizable. Esto es aún más aplicable, ya que los vapores pirolíticos crudos se limpian antes del mejoramiento catalítico. Tales impurezas degradan el catalizador rápidamente. Por lo tanto, preferiblemente se usa un reactor catalítico 400 para los vapores pirolíticos, después del reactor de pirólisis, y después de que se haya limpiado el vapor.

45 Por lo tanto, en una realización, no se usa la pirólisis catalítica. Esto se debe a que los catalizadores se desactivan rápidamente cuando se exponen directamente al material pirolizable que contiene impurezas inorgánicas presentes, por ejemplo, en la biomasa. Se observa que cuando no se usa un quemador 500 de carbón, el reactor 200 de pirólisis está libre o esencialmente libre de materiales catalizadores. Como se indica por ejemplo en la Figura 1, el sistema puede no incluir un quemador 500 de carbón. Por lo tanto, en una realización, el reactor 200 de pirólisis rodea materiales de pirólisis que incluyen material pirolizable y primer material particulado resistente al calor, y los materiales de pirólisis no comprenden ningún material catalizador específico (es decir, cualquiera de los catalizadores

mencionados anteriormente), o ningún material catalizador (por ejemplo, ninguno de los materiales catalizadores mencionados anteriormente). Cuando no se usa un catalizador, el primer material particulado resistente al calor comprende preferiblemente arena. Puede comprender por ejemplo al menos un 90% en peso de arena.

Como puede deducirse de lo anterior, el sistema de las Figuras 1 a 8 comprende al menos

- 5 – un reactor 200 de pirólisis, dispuesto para pirolizar material pirolizable para producir vapores pirolíticos crudos y carbón a partir de material pirolizable,
- una caldera 100 de lecho fluidizado, que puede ser una caldera de lecho fluidizado burbujeante (véase la Figura 1) o una caldera de lecho fluidizado circulante (véase la Figura 2), y
- 10 – un reactor catalítico 400 que tiene un lecho 410 de catalizador, que puede comprender al menos un lecho estacionario, es decir, fijo, de catalizador (véanse las Figuras 4 y 5) o un lecho fluidizado de catalizador (véanse las Figuras 1 y 2).

Además, el sistema comprende varias tuberías adecuadas para transportar vapores pirolíticos (procesados y/o crudos) y canales adecuados para transportar el material particulado resistente al calor; además de tuberías y/o canales para alimentar aire, combustible y biomasa pirolizable. Además, el sistema puede comprender tuberías y/o canales para transportar carbón, coque, gas no condensable y/o fracción rica en agua de un componente del sistema a otro. Tal transporte ha sido discutido anteriormente.

El sistema de las Figuras 1 a 8 comprende opcionalmente por ejemplo

- una disposición 210 de limpieza configurada para eliminar al menos algunos aerosoles y/o partículas sólidas de los vapores pirolíticos crudos para producir vapores pirolíticos limpios,
- 20 – un quemador 500 de carbón de baja temperatura (véase la Figura 3) configurado para regenerar el catalizador usado en el reactor 200 de pirólisis y quemar el carbón formado en el reactor 200 de pirólisis,
- un regenerador 420 configurado para regenerar el catalizador del reactor catalítico 400,
- una tubería configurada para transportar gas de combustión desde el regenerador 420 o el reactor catalítico 400 hasta la caldera 100 de lecho fluidizado, el quemador 500 de carbón o el quemador 700 de gas,
- 25 – un intercambiador 700 de calor dispuesto para recuperar calor de la caldera de lecho fluidizado,
- un intercambiador 705 de calor dispuesto para recuperar calor del reactor 200 de pirólisis, y
- tanto un intercambiador 700 de calor dispuesto para recuperar calor de la caldera de lecho fluidizado como una turbina 710 de vapor dispuesta para energía mecánica para que un generador 720 produzca electricidad utilizando el calor recuperado por el intercambiador 700 de calor (véase la Figura 4).

30 El vapor pirolítico tratado puede ser sometido como tal a un postratamiento con medios 800 para un postratamiento de los vapores, como se indica en las Figuras 6 a 8. Con referencia a la Figura 7, el vapor pirolítico tratado puede condensarse para obtener condensado crudo en un condensador 810. El método comprende condensar al menos parte del producto de vapor pirolítico tratado para obtener un condensado crudo, produciendo así un gas no condensable como producto secundario, y alimentar al menos parte del gas no condensable de vuelta al proceso, corriente arriba con respecto a dicha condensación. El condensado crudo se puede separar (por ejemplo, en un primer separador 815) en dos fases; una fase rica en agua y una fase rica en aceite. Estas fases se pueden separar una de otra, lo que da como resultado agua y condensado seco, es decir, biocrudo (véase la Figura 7). El biocrudo también puede considerarse como un producto del proceso.

40 Por ejemplo, el vapor pirolítico tratado se puede condensar para obtener condensado crudo, y el condensado crudo se puede someter a un postratamiento, como se indica en la Figura 8. Como alternativa, el biocrudo se puede someter a un postratamiento, como se indica en la Figura 8 (véase también la Figura 7). El separador 815 de la Figura 8 es opcional, como se indica mediante las líneas de puntos.

El postratamiento puede incluir al menos uno de los siguientes:

- hidrotratamiento, separación de productos químicos o producción de biomateriales;
- 45 – separación con técnicas conocidas, tales como: filtración, separación de partículas, fraccionamiento, destilación al vacío;
- tratamiento térmico;

- procesamiento en biorrefinería dedicada; o
- coprocesamiento o procesamiento en refinería de petróleo convencional o planta petroquímica.

La calidad de algunos productos pirolíticos puede mejorarse mediante hidrot ratamiento, es decir, un tratamiento catalítico a alta temperatura, a alta presión y con la presencia de una cantidad razonable de hidrógeno.

5 Con referencia a las Figuras 7 y 8, los medios 800 para el postratamiento del vapor pirolítico tratado catalíticamente pueden comprender

- un condensador 810 configurado para condensar al menos parte del vapor pirolítico tratado catalíticamente para obtener un condensado crudo, y

10 – opcionalmente, un primer separador 815 configurado para separar el agua del condensado crudo para producir una fase rica en agua y biocrudo.

Como se muestra en las Figuras 7 y 8, cuando parte del vapor pirolítico tratado catalíticamente se condensa para obtener condensado crudo, no todos los componentes se condensan. De este modo, se producirán gases no condensables como producto secundario. Estos gases no condensables pueden transportarse al reactor catalítico 400 (como se discutió anteriormente y se muestra en las Figuras 7 y 8), el reactor 200 de pirólisis, a la caldera 100 de lecho fluidizado, al quemador 600 de gas (véase la Figura 3), o al quemador 500 de carbón (véase la Figura 3). En una realización, el reactor catalítico 400 del sistema comprende un lecho fluidizado 410 de catalizador, y al menos parte del gas no condensable se usa para fluidizar el catalizador del lecho de catalizador. Así, una realización comprende una tubería 812 para alimentar el gas no condensable desde el condensador 810 al reactor catalítico 400, por ejemplo a las boquillas 424 (véase la Figura 1) para fluidificar el catalizador.

20 Con referencia a la Figura 7, en caso de que se use un condensador 810 para condensar el vapor pirolítico tratado, se puede usar un separador 815 para separar el agua del condensado crudo para obtener biocrudo. Por lo tanto, el biocrudo puede verse como un producto del proceso.

El postratamiento del vapor pirolítico tratado puede seleccionarse de acuerdo con las necesidades de uso o el uso previsto. Los usos del vapor pirolítico tratado y/o el vapor pirolítico sometido a postratamiento incluyen:

- 25 – reemplazo y/o sustitución de combustibles fósiles,
- emulsiones con aceites fósiles en la producción de calor y energía en aplicaciones exigentes tales como el uso doméstico,
- motores de combustión interna, motores de encendido por compresión y turbinas de gas),
- sustitución de combustible para uso marítimo, y
- 30 – uso como productos bioquímicos en aplicaciones tales como impregnación de madera, producción de adhesivos, cosmética e industria alimentaria.

Como es evidente a partir de esta lista, el vapor pirolítico tratado catalíticamente y condensado en forma líquida puede usarse en muchas de tales aplicaciones, donde el producto pirolítico convencional, no tratado, es inutilizable.

REIVINDICACIONES

1. Un método para producir condensado crudo a partir de material pirolizable, comprendiendo el método:
 - quemar combustible en una caldera (100) de lecho fluidizado, produciendo así gas de combustión y calor,
 - calentar un primer material particulado resistente al calor, incluido en un lecho fluidizado (110) de la caldera de lecho fluidizado, con dicho calor,
 - recuperar calor del gas de combustión a un medio de transferencia de calor utilizando un intercambiador (700) de calor dispuesto en la caldera (100) de lecho fluidizado,
 - opcionalmente, calentar un segundo material particulado resistente al calor usando el primer material particulado resistente al calor calentado,
 - transferir al menos parte del primer material particulado resistente al calor calentado o del segundo material particulado resistente al calor calentado a un reactor (200) de pirólisis,
 - transportar material pirolizable al reactor (200) de pirólisis,
 - pirolizar el material pirolizable en el reactor de pirólisis poniendo en contacto el material pirolizable con el primer material particulado resistente al calor calentado o el segundo material particulado resistente al calor calentado, produciendo así al menos vapor pirolítico crudo y carbón,
 - limpiar al menos parte del vapor pirolítico crudo, produciendo así vapor pirolítico limpio,
 - transportar al menos parte del vapor pirolítico limpio en forma de vapor a través de un lecho (410) de catalizador que comprende material catalizador configurado para desoxigenar hidrocarburos oxigenados, siendo la presión parcial de hidrógeno de los vapores en el lecho de catalizador inferior a 0,5 bares, tratando así catalíticamente al menos parte del vapor pirolítico crudo, no alimentándose hidrógeno externo (H₂) al proceso entre el reactor de pirólisis y el lecho de catalizador o al lecho de catalizador,
 - transferir parte del carbón a la caldera de lecho fluidizado o a un quemador de carbón, quemar el carbón en la caldera de lecho fluidizado o el quemador de carbón para producir calor, y recuperar el calor producido al quemar el carbón,
- 25 comprendiendo el método además:
 - condensar al menos parte del producto de vapor pirolítico tratado para obtener un condensado crudo, produciendo así gas no condensable como producto secundario,
 - alimentar al menos parte del gas no condensable de vuelta al proceso, corriente arriba con respecto a dicha condensación,
 - regenerar al menos parte del material catalizador del lecho (410) de catalizador, produciendo así un segundo gas de combustión, y
 - transportar al menos parte del segundo gas de combustión de vuelta al proceso, al reactor catalítico (400) o corriente arriba con respecto al reactor (200) de pirólisis o a este último.
2. El método de la reivindicación 1, en donde
- 35 - la, al menos, parte del gas no condensable se alimenta al reactor catalítico (400) que comprende el lecho (410) de catalizador.
3. El método de la reivindicación 1 o 2, que comprende
- utilizar el calor de un condensador (810) configurado para condensar el vapor pirolítico tratado.
4. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, que comprende
- 40 - producir electricidad usando dicho calor recuperado del gas de combustión a un medio de transferencia de calor.
5. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en donde
- el material catalizador del lecho (410) de catalizador se selecciona de un grupo de catalizadores que tienen funcionalidades de condensación, descarbonilación y descarboxilación.
6. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en donde

- la presión en el reactor (200) de pirólisis es mayor o igual que la presión en el lecho (410) de catalizador; preferiblemente también

- la presión en la caldera (100) de lecho fluidizado es mayor o igual que la presión en el reactor (200) de pirólisis.

7. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en donde

5 - la presión de los vapores en el lecho (410) de catalizador es inferior a 2 bares(a).

8. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, que comprende

- separar agua del condensado crudo produciendo así biocrudo.

9. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, que comprende

10 - pirolizar el material pirolizable de tal manera que el vapor pirolítico crudo, antes del tratamiento catalítico, tenga un primer contenido de átomos de oxígeno unidos a uno o más compuestos condensables que comprendan también hidrógeno y carbono y

- tratar catalíticamente el vapor pirolítico en el lecho (410) de catalizador de tal manera que el producto de vapor pirolítico tratado tenga un segundo contenido de átomos de oxígeno unidos a uno o más compuestos condensables que comprendan también hidrógeno y carbono, en donde

15 - el segundo contenido de oxígeno es menor que el primer contenido de oxígeno, y

- el punto de ebullición de cada compuesto condensable es de al menos 25 °C a una presión de 1 atm;

en donde el primer contenido de oxígeno se refiere al primer contenido de átomos de oxígeno y el segundo contenido de oxígeno se refiere al segundo contenido de átomos de oxígeno.

10. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, que comprende

20 - transferir al menos parte del primer material particulado resistente al calor calentado desde la caldera (100) de lecho fluidizado, directa o indirectamente, al reactor (200) de pirólisis,

- pirolizar el material pirolizable en el reactor (200) de pirólisis poniendo en contacto el material pirolizable con el primer material particulado resistente al calor calentado,

25 - transferir parte del carbón desde el reactor (200) de pirólisis, directa o indirectamente, a la caldera (100) de lecho fluidizado para quemarlo en la misma, y

- quemar parte del carbón en la caldera de (100) lecho fluidizado.

11. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, que comprende

- calentar el segundo material particulado resistente al calor usando el primer material particulado resistente al calor calentado,

30 - transferir al menos parte del segundo material particulado resistente al calor calentado al reactor (200) de pirólisis,

y

- pirolizar el material pirolizable en el reactor (200) de pirólisis poniendo en contacto el material pirolizable con el segundo material particulado resistente al calor calentado.

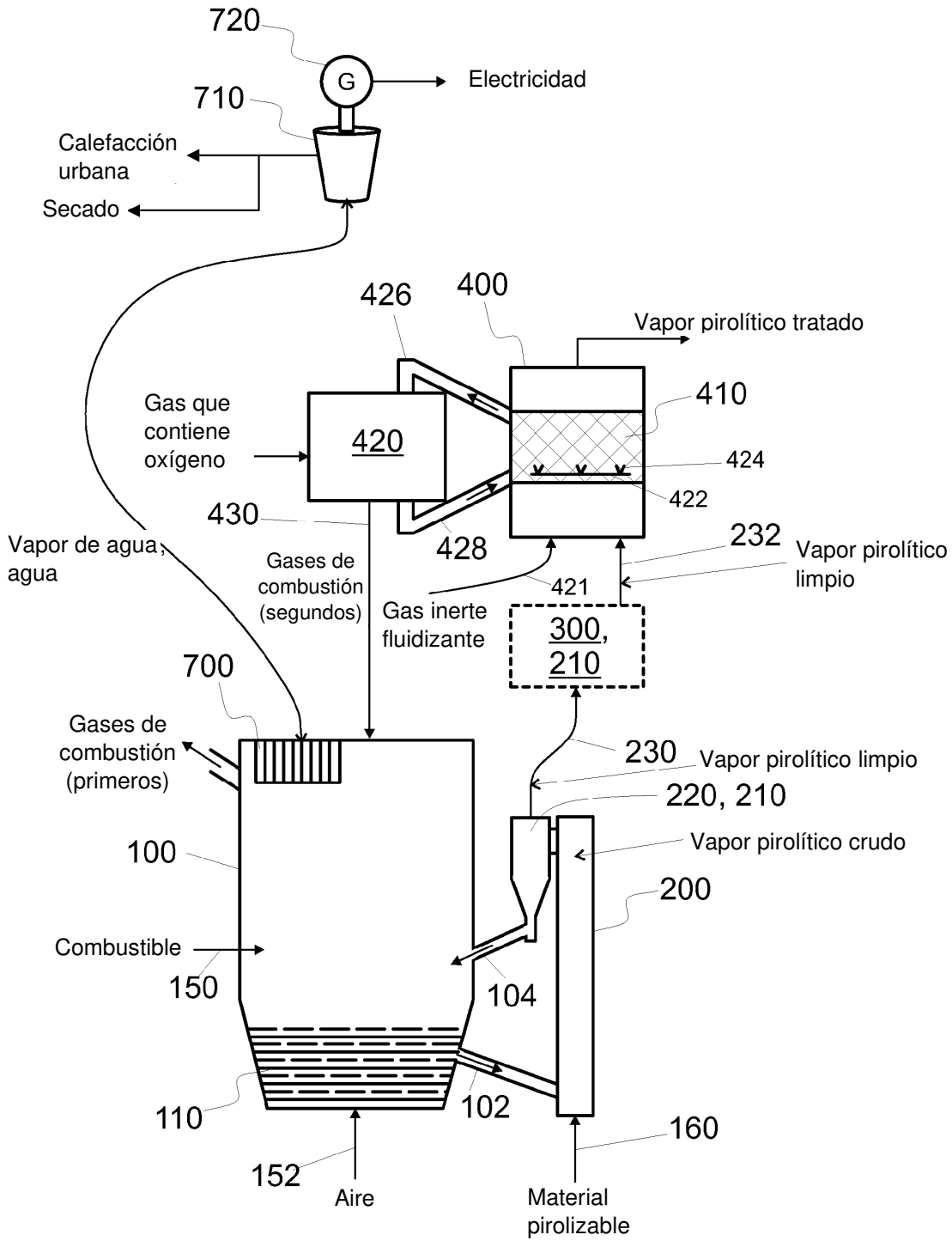


Fig. 1

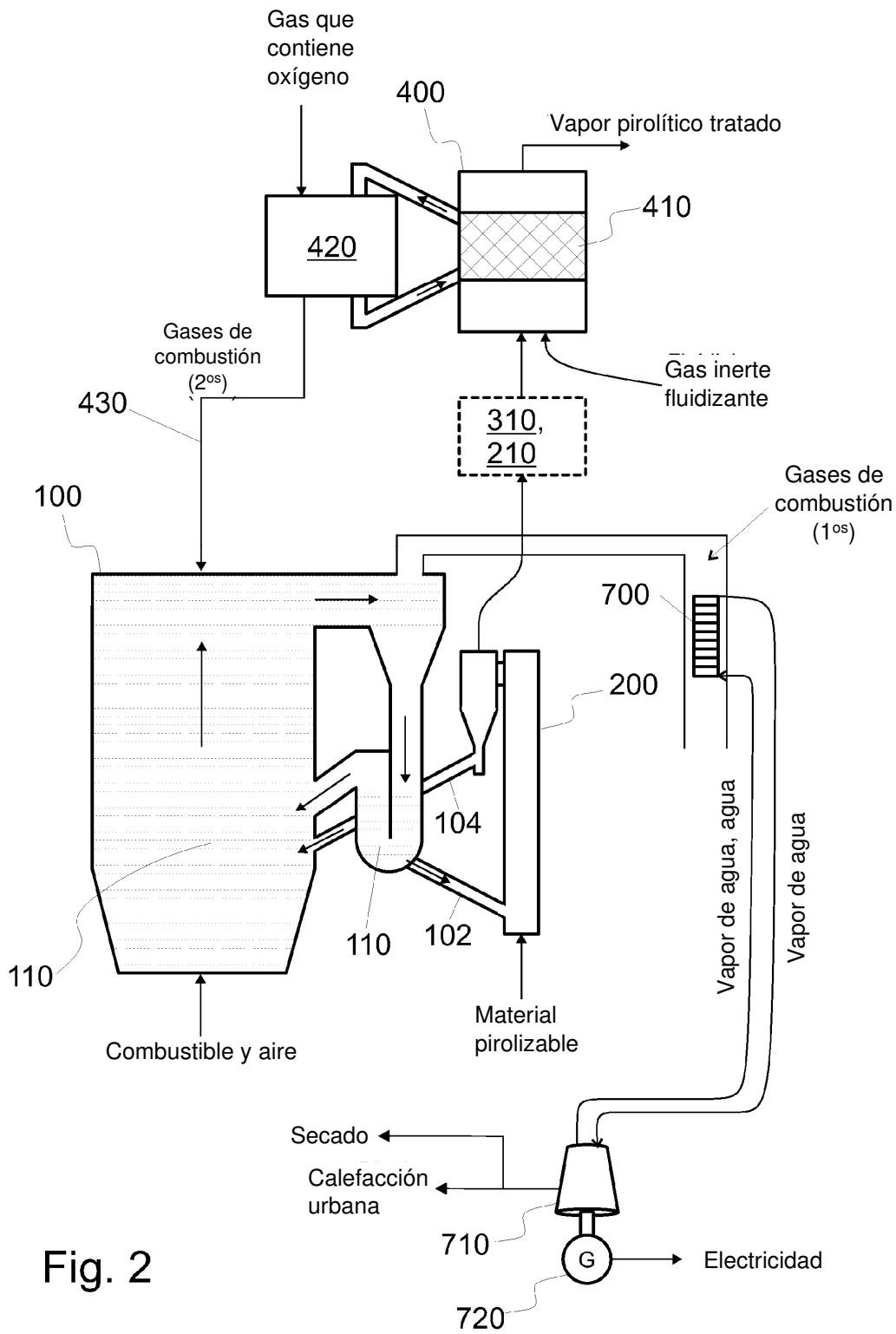


Fig. 2

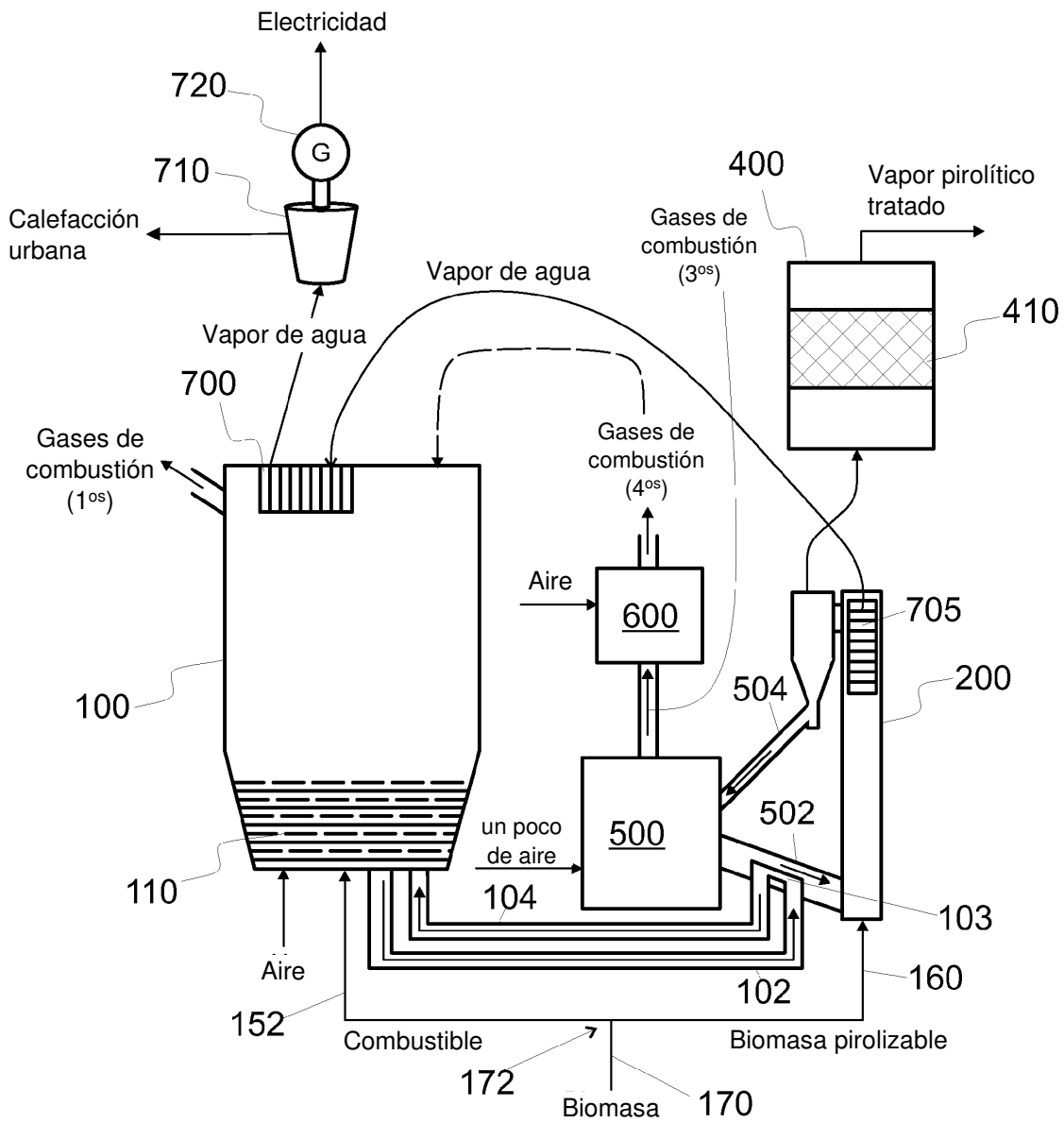


Fig. 3

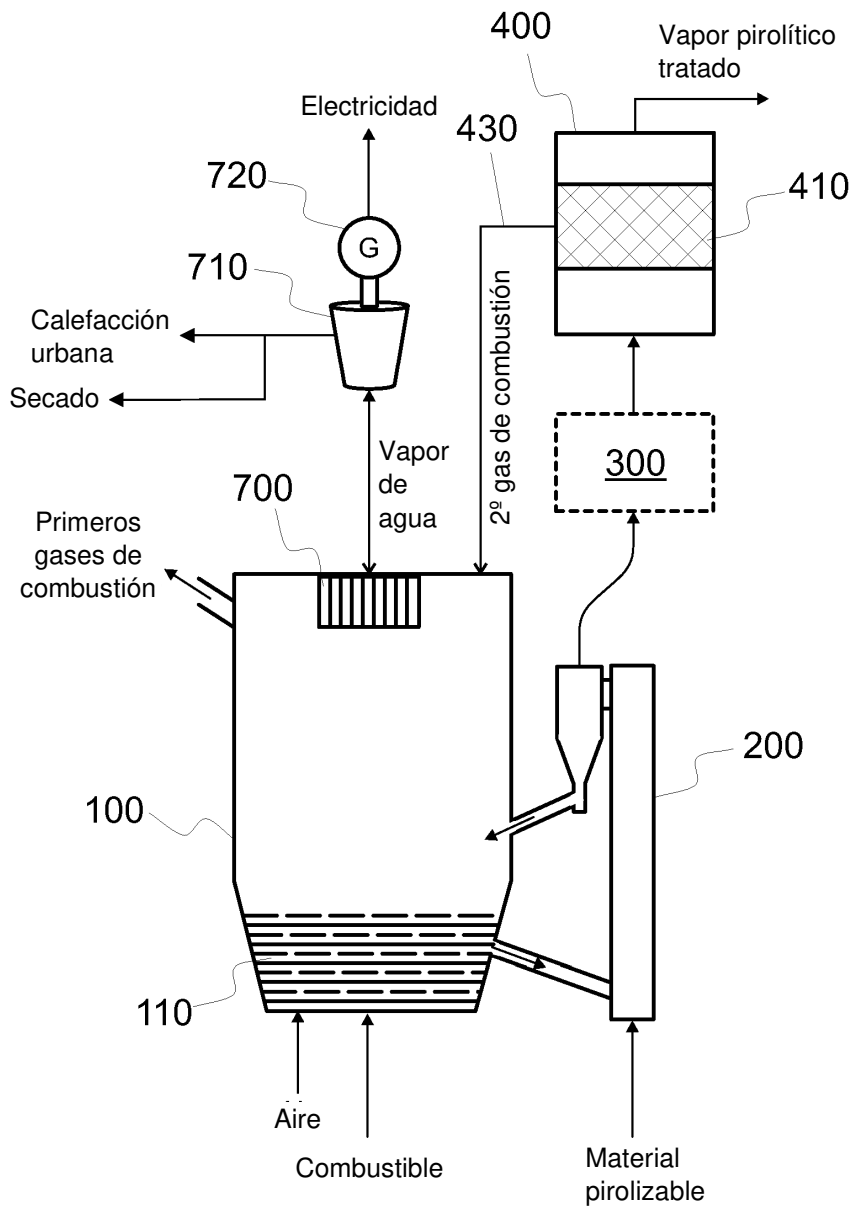


Fig. 4

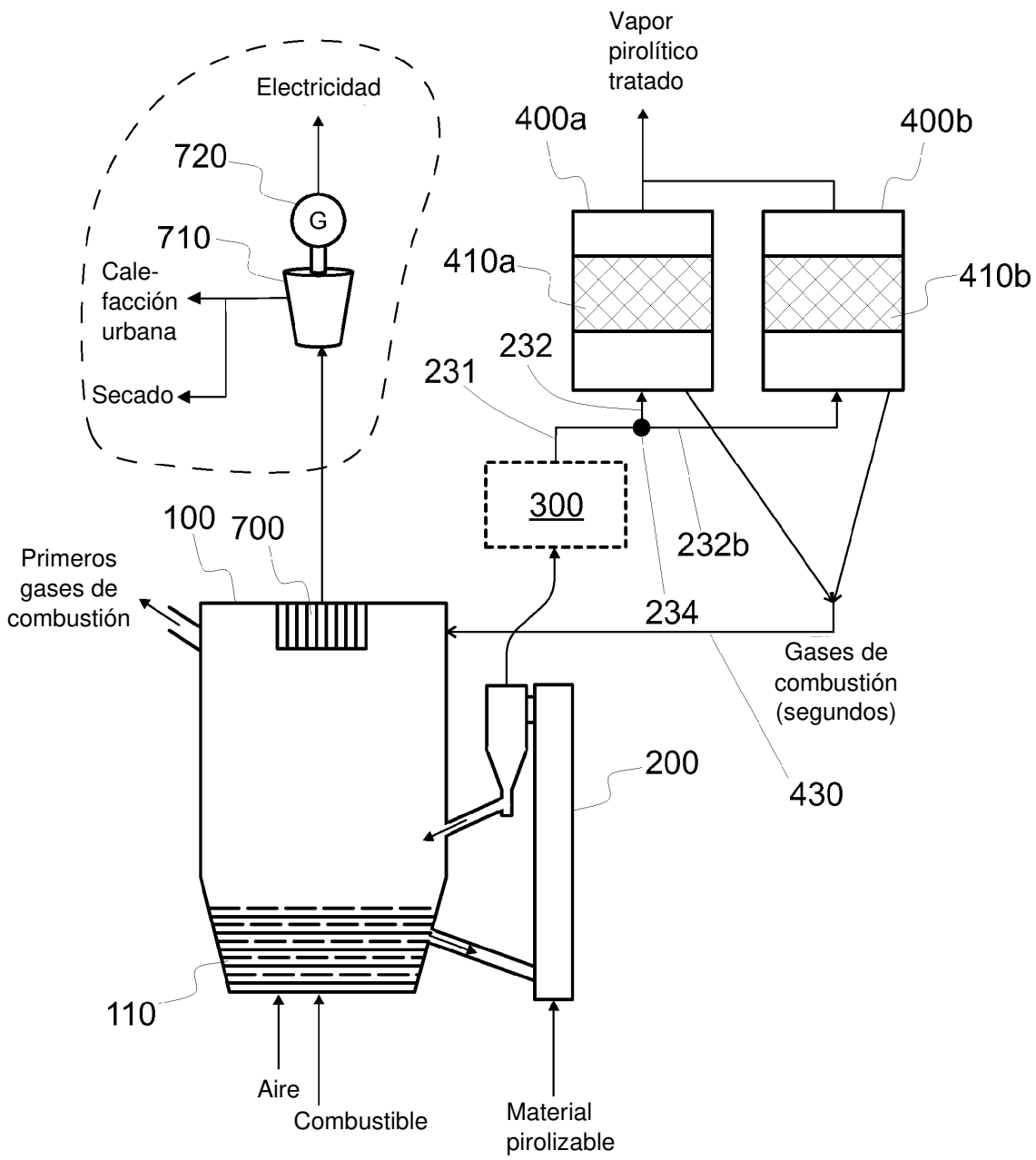


Fig. 5

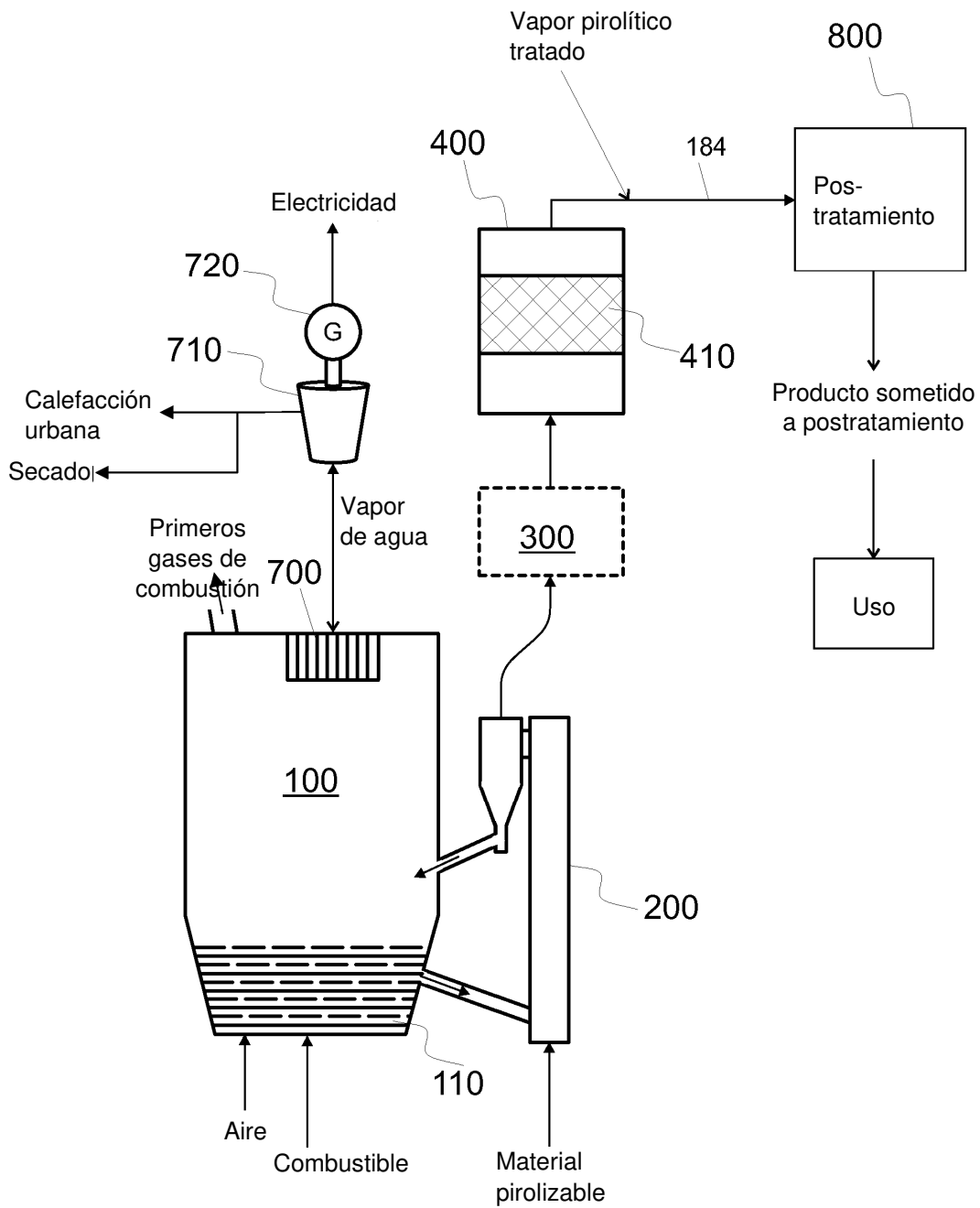


Fig. 6

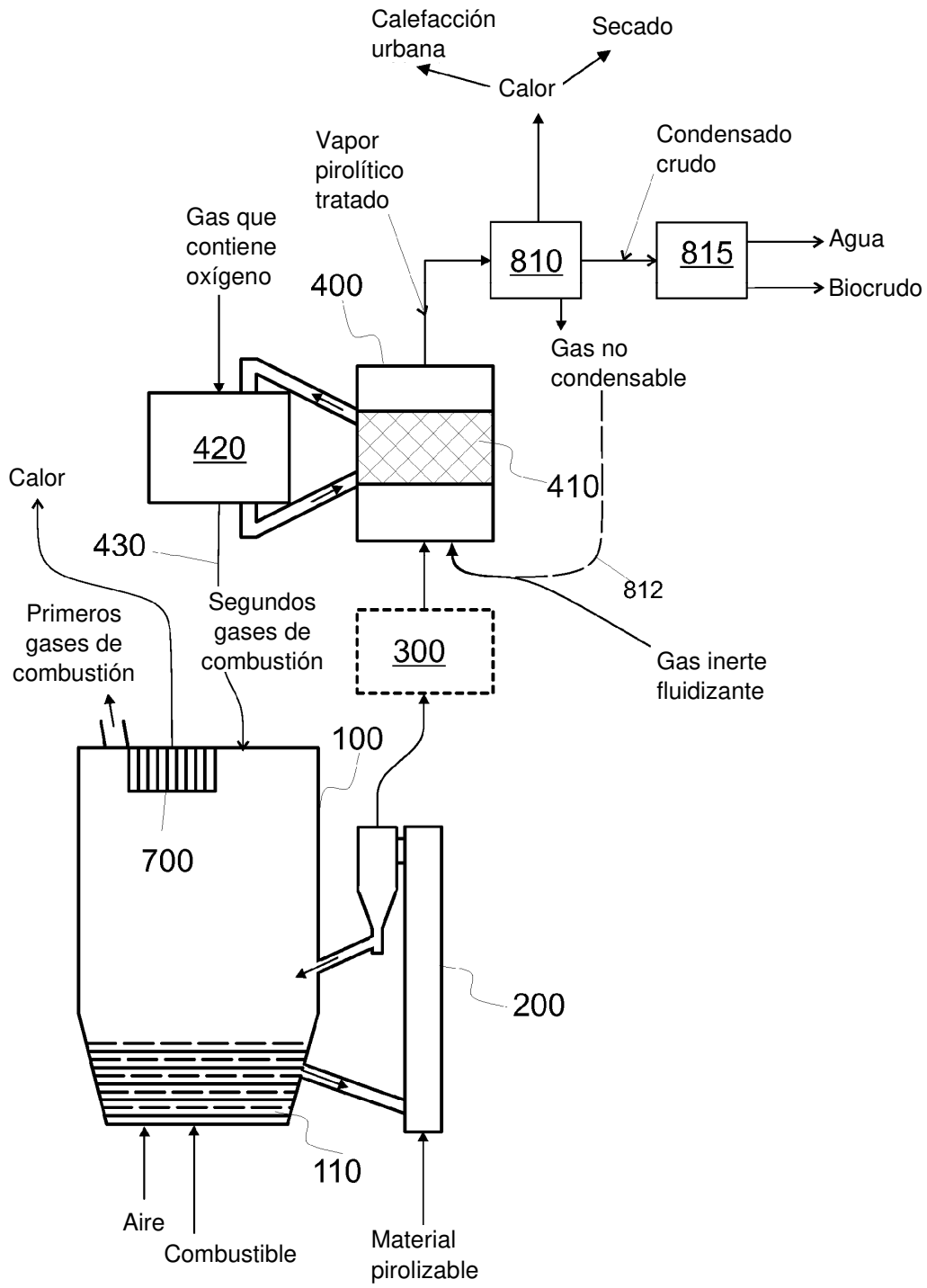


Fig. 7

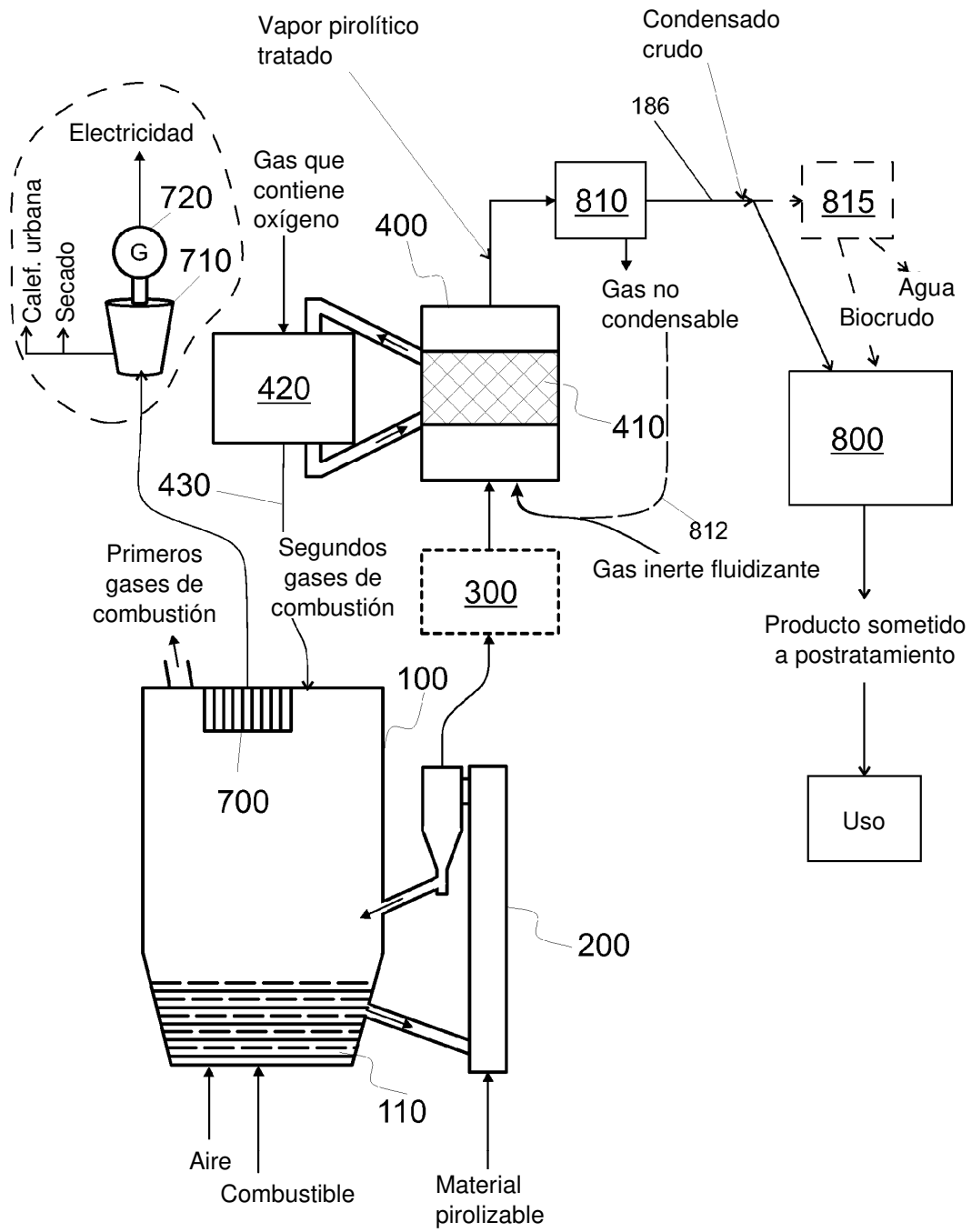


Fig. 8

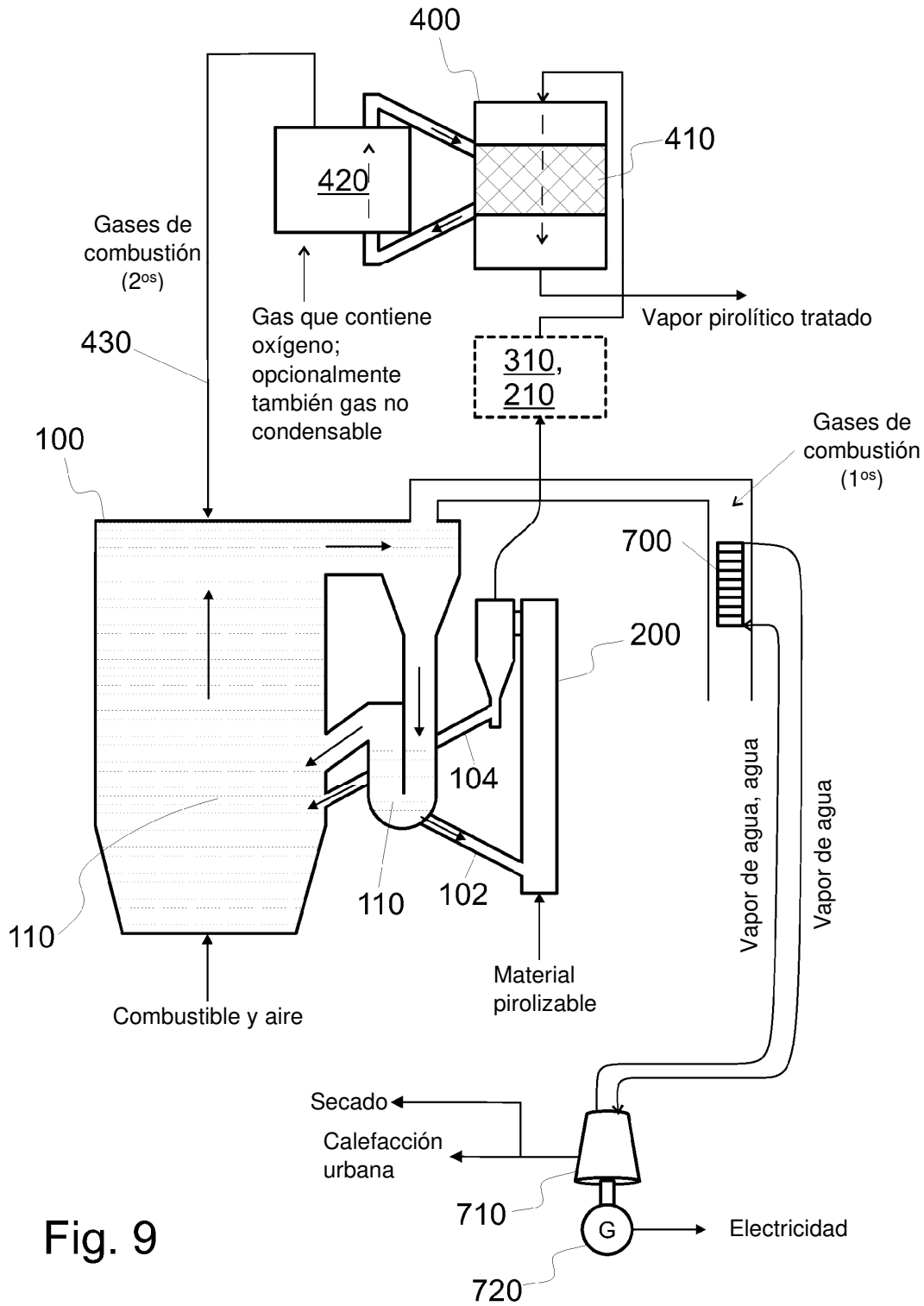


Fig. 9