

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 645 737**

51 Int. Cl.:

**C10J 3/86** (2006.01)

**C10L 9/08** (2006.01)

**C10J 3/78** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **20.08.2012 PCT/EP2012/066198**

87 Fecha y número de publicación internacional: **07.03.2013 WO13030026**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.08.2012 E 12753930 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.09.2017 EP 2748286**

54 Título: **Un procedimiento y un aparato de reacción para la gasificación de biomasa húmeda**

30 Prioridad:

**26.08.2011 NL 1039007**

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

**07.12.2017**

73 Titular/es:

**GENSOS HOLDING B.V. (100.0%)  
Molengraaffsingel 12  
2629 JD Delft , NL**

72 Inventor/es:

**HARINCK, JOHN y  
SMIT, KLAAS GERRIT**

74 Agente/Representante:

**POLO FLORES, Luis Miguel**

ES 2 645 737 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**

Un procedimiento y un aparato de reacción para la gasificación de biomasa húmeda.

5 **[0001]** La presente invención se refiere a un procedimiento para la gasificación de biomasa húmeda. La presente invención también se refiere a un aparato de reacción para la gasificación de biomasa húmeda.

10 **[0002]** La biomasa húmeda, como, por ejemplo, los residuos de instalaciones de fermentación y el estiércol animal, está disponible en grandes cantidades y debe eliminarse. Comprende materiales orgánicos que se pueden convertir en una reacción de gasificación a alta temperatura en un metano o en un gas rico en hidrógeno. El metano y el hidrógeno son combustibles valiosos. De esta manera, la biomasa húmeda puede ser, en principio, una fuente de energía sostenible y respetuosa con el medio ambiente, que no contribuye a la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

15 **[0003]** Además de los materiales orgánicos, la biomasa húmeda comprende minerales y otros materiales inorgánicos, como arena y agua. El agua puede estar presente en una cantidad sustancial. El agua supercrítica es un buen disolvente para muchos materiales orgánicos y un disolvente pobre para minerales y otros materiales inorgánicos. Por lo tanto, se ha sugerido realizar la gasificación de biomasa húmeda en condiciones en las que el agua está presente en la mezcla de reacción como agua supercrítica. Estas condiciones comprenden una temperatura que está por encima de la temperatura crítica del agua, que es de 373,946 °C, y una presión que está por encima de la presión crítica de agua, que es de 22,064 MPa (220,64 bar).

20 **[0004]** En la publicación de E Dinjus y A Kruse, «Hot compressed water - a suitable and sustainable solvent and reaction medium» (J. Phys.: Condens. Matter 16 (2004), p. 1161-1169), los autores describen bajo el título «Gasificación en agua supercrítica» un procedimiento para la gasificación de biomasa húmeda, que comprende el calentamiento de biomasa húmeda en el reactor de gasificación mediante intercambio térmico con un gas de combustión como fluido calefactor.

25 **[0005]** En el documento JP 2007/269945 se describe un procedimiento y un aparato para la gasificación de biomasa, en el que se usa agua supercrítica en un reactor de lecho fluidizado. Antes de introducirla en el reactor de lecho fluidizado, se somete la biomasa a un precalentamiento en un intercambiador de calor usando el calor de las excreciones expulsadas del reactor de lecho fluidizado. Se usa un quemador para calentar el reactor de lecho fluidizado usando una parte del gas de producción, pero se pueden usar otros dispositivos para ese fin.

30 **[0006]** Un funcionamiento eficiente desde el punto de vista energético es una característica importante de un procedimiento de gasificación a alta temperatura. Es deseable mejorar la eficiencia energética de la gasificación en presencia de agua supercrítica.

35 **[0007]** Se ha descubierto que se puede mejorar la eficiencia energética de la gasificación en presencia de agua supercrítica mediante un calentamiento adicional del producto de gasificación fluido que fue retirado de la gasificación y un calentamiento de biomasa húmeda por intercambio térmico con el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente. El producto de gasificación fluido puede calentarse adicionalmente usando energía de una fuente de energía externa.

40 **[0008]** La presente invención se refiere a un procedimiento para la gasificación de biomasa húmeda, que comprende

- el calentamiento de biomasa húmeda a una presión  $P_p$  en el intervalo de 22,1 MPa a 35 MPa (absoluta), a partir de una temperatura máxima de  $T_1$  a una temperatura de al menos  $T_2$ , mediante intercambio térmico con un primer fluido calefactor, un calentamiento, en el que se obtiene un producto de gasificación fluido,
- 50 - el calentamiento adicional del producto de gasificación fluido, en el que se usa energía de una fuente de energía externa, y
- el uso del producto de gasificación fluido calentado adicionalmente como primer fluido calefactor, en el que el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente se enfría a una presión  $P_s$  en el intervalo de 22,1 MPa a 35 MPa (absoluto), a partir de una temperatura de al menos  $T_3$  hasta una temperatura máxima de  $T_4$ ,

en el que  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$  son temperaturas in °C que se pueden calcular usando las fórmulas matemáticas

60 
$$T_1 = 3,2 \times P_p + 301,6,$$

$$T_2 = 3,8 \times P_p + 292,4,$$

$$T_3 = 3,8 \times P_s + 292,4,$$

65 y

## ES 2 645 737 T3

$$T_4 = 3,2 \times P_s + 301,6,$$

en el que  $P_p$  y  $P_s$  denotan las presiones  $P_p$  y  $P_s$ , respectivamente, en MPa.

5 **[0009]** En un modo de realización preferente, un calentamiento adicional del producto de gasificación fluido comprende un intercambio térmico con un segundo fluido calefactor.

**[0010]** La presente invención también se refiere a un aparato de reacción para la gasificación de biomasa húmeda, que comprende

- 10
- un reactor que comprende un tubo de reacción y un primer dispositivo de calentamiento, en el que
    - 15 - el tubo de reacción está configurado para estar conectado de manera fluida a una fuente de biomasa húmeda con una presión  $P_p$  en el intervalo de 22,1 MPa a 35 MPa (absoluta), y
    - el primer dispositivo de calentamiento está configurado para calentar el tubo de reacción y la biomasa húmeda, cuando está presente en el tubo de reacción, mediante intercambio térmico con un primer fluido calefactor para calentar la biomasa húmeda a partir de una temperatura máxima de  $T_1$  a una temperatura de al menos  $T_2$ , y
  - 20 - un segundo dispositivo de calentamiento; el segundo dispositivo de calentamiento está conectado de manera fluida al tubo de reacción y al primer dispositivo de calentamiento y el segundo dispositivo de calentamiento está configurado para recibir el producto de gasificación fluido para calentar el producto de gasificación fluido adicionalmente mediante el uso de energía de una fuente de energía e introducir el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente a una presión  $P_s$  en el intervalo de 22,1 MPa a 35 MPa (absoluta) en el primer dispositivo de calentamiento para su uso como primer fluido calefactor; en ese uso, el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente se enfría a partir de una temperatura de al menos  $T_3$  a una temperatura máxima de  $T_4$ ,
- 25

en el que  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$  son temperaturas en °C que se pueden calcular usando las fórmulas matemáticas

30

$$T_1 = 3,2 \times P_p + 301,6,$$

$$T_2 = 3,8 \times P_p + 292,4,$$

35

$$T_3 = 3,8 \times P_s + 292,4,$$

y

40

$$T_4 = 3,2 \times P_s + 301,6,$$

en el que  $P_p$  y  $P_s$  denotan las presiones  $P_p$  y  $P_s$ , respectivamente, en MPa.

45 **[0011]** El segundo dispositivo de calentamiento también puede denominarse con el término «calentador». En un modo de realización preferente, el segundo dispositivo de calentamiento es un intercambiador de calor, un intercambiador de calor que está conectado de manera fluida al tubo de reacción, al primer dispositivo de calentamiento y a una fuente de un segundo fluido calefactor, y ese intercambiador de calor está configurado para recibir el producto de gasificación fluido del tubo de reacción para calentar el producto de gasificación fluido adicionalmente mediante intercambio térmico con el segundo fluido calefactor y para introducir el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente en el primer dispositivo de calentamiento para su uso como primer fluido calefactor.

50

**[0012]** Por lo tanto, de acuerdo con la presente invención, la energía puede suministrarse desde una fuente de energía, por ejemplo, energía eléctrica de una central eléctrica o calor de un procedimiento de combustión, al procedimiento de gasificación mediante calentamiento adicional del producto de gasificación fluido y mediante el uso del producto de la gasificación calentado adicionalmente como fuente de calor para el calentamiento de biomasa húmeda por encima de la temperatura a la que el agua subcrítica se convierte en agua supercrítica. El calor suministrado por la fuente de energía puede representar al menos una parte del requerimiento de calor neto del procedimiento de gasificación. La invención proporciona una mejora inesperada en la eficiencia energética en relación con el procedimiento conocido, en el que se suministra energía desde la fuente de energía directamente a la biomasa húmeda hasta que la biomasa húmeda se calienta por encima de la temperatura a la que el agua subcrítica se convierte en agua supercrítica. Sin querer limitarse a la teoría, la mejora implica una integración de calor mejorada, que se puede explicar de la siguiente manera. A presiones iguales o superiores a la presión crítica, la capacidad calorífica del agua es sustancialmente mayor en o en torno a la temperatura crítica que a temperaturas alejadas de la temperatura crítica. Por lo tanto, el calentamiento de biomasa húmeda en un intervalo de temperatura en torno a la temperatura crítica del agua requiere sustancialmente más calor que el calentamiento en un intervalo de temperatura de una amplitud similar

55

60

65

más alejada de la temperatura crítica. Lo contrario también es cierto: el enfriamiento en un intervalo de temperatura en torno a la temperatura crítica del agua libera más calor que el enfriamiento en un intervalo de temperatura de una amplitud similar, más alejada de la temperatura crítica. Al aplicar la integración de calor de acuerdo con la invención, se usa la cantidad relativamente grande de calor liberada en torno a la temperatura crítica al enfriar el producto de gasificación que comprende el uso de agua supercrítica para satisfacer el requerimiento de calor relativamente importante en torno a la temperatura crítica al calentar biomasa húmeda. Sin la invención, el calor suministrado desde la fuente de energía puede ser sustancialmente más que el requerimiento de calor neto del procedimiento de gasificación, porque se puede acumular una cantidad de calor relativamente grande en el producto de gasificación que comprende agua supercrítica; esa cantidad relativamente grande de calor puede ser difícil de utilizar de manera eficiente en el procedimiento de gasificación.

**[0013]** A la presión crítica del agua, la temperatura a la que la capacidad calorífica del agua es máxima es aproximadamente igual a la temperatura crítica del agua. Se ha descubierto que la temperatura a la que la capacidad calorífica está al máximo depende en cierto modo de la presión predominante, en el sentido de que el máximo tiende a desplazarse hacia una temperatura más elevada, cuando la presión es mayor. Además, el pico en la capacidad calorífica frente a la curva de temperatura se vuelve más ancho, cuando la presión es más alta. La temperatura a la que la capacidad calorífica es máxima sigue estrechamente una relación lineal con la presión en el intervalo de presión relevante. Por lo tanto, de acuerdo con la presente invención, las temperaturas  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$  se seleccionan en función de las presiones predominantes  $P_p$  y  $P_s$ , de acuerdo con las fórmulas matemáticas como se especifica en el presente documento.

La Fig. 1 proporciona un esquema de un modo de realización de un aparato de reacción y un procedimiento para la gasificación de biomasa húmeda de acuerdo con la presente invención.

La Fig. 2 proporciona un esquema de una parte de un sistema de alimentación para el uso en un modo de realización del procedimiento de gasificación de acuerdo con la invención.

La Fig. 3 proporciona un esquema de un reactor que es apto para el uso en un modo de realización del procedimiento de gasificación de acuerdo con la presente invención.

La Fig. 4 muestra los perfiles de temperatura de un tubo de reacción y un fluido calefactor a lo largo del tubo de reacción con retromezcla y sustancialmente sin retromezcla en el tubo de reacción.

**[0014]** En todas las figuras, los mismos objetos tendrán los mismos números de referencia.

**[0015]** Tal como se usa en el presente documento de patente, el agua supercrítica es agua por encima de su temperatura crítica y por encima de su presión crítica, y el agua subcrítica es agua por debajo de su temperatura crítica y por encima de su presión crítica. Es de conocimiento general que el agua tiene su temperatura crítica a 373,946 °C y su presión crítica a 220,64 bar (22,064 MPa), véase W. Wagner y A. Pruss, "The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use," J. Phys. Chem. Ref. Data, 31(2):387-535, 2002. Como se especifica en el presente documento, la presión es la presión absoluta. El término «producto de gasificación fluido» se usa en el presente documento para diferenciar los productos fluidos (incluidos gaseosos y líquidos) de la reacción de gasificación de productos sólidos, como alquitrán en sales solidificadas.

**[0016]** La biomasa húmeda para su uso en el procedimiento de gasificación puede ser de diversos orígenes. La biomasa húmeda puede consistir, por ejemplo, en residuos de una instalación de fermentación, lodos residuales, lodos de dragado, algas o estiércol animal. Se pueden emplear mezclas de biomásas húmedas de diferentes orígenes. La biomasa húmeda puede o no recibir un tratamiento previo antes de ser introducida en el procedimiento de gasificación. El tratamiento previo puede implicar trituración o corte, por ejemplo, la reducción de tamaño o longitud de los materiales fibrosos en la biomasa húmeda, como hierba, paja o tallos pequeños. Se puede agregar agua a la biomasa húmeda o se puede eliminar el agua de la biomasa húmeda, por ejemplo, para lograr una viscosidad o densidad deseada. El agua se puede eliminar por centrifugación o por sedimentación gravitacional. Se pueden agregar materiales a la biomasa. Por ejemplo, se pueden agregar partículas sólidas a la biomasa húmeda, complementando las partículas sólidas del lecho de partículas sólidas presentes en el reactor.

**[0017]** La biomasa húmeda, tal como se introduce al proceso de gasificación, comprende agua, por ejemplo, en una cantidad de al menos un 40 % del peso, típicamente de al menos un 50 % del peso, más típicamente de al menos un 70 % del peso, con relación al peso total de la biomasa húmeda. En la práctica habitual de la presente invención, el contenido de agua es como máximo un 95 % del peso, sobre la misma base. El contenido de material orgánico es típicamente de al menos un 1 % del peso, más típicamente al menos un 5 % del peso, y típicamente como máximo un 60 % del peso, más típicamente como máximo un 50% del peso, sobre la misma base. El contenido de materiales inorgánicos distintos del agua es típicamente de al menos un 1 % del peso, más típicamente al menos un 3 % del peso, y típicamente como máximo un 80 % del peso, más típicamente como máximo un 60% del peso, sobre la misma base. Los contenidos de materiales orgánicos e inorgánicos se determinan por análisis termogravimétrico (TGA) de acuerdo con la norma ASTM E1131-08.

**[0018]** El procedimiento de gasificación se realiza a alta presión. La biomasa húmeda se puede presurizar e introducir a la reacción de gasificación mediante el uso de un sistema de bombeo. Los sistemas de bombeo elegibles pueden comprender una bomba de alta presión convencional, por ejemplo, una bomba de pistón o una bomba de

membrana. Sin embargo, tales sistemas de bombeo convencionales pueden ser costosos, ya que deben ser robustos y resistentes a la acción de material fibroso, arena y otras partículas sólidas, que pueden estar presentes en la biomasa húmeda y causar abrasión y/o atascamiento.

5 **[0019]** Se ha encontrado ventajoso emplear una bomba de alimentación para bombear biomasa húmeda a baja presión a un cilindro. El cilindro comprende un pistón que se puede desplazar en el sentido axial del cilindro. El pistón, junto con las paredes del cilindro, forman dos cámaras en el interior del cilindro, y esas cámaras están separadas entre sí por el pistón. Cuando se introduce la biomasa húmeda a baja presión en la primera cámara del cilindro y la primera cámara recibe biomasa húmeda, el pistón puede desplazarse en el sentido axial del cilindro, alejándose del punto de introducción de la biomasa húmeda, de modo que aumenta el volumen de la biomasa húmeda de la primera cámara. Como se usa en este documento, el término «baja presión» puede significar una presión inferior a 5 MPa. Una baja presión adecuada puede estar en el intervalo de 0,15 MPa a 5 MPa, más adecuada en el intervalo de 0,2 MPa a 4 MPa, en particular, en el intervalo de 0,3 MPa a 3 MPa. Cuando posteriormente se ejerce una fuerza suficientemente alta sobre el pistón, que hace que el pistón se desplace en la dirección opuesta, el volumen de la primera cámara disminuye y la biomasa húmeda se descarga del primer cilindro a alta presión. Se puede emplear biomasa húmeda descargada a alta presión como alimentación en el procedimiento de gasificación de la presente invención. Como se usa en el presente documento, el término «alta presión» puede significar una presión de al menos 5 MPa, más típicamente de al menos 10 MPa, en particular, de al menos 15 MPa, más en particular de al menos 20 MPa. El experto en la materia apreciará que la fuerza ejercida sobre el pistón será suficientemente alta para adaptar la presión a la que se introduce la biomasa húmeda al reactor, como se especifica a continuación en el presente documento.

15 **[0020]** La biomasa se puede introducir en la primera cámara mediante el uso de una bomba que funciona a baja presión y que puede estar conectada de manera fluida a la primera cámara. Las bombas adecuadas pueden ser, por ejemplo, una bomba sinfín o una bomba de lóbulos. La bomba de alimentación puede estar provista de una trituradora o cortadora en el lado de entrada o en el lado de salida para reducir el tamaño del material fibroso que puede estar presente en la biomasa húmeda.

25 **[0021]** La fuerza que puede ejercerse sobre el pistón puede ser una fuerza mecánica, usando un tornillo o una varilla de pistón. La fuerza es preferentemente una fuerza hidráulica ejercida sobre el pistón mediante el uso de un fluido hidráulico. El fluido hidráulico puede ser un aceite hidráulico, pero se prefiere elegir un líquido acuoso como fluido hidráulico. El líquido acuoso puede ser agua superficial filtrada, por ejemplo, obtenida de un río, un canal o un lago, o puede ser agua del grifo, agua potable, agua desalada o agua destilada. Preferentemente, el líquido acuoso es agua filtrada.

30 **[0022]** El fluido hidráulico se puede introducir a la segunda cámara a alta presión mediante el uso de una bomba hidráulica que puede estar conectada de manera fluida a la segunda cámara. Por ejemplo, la bomba puede ser una bomba de desplazamiento positivo, como una bomba de pistón, que suele denominarse también bomba de émbolo o bomba de membrana. Cuando se introduce la biomasa húmeda en la primera cámara, y el pistón se desplaza en el sentido axial del cilindro, de manera que el volumen de la primera cámara aumenta, el volumen de la segunda cámara disminuye, con la descarga simultánea del fluido hidráulico de la segunda cámara, por ejemplo, a un depósito que también se puede usar para mantener un suministro de fluido hidráulico como alimentación para la bomba hidráulica. El experto en la materia apreciará que la presión a la que se puede introducir el fluido hidráulico en la segunda cámara es igual o superior a la alta presión, típicamente como máximo 2 MPa, en particular, como máximo 1 MPa, más en particular, como máximo 0,5 MPa más elevada que la alta presión. La presión a la que se puede introducir el fluido hidráulico en la segunda cámara puede ser típicamente al menos 0,001 MPa, en particular, al menos 0,01 MPa más elevada que la alta presión.

35 **[0023]** En una disposición paralela, se puede emplear una pluralidad de los cilindros que comprenden el pistón, por ejemplo, dos, tres o cuatro cilindros con pistón. Al emplear una disposición de este tipo, se puede lograr una velocidad de alimentación total más alta y/o una alimentación ininterrumpida o continua. El experto apreciará que el sistema de alimentación tal y como se describe puede emplear válvulas que aseguran que en cualquier momento las diversas corrientes de biomasa húmeda y fluido hidráulico, si están presentes, provienen de la fuente apropiada y encuentran el destino apropiado. Esto se expondrá con más detalle en el análisis de las Figs. 1 y 2 a continuación en el presente documento.

40 **[0024]** Como se expuso anteriormente, se realiza la gasificación de biomasa húmeda en condiciones en las que el agua está presente en la mezcla de reacción como agua supercrítica. Se prefiere convertir el agua subcrítica de la alimentación en agua supercrítica en el interior de un reactor. Por lo tanto, el calentamiento de biomasa húmeda a una presión en el intervalo de 22,1 MPa a 35 MPa (absoluta), a partir de una temperatura máxima de  $T_1$ , como se definió anteriormente en el presente documento, a una temperatura de al menos  $T_2$ , como se definió anteriormente en el presente documento, mediante intercambio térmico con un primer fluido calefactor, se lleva a cabo preferentemente en un reactor.

45 **[0025]** La biomasa húmeda se puede someter a un precalentamiento a la temperatura máxima de  $T_1$ , como se definió anteriormente en el presente documento. El precalentamiento se puede realizar antes de la introducción al reactor. Típicamente, se puede someter la biomasa húmeda a precalentamiento a una temperatura de 370 °C como

máximo, más típicamente de 360 °C como máximo, particularmente de 350 °C como máximo. Típicamente, se puede someter la biomasa húmeda a precalentamiento a una temperatura de al menos 250 °C, más típicamente de al menos 280 °C, preferentemente de al menos 300 °C.

5 **[0026]** De acuerdo con la presente invención, la presión  $P_p$ , como se definió anteriormente en el presente documento, está en el intervalo de 22,1 MPa a 35 MPa. Dentro de este intervalo, la presión  $P_p$  es adecuadamente de al menos 22,5 MPa, preferentemente de al menos 23 MPa, más preferentemente de al menos 25 MPa, y, dentro de este intervalo, la presión  $P_p$  es adecuadamente de 33 MPa como máximo, preferentemente de 32 MPa como máximo, más preferentemente de 30 MPa como máximo.

10 **[0027]** La temperatura de la biomasa húmeda se incrementa seguidamente a partir de una temperatura de  $T_1$  como máximo, como se definió anteriormente en el presente documento, a una temperatura de al menos  $T_2$ , como se definió anteriormente en el presente documento. En un modo de realización más preferente, se incrementa la temperatura de la biomasa húmeda a partir de una temperatura máxima de  $T_1$  hasta una temperatura de al menos  $T_2$ , en el que  $T_1$  y  $T_2$  son temperaturas en °C como se define mediante las fórmulas matemáticas

$$T_1 = 2,9 \times P_p + 306,2 \text{ y } T_2 = 4,1 \times P_p + 287,8,$$

20 en el que  $P_p$  es la presión  $P$  como se definió anteriormente en el presente documento. En un modo de realización más preferente, se incrementa la temperatura de la biomasa húmeda a partir de una temperatura máxima de  $T_1$  hasta una temperatura de al menos  $T_2$ , en el que  $T_1$  y  $T_2$  son temperaturas en °C como se define mediante las fórmulas matemáticas

$$T_1 = 2,6 \times P_p + 310,8 \text{ y } T_2 = 4,4 \times P_p + 283,2,$$

25 en el que  $P_p$  es la presión  $P_p$ , como se definió anteriormente en el presente documento.

30 **[0028]** Típicamente, el aumento de la temperatura de, como máximo  $T_1$  a la temperatura de al menos  $T_2$  es de al menos 10 °C, más típicamente de al menos 20 °C, en particular, de al menos 30 °C. Típicamente, el aumento de la temperatura de como máximo  $T_1$  a la temperatura de al menos  $T_2$  es de 450 °C como máximo, más típicamente de 400 °C como máximo, en particular, de 350 °C como máximo. Típicamente, se incrementa la temperatura de la alimentación a una temperatura de al menos  $T_2$  de al menos 377 °C, más típicamente de al menos 380 °C, en particular, de al menos 400 °C, más en particular, de al menos 420 °C. Típicamente, se incrementa la temperatura de la alimentación a una temperatura de al menos  $T_2$  de 800 °C como máximo, más típicamente, de 760 °C como máximo. A la temperatura de al menos  $T_2$ , como se define en el presente documento, el agua está presente en la biomasa húmeda como agua supercrítica. La temperatura de al menos  $T_2$  se puede seleccionar de manera que las reacciones de gasificación se desarrollen a la velocidad deseada.

40 **[0029]** Cuando se realiza la gasificación en presencia de agua supercrítica, puede haber un problema, dado que los sólidos que se formaron en la formación de agua supercrítica, como sales, ceniza y carbón, tienden a adherirse a la pared interna del reactor y pueden provocar un atascamiento del reactor. Se ha descubierto inesperadamente que este problema puede eliminarse de manera efectiva convirtiendo el agua presente en la biomasa húmeda en agua supercrítica, en presencia de un lecho de partículas sólidas suspendidas en un fluido. Por lo tanto, la biomasa se puede introducir preferentemente a una temperatura por debajo de la temperatura crítica del agua al reactor que comprende el lecho de partículas sólidas, y, posteriormente, dentro del reactor, se puede aumentar la temperatura de la alimentación por encima de la temperatura crítica, de modo que se forma agua supercrítica en presencia del lecho de partículas sólidas.

50 **[0030]** El lecho de partículas sólidas suspendidas en un fluido puede ser preferentemente un lecho fluidizado, típicamente un lecho fluidizado en chorro o un lecho fluidizado circulante, y preferentemente un lecho fluidizado burbujeante. En modos de realización alternativos, el lecho puede ser un lecho fijo.

55 **[0031]** El fluido en el que se suspenden las partículas sólidas es típicamente un fluido acuoso. Dependiendo de la ubicación en el reactor, el fluido acuoso puede comprender agua supercrítica o agua subcrítica. Es decir, cerca de un punto de alimentación de la biomasa húmeda, la temperatura puede estar por debajo de la temperatura crítica del agua, y en otros puntos, la temperatura puede estar por encima de la temperatura crítica del agua. A medida que avanza la gasificación, el fluido también puede comprender productos de gasificación fluidos, en particular, en lugares alejados del punto de alimentación de la biomasa húmeda.

60 **[0032]** Las partículas sólidas suspendidas en el fluido pueden ser partículas que comprenden, por ejemplo, un mineral o un agregado de minerales, como arena, roca triturada o piedra triturada; una sal, por ejemplo, una sal que proviene de biomasa húmeda; metal, como acero inoxidable, cobre o aluminio; o una cerámica cristalina o no cristalina, como un vidrio, una arcilla, una alúmina, una sílice, una sílice-alúmina o mezclas de las mismas. El material de las partículas sólidas puede tener una densidad en un intervalo amplio, por ejemplo, en el intervalo de  $1,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  a  $10 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , más típicamente en el intervalo de  $2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  a  $9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ . Las partículas pueden comprender típicamente partículas con tamaños en el intervalo de 20  $\mu\text{m}$  a 1 mm, en particular, en el intervalo de 50  $\mu\text{m}$  a 0,5 mm,

y el tamaño de las partículas se determina según la norma ISO 13320:2009. Preferentemente, todas las partículas presentan un tamaño en el intervalo especificado. Las partículas sólidas suspendidas pueden desempeñar una doble función en el procedimiento de gasificación, ya que ayudan a evitar que los sólidos se depositen en la pared interior del reactor y, además, pueden actuar como un catalizador en la reacción de gasificación.

**[0033]** Las partículas sólidas se pueden introducir en el reactor junto con la biomasa húmeda. Por ejemplo, al menos una parte de las partículas sólidas puede ser arena que inevitablemente puede estar presente en la biomasa húmeda como uno de sus componentes. De forma alternativa, se pueden agregar partículas sólidas a la biomasa húmeda antes de introducir la biomasa húmeda en el reactor. Las sales disueltas que están presentes en la biomasa húmeda pueden solidificarse en el reactor en y/o después de la formación de agua supercrítica, y dichas sales solidificadas pueden constituir una parte del lecho de partículas sólidas suspendidas. Como una alternativa más, se pueden introducir las partículas sólidas en el reactor separadas de la biomasa húmeda.

**[0034]** El lecho de partículas suspendidas puede tener una fracción de huecos que se selecciona de un intervalo amplio. Típicamente, la fracción de huecos del lecho fluidizado está en el intervalo de 0,05 a 0,95 v/v, en relación con el volumen total del lecho. Cuando el lecho es un lecho fluidizado burbujeante, la fracción de huecos puede estar típicamente en el intervalo de 0,25 a 0,8 v/v, más típicamente en el intervalo de 0,35 a 0,7 v/v, en relación con el volumen total del lecho. Cuando el lecho es un lecho fluidizado en chorro, la fracción de huecos puede estar típicamente en el intervalo de 0,05 a 0,2 v/v, en relación con el volumen total del lecho. Cuando el lecho es un lecho fluidizado circulante, la fracción de huecos puede estar típicamente en el intervalo de 0,08 a 0,95 v/v, en relación con el volumen total del lecho. Como se usa en el presente documento, el volumen total del lecho es el volumen del lecho en las condiciones de temperatura y presión del lecho, y se determina a partir de las dimensiones del reactor y/o las dimensiones de la parte del reactor que contiene el lecho. El volumen vacío se determina restando el volumen de las partículas del volumen del lecho. El volumen de las partículas puede determinarse sumergiendo las partículas presentes en el lecho en agua y determinando el volumen del agua desplazada.

**[0035]** El tamaño del reactor no es esencial. Preferentemente, el tiempo de permanencia en el reactor es lo suficientemente largo para obtener un rendimiento suficiente de productos de gasificación fluidos. Por lo tanto, cuando se efectúa el procedimiento de gasificación en modo continuo, las dimensiones del reactor son preferentemente tales que a un rendimiento deseado se alcance un tiempo de permanencia suficientemente largo. También se desea, para evitar la formación de alquitranes, que en el reactor, o en la parte del reactor que contiene el lecho de partículas sólidas, el ritmo de aumento de la temperatura de la alimentación sea alto. Típicamente, el ritmo de aumento de la temperatura es de al menos 1,5 °C/s, preferentemente de al menos 2 °C/s. En la práctica normal del procedimiento de gasificación, el ritmo de aumento de la temperatura será frecuentemente de 80 °C/s como máximo, más frecuentemente de 50 °C/s como máximo. El ritmo de aumento de la temperatura se determina calculando el cociente del aumento de temperatura y el tiempo promedio de permanencia del fluido en el reactor o en la parte del reactor que contiene el lecho de partículas sólidas. El tiempo promedio de permanencia se determina a partir de experimentos que utilizan un material trazador.

**[0036]** El producto de gasificación fluido puede extraerse del reactor junto con agua supercrítica. El producto de gasificación fluido también puede comprender partículas sólidas arrastradas. Las partículas sólidas arrastradas en el producto de gasificación fluido que sale del reactor se pueden eliminar. El producto de gasificación fluido se puede enfriar y despresurizar, dando como resultado una mezcla de gas/líquido acuoso, y los productos de gasificación gaseosos pueden recuperarse posteriormente de la mezcla de gas/líquido acuoso.

**[0037]** De acuerdo con la presente invención, antes del enfriamiento, se calienta el producto de gasificación fluido adicionalmente. El producto de gasificación fluido calentado adicionalmente se usa como primer fluido calefactor. En general, es suficiente calentar el producto de gasificación fluido adicionalmente para aumentar su temperatura, típicamente un máximo de 200 °C, más típicamente un máximo de 150 °C, por ejemplo, 100 °C. El aumento de la temperatura es típicamente de al menos 10 °C, más típicamente de al menos 20 °C. Se puede aplicar energía eléctrica para lograr un mayor calentamiento. Preferentemente, se calienta el producto de gasificación fluido adicionalmente mediante intercambio térmico con un segundo fluido calefactor. El segundo fluido calefactor puede ser un gas caliente producido en una unidad productora de gas caliente. La unidad productora de gas caliente puede ser, por ejemplo, un quemador de gas, una turbina de gas, un motor de gas o una pila de combustible.

**[0038]** Para fines de optimización, se puede mantener el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente a una temperatura elevada durante algún tiempo antes de que se use el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente como primer fluido calefactor, ya que esto tendrá el efecto ventajoso de aumentar el contenido de metano del producto de gasificación fluido. Por lo tanto, el procedimiento de la invención puede comprender el mantenimiento de la temperatura del producto de gasificación fluido calentado adicionalmente como una etapa adicional, típicamente durante un período de al menos 5 minutos, en particular, de al menos 10 minutos, y típicamente durante un período de como máximo 1 hora, en particular, de como máximo 40 minutos. Esto se puede lograr usando un recipiente, preferentemente un recipiente aislado o un recipiente calentado, que puede contener el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente durante el tiempo especificado. En el presente documento, «mantener la temperatura» significa mantener la temperatura típicamente dentro de un margen de más o menos 50 °C, más típicamente dentro de un margen de más o menos 40 °C, en particular, dentro de un margen de más o menos 30 °C.

**[0039]** De acuerdo con la presente invención, la gasificación calentada adicionalmente se usa como primer fluido calefactor, en ese uso, la gasificación calentada adicionalmente se enfría a la presión  $P_s$ , como se definió anteriormente en el presente documento, en el intervalo de 22,1 MPa a 35 MPa. Dentro de este intervalo, la presión  $P_s$  es adecuadamente de al menos 22,5 MPa, preferentemente de al menos 23 MPa, más preferentemente de al menos 25 MPa, y, dentro de este intervalo, la presión  $P_s$  es adecuadamente de 33 MPa como máximo, preferentemente de 32 MPa como máximo, más preferentemente de 30 MPa como máximo. Cuando, el procedimiento de gasificación se lleva a cabo como un proceso continuo, como en los modos de realización preferentes, el producto de gasificación que se está enfriando avanza desde el calentamiento de la biomasa húmeda en el sentido de la corriente, y en ese caso, la presión  $P_s$  es generalmente más baja que la presión  $P_p$ . Típicamente, la presión  $P_s$  es al menos 0,001 MPa, más típicamente al menos 0,01 MPa más baja que la presión  $P_p$ . Típicamente, la presión  $P_s$  es como máximo 10 MPa, más típicamente como máximo 8 MPa más baja que la presión  $P_p$ .

**[0040]** La gasificación calentada adicionalmente se enfría a partir de una temperatura de al menos  $T_3$  hasta una temperatura máxima de  $T_4$ , en la que  $T_3$  y  $T_4$  son temperaturas en °C, como se definió anteriormente en el presente documento. En un modo de realización más preferente, la gasificación calentada adicionalmente se enfría a partir de una temperatura de al menos  $T_3$  hasta una temperatura máxima de  $T_4$ , en la que  $T_3$  y  $T_4$  son temperaturas en °C como se define mediante las fórmulas matemáticas

$$T_3 = 4,1 \times P_s + 287,8,$$

y

$$T_4 = 2,9 \times P_s + 306,2,$$

en el que  $P_p$  es la presión  $P_s$  como se definió anteriormente en el presente documento. En un modo de realización más preferente, la gasificación calentada adicionalmente se enfría a partir de una temperatura de al menos  $T_3$  hasta una temperatura máxima de  $T_4$ , en la que  $T_3$  y  $T_4$  son temperaturas en °C como se define mediante las fórmulas matemáticas

$$T_3 = 4,4 \times P_s + 283,2,$$

y

$$T_4 = 2,6 \times P_s + 310,8,$$

en el que  $P_p$  es la presión  $P_s$  como se definió anteriormente en el presente documento. La temperatura de al menos  $T_3$  puede ser típicamente de al menos 425 °C, en particular, al menos 440 °C, y típicamente de 900 °C como máximo, más típicamente de 850 °C como máximo. La disminución de la temperatura de al menos  $T_3$  a la temperatura máxima de  $T_4$ , típicamente equivale al menos a 10 °C, más típicamente al menos a 20 °C, en particular, al menos a 30 °C. Típicamente, la disminución de la temperatura de al menos  $T_3$  a la temperatura máxima de  $T_4$  es como máximo de 450 °C, más típicamente de 400 °C como máximo, en particular, a de 350 °C como máximo. El producto de gasificación calentado adicionalmente se puede enfriar típicamente a una temperatura de 390 °C como máximo, en particular, de 380 °C como máximo, más en particular, de 370 °C como máximo, o incluso de 360 °C como máximo. Típicamente, puede enfriarse a una temperatura de al menos 300 °C, más típicamente de al menos 320 °C.

**[0041]** De acuerdo con la presente invención, la biomasa húmeda se calienta mediante intercambio térmico con el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente como primer fluido calefactor. En un modo de realización, el intercambio térmico puede comprender el intercambio térmico entre un flujo de la biomasa húmeda y un flujo del producto de gasificación fluido calentado adicionalmente que está en concurrencia con el flujo de la biomasa húmeda. En un modo de realización de este tipo, se selecciona ambas, la temperatura de al menos  $T_3$  y la temperatura máxima de  $T_4$ , preferentemente más altas que la temperatura de al menos  $T_2$ . En un modo de realización preferente, el intercambio térmico comprende el intercambio térmico entre un flujo de la biomasa húmeda y un flujo del producto de gasificación fluido calentado adicionalmente que va contra la corriente del flujo de la biomasa húmeda. Se prefiere el último modo de realización, ya que la temperatura de al menos  $T_3$  puede seleccionarse más alta que la temperatura de al menos  $T_2$  y la temperatura máxima de  $T_4$  puede seleccionarse más alta que la temperatura máxima de  $T_1$ , lo que hace que este último modo de realización sea más eficiente desde el punto de vista energético que el primer modo de realización. Ahora volviendo a las figuras, la Fig. 1 proporciona un esquema de un modo de realización de un aparato de reacción y un procedimiento para la gasificación de biomasa húmeda de acuerdo con la presente invención. El aparato de reacción puede comprender un sistema de alimentación 10, un sistema de calentamiento y reacción 30 y un sistema de recuperación 60.

**[0042]** La biomasa húmeda 11 se puede presurizar e introducir al sistema de calentamiento y reacción 30 mediante el uso de un sistema de bombeo. Se ha encontrado ventajoso emplear la bomba de alimentación 12 para bombear una parte de biomasa húmeda 11 a baja presión al cilindro con el pistón 14, a través de la válvula 16. Como alternativa al uso de la bomba de alimentación 12, se puede introducir la biomasa húmeda hidrostáticamente desde un tanque de almacenamiento. Seguidamente, se puede cerrar la válvula 16. A continuación, se puede descargar la biomasa húmeda a alta presión del cilindro con el pistón 14 a través de la válvula 18 al sistema de calentamiento y reacción 30 mediante el uso de un sistema hidráulico que comprende la bomba hidráulica 20 y las válvulas 22 y 24. La bomba hidráulica 20 puede bombear un fluido hidráulico a través de la válvula 22 a la segunda cámara del cilindro con el



pistón 14, estando cerradas las válvulas 16 y 24. Después de descargar la biomasa húmeda al sistema de calentamiento y reacción 30, puede cerrarse la válvula 18; las válvulas 16 y 24 pueden abrirse y una parte adicional de la biomasa húmeda puede bombearse desde la bomba de alimentación 12 al cilindro 14. Una pluralidad de cilindros con pistones 14 y una pluralidad de válvulas 16, 18, 22 y 24 pueden colocarse en disposición paralela.

**[0043]** La Fig. 2 muestra un cilindro con un pistón 14, que comprende la pared del cilindro 60. El pistón 64 está ubicado dentro del cilindro 62, y es desplazable en el sentido axial AD del cilindro 62. El pistón 64 divide el espacio en el interior del interior del cilindro 62 en una primera cámara 66 y una segunda cámara 68. En general, el pistón 64 puede estar orientado perpendicularmente con respecto a la dirección axial AD. Los conductos pueden conectar de manera fluida la primera cámara 66 a través de la válvula 16 a la bomba de alimentación 12 (Fig. 1) y a través de la válvula 18 al sistema de calentamiento y reacción 30 (Fig. 1). Además, los conductos pueden conectar de manera fluida la segunda cámara 68 a través de la válvula 22 a la bomba hidráulica 20 (Fig. 1) y a través de la válvula 24 a una salida (no se muestra) para fluido hidráulico o a un depósito (no se muestra) para mantener un suministro de fluido hidráulico.

**[0044]** La forma y el tamaño del cilindro 62 no son esenciales para la invención, y se pueden seleccionar de acuerdo con la capacidad de bombeo deseada. El cilindro 62 puede ser típicamente un cilindro circular. El área de la sección transversal interna del cilindro puede estar típicamente en el intervalo de 80 mm<sup>2</sup> a 20 dm<sup>2</sup>, en particular, en el intervalo de 7 cm<sup>2</sup> a 3,2 dm<sup>2</sup>. La carrera del pistón 64 puede estar típicamente en el intervalo de 0,1 m a 3 m, en particular, en el intervalo de 0,2 m a 2,5 m. El grosor de la pared del cilindro puede estar típicamente en el intervalo de 1 mm a 10 cm, en particular, en el intervalo de 1,5 mm a 2 cm. El grosor del pistón 64 puede estar típicamente en el intervalo de 1 mm a 30 cm, en particular, en el intervalo de 1 cm a 20 cm. El cilindro 62 y el pistón 64 pueden estar típicamente fabricados de hierro fundido o acero, o una combinación de los mismos. El cilindro con pistón 14 puede funcionar típicamente a una frecuencia en el intervalo de 0,1 carreras/minuto a 50 carreras/minuto, en particular, una frecuencia en el intervalo de 0,2 carreras/minuto a 20 carreras/minuto, en el que una carrera es un desplazamiento completo del pistón, que incluye un desplazamiento hacia el punto de alimentación de biomasa húmeda y un desplazamiento en sentido opuesto desde el punto de alimentación de biomasa húmeda.

**[0045]** Ahora volviendo a la Fig. 1, en el sistema de calentamiento y reacción 30, el intercambiador de calor 29 puede ser, por ejemplo, un intercambiador de calor de doble tubo o un intercambiador de calor de carcasa y tubo. En el intercambiador de calor 29, se puede someter la biomasa húmeda a precalentamiento a una temperatura inferior a la temperatura crítica de agua, como se expuso anteriormente en el presente documento. A continuación, se puede introducir la biomasa húmeda precalentada en el reactor 32 que comprende el lecho 31 de partículas sólidas suspendidas en un fluido. En el reactor 32, la biomasa húmeda puede calentarse adicionalmente a una temperatura de al menos T<sub>2</sub>, como se expuso anteriormente en el presente documento. Con el fin de calentar la biomasa húmeda, el reactor 32 comprende el primer dispositivo de calentamiento, por ejemplo, una camisa de calentamiento y/o tubos de calentamiento internos a través de los cuales puede fluir un fluido calefactor. Se puede emplear una pluralidad de reactores 32 en paralelo para aumentar la capacidad total del sistema de reacción.

**[0046]** Preferentemente, se puede tratar la corriente 34 del producto de gasificación fluido que sale del reactor 32 para eliminar sólidos arrastrados, que comprenden principalmente sales sólidas. En este modo de realización preferente, el aparato de reacción comprende adicionalmente una unidad de separación, en particular, un ciclón, un separador por gravedad o un dispositivo que comprende placas de impacto, posicionada en la conexión de fluidos que conecta el tubo de reacción con el segundo dispositivo de calentamiento; esa unidad de separación está configurada para eliminar los sólidos arrastrados del producto de gasificación fluido. La eliminación se puede lograr adecuadamente mediante el uso del ciclón 37. Los sólidos 36 pueden descargarse del ciclón 37, por ejemplo, a través de una cámara de esclusa (no se muestra). La eliminación de sólidos en este punto tiene la ventaja de que se requiere menos calor cuando se calienta el producto de gasificación fluido adicionalmente en una etapa de calentamiento siguiente, como se describe a continuación en el presente documento.

**[0047]** De acuerdo con la invención, el producto de gasificación fluido puede calentarse adicionalmente en el segundo dispositivo de calentamiento 35, que puede representarse como intercambiador de calor 35, usando el calor de, por ejemplo, el gas caliente 38 producido en una unidad productora de gas caliente (no se muestra), y para usar el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente como primer fluido calefactor 40 en el reactor 32. Para fines de optimización, se puede incluir un recipiente 39, por ejemplo, un tubo o una disposición de tubos paralelos, que recibe del intercambiador de calor 35 un producto de gasificación fluido calentado adicionalmente. El recipiente 39 proporciona que el producto de gasificación de fluido calentado adicionalmente tenga un tiempo de permanencia aumentado a la temperatura más alta que prevalece en el sistema de calentamiento y reacción 30, lo que tendrá el efecto ventajoso de incrementar el contenido de metano del producto de gasificación fluido. En este modo de realización, el aparato de reacción comprende adicionalmente un recipiente conectado de manera fluida al segundo dispositivo de calentamiento para recibir el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente del segundo dispositivo de calentamiento y conectado de manera fluida al primer dispositivo de calentamiento para introducir el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente al primer dispositivo de calentamiento para usarlo como primer fluido calefactor; ese recipiente está configurado para albergar el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente durante un período de tiempo.

**[0048]** Con o sin el recipiente 39 instalado, se puede incorporar un intercambiador de calor 42 adicional, que transfiere calor desde el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente al producto de gasificación fluido antes de que este último entre al intercambiador de calor 35. De forma alternativa, se puede incorporar el recipiente 39 en la conexión de fluidos entre el intercambiador de calor 42 y el intercambiador de calor 35. En estos modos de realización, el aparato de reacción comprende adicionalmente un intercambiador de calor posicionado en la conexión de fluidos que conecta el segundo dispositivo de calentamiento con el primer dispositivo de calentamiento, y en la conexión de fluidos que conecta el tubo de reacción con el segundo dispositivo de calentamiento; ese intercambiador de calor está configurado para el intercambio térmico entre el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente y el producto de gasificación de fluido.

**[0049]** Se ha encontrado particularmente ventajoso emplear como reactor 32 un reactor como se muestra en la Fig. 3. El reactor que se muestra en la Fig. 3 puede comprender un tubo de reacción 46 y una placa de distribución 47. El primer dispositivo de calentamiento 48 puede representarse, por ejemplo, por una camisa de calentamiento 48 y/o por tubos de calefacción internos (no se muestra). El tubo de entrada 50 para biomasa húmeda puede estar conectado de manera fluida con el intercambiador de calor 29 (Fig. 1). El tubo de salida 52 para el producto de gasificación fluido puede estar conectado de forma fluida al intercambiador de calor 35, opcionalmente a través del intercambiador de calor 42 y/o el ciclón 37 y/o el recipiente 39. Cuando la biomasa húmeda entra a través del tubo de entrada 50, puede tener una temperatura máxima de  $T_1$ , como se definió anteriormente en el presente documento. Cuando el producto de gasificación fluido abandona el reactor 32 a través del tubo de salida 52, se habrá calentado a una temperatura de al menos  $T_2$ , como se especificó anteriormente en el presente documento. El tubo de entrada 54 para el fluido calefactor puede estar conectado de manera fluida con el intercambiador de calor 35, opcionalmente a través del intercambiador de calor 42 y/o el recipiente 39. El tubo de salida 56 para el fluido calefactor puede estar conectado de manera fluida con el intercambiador de calor 29. El tubo de reacción 46 puede contener el lecho de partículas sólidas suspendidas en forma de lecho fluidizado 44, corriente abajo de la placa de distribución 47. Se puede extraer un exceso de partículas sólidas del reactor 32 a través del tubo de rebose 58. El tubo de reacción 46 está adaptado para permitir que la biomasa húmeda pase en la dirección longitudinal del tubo de reacción, y contra la corriente del fluido calefactor que fluye en la camisa de calentamiento 48 y/o en los tubos de calentamiento internos. El reactor 32 puede estar conectado de forma fluida con la cámara de bloqueo 59 con el fin de introducir partículas sólidas en el reactor.

**[0050]** El lecho fluidizado 44 tiene típicamente una longitud de al menos 0,5 m, más típicamente de al menos 1 m. El lecho fluidizado 44 tiene típicamente una longitud de 10 m como máximo, más típicamente de 5 m como máximo. Por ejemplo, la longitud del lecho fluidizado 44 puede ser adecuadamente de 3 m. El área de la sección transversal del lecho fluidizado 44 es típicamente de 1,8 m<sup>2</sup> como máximo, más típicamente de 20 dm<sup>2</sup> como máximo. El área de la sección transversal del lecho fluidizado 44 es típicamente de al menos 1 cm<sup>2</sup>, más típicamente de al menos 2 cm<sup>2</sup>. Por ejemplo, el área de la sección transversal del lecho fluidizado 44 puede ser adecuadamente de 4,5 cm<sup>2</sup>. Preferentemente, el lecho fluidizado 44 tiene la forma de un cilindro circular, que típicamente presenta una relación longitud-diámetro en el intervalo de 5 a 50, más típicamente en el intervalo de 8 a 30. Por ejemplo, la relación longitud-diámetro del lecho fluidizado 44, adecuadamente, puede ser igual a 20. En el lecho fluidizado 44 hay relativamente poca retromezcla, cuando las dimensiones son como se especifica en el presente párrafo, de modo que haya un gradiente de temperatura a lo largo del lecho. Se puede instalar un solo tubo reactor que comprenda un lecho fluidizado que presente las dimensiones especificadas. De forma alternativa, se puede instalar en paralelo una pluralidad de tubos de reacción que comprendan un lecho fluidizado con dimensiones como se especifica. El número de tubos de reacción y lechos fluidizados puede estar en el intervalo de 2 a 20 (inclusive), en particular, en el intervalo de 3 a 10 (inclusive).

**[0051]** Una ventaja de tener un lecho fluidizado 44 en el que hay relativamente poca retromezcla se muestra en la Fig. 4. La Fig. 4 muestra los perfiles de la temperatura  $t$  sobre la longitud  $L$  del lecho y el fluido calefactor, sustancialmente sin retromezcla en el lecho (situación A) y, en comparación, con una retromezcla sustancial en el lecho (situación B). En la situación A, existe un gradiente de temperatura  $C$  en el lecho, que se extiende desde una temperatura de entrada  $t_i$ ; a una temperatura de salida  $t_o$ . En la situación B, como consecuencia de la retromezcla, existe prácticamente la misma temperatura a lo largo del lecho (D), excepto un gradiente de temperatura E pronunciado cerca de la entrada. F y G representan los perfiles de temperatura de los fluidos de calentamiento que pueden adaptar los perfiles de calentamiento de los tubos de reacción en las situaciones A y B, respectivamente. En ambos casos,  $\Delta t$  representa la diferencia de temperatura mínima entre el tubo de reacción y el fluido calefactor. Siendo  $\Delta t$  igual en las situaciones A y B, la diferencia de temperatura  $\Delta t_A$  en la entrada del fluido calefactor en la situación A, es sustancialmente menor que la diferencia de temperatura  $\Delta t_B$  en la entrada del fluido calefactor en la situación B. Esto implica para el procedimiento representado en la Fig. 1 que en el intercambiador de calor 35, el producto de gasificación fluido requiere calentamiento para lograr un aumento de temperatura menor en la situación A que en la situación B, lo que significa que en la situación A se suministra menos calor de la unidad de producción de gas caliente que en la situación B.

**[0052]** Ahora volviendo a la Fig. 1, y también con referencia a la Fig. 3, se puede usar el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente como primer fluido calefactor 40 en el primer dispositivo de calentamiento del reactor 32, por ejemplo, la camisa de calentamiento 48 y/o en los tubos de calentamiento internos (no se muestra). Cuando el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente entra a través del tubo de entrada 54 para su uso como primer fluido calefactor, puede presentar una temperatura de al menos  $T_3$ , como se definió anteriormente en el

presente documento. Cuando el producto de gasificación fluido abandona el reactor 32 a través del tubo de salida 56, se habrá enfriado a una temperatura máxima de  $T_4$ , como se especificó anteriormente en el presente documento. El producto de gasificación fluido puede enfriarse aún más en el intercambiador de calor 29 frente a la biomasa húmeda. El producto de gasificación fluido que abandona el intercambiador de calor 29 puede tener típicamente una temperatura en el intervalo de 20 °C a 150 °C, más típicamente en el intervalo de 40 °C a 120 °C, por ejemplo, de 90 °C.

**[0053]** La recuperación extensa del calor, como puede tener lugar en cualquiera de los intercambiadores de calor 42 y 29 y en el reactor 32, hace que el procedimiento representado en la Fig. 1 sea un procedimiento muy eficiente energéticamente, en el sentido de que la recuperación de calor reduce el suministro de energía neta al procedimiento, en particular, el suministro de energía en el intercambiador de calor 35 por medio del gas caliente 38.

**[0054]** Cuando entra en el sistema de recuperación 60, el producto de gasificación fluido puede despresurizarse a través de la válvula 61 a una presión que se encuentra típicamente en el intervalo de 0,1 MPa a 20 MPa, más típicamente en el intervalo de 0,2 MPa a 15 MPa.

**[0055]** El producto de gasificación fluido despresurizado se puede desgasificar en el desgasificador 62, produciendo una fracción de gas y una fracción líquida. La fracción de gas que comprende gases de alto valor, como hidrógeno y metano, se puede dividir en una corriente de metano y una corriente rica en hidrógeno en, por ejemplo, un separador de membrana 64. La fracción líquida del desgasificador 62 se puede despresurizar adicionalmente a través de la válvula 66, y desgasificar adicionalmente en el desgasificador 68, produciendo una fracción gaseosa que puede comprender dióxido de carbono, metano, hidrógeno e hidrocarburos distintos de metano. La presión corriente abajo de la válvula 66 puede estar típicamente en el intervalo de 0,1 MPa a 5 MPa, más típicamente en el intervalo de 0,2 MPa a 3 MPa. El producto líquido obtenido en el desgasificador 68 es un residuo acuoso que comprende sales. El residuo acuoso se puede tratar en un separador de membrana 70 que produce agua y un residuo acuoso enriquecido en sales.

**REIVINDICACIONES**

1. Un procedimiento para la gasificación de biomasa húmeda, que comprende

- 5 - el calentamiento de biomasa húmeda a una presión  $P_p$  en el intervalo de 22,1 MPa a 35 MPa (absoluta), a partir de una temperatura máxima de  $T_1$  a una temperatura de al menos  $T_2$ , mediante intercambio térmico con un primer fluido calefactor, un calentamiento, en el que se obtiene un producto de gasificación fluido,
- el calentamiento adicional del producto de gasificación fluido, en el que se usa energía de una fuente de energía externa, y
- 10 - el uso del producto de gasificación fluido calentado adicionalmente como primer fluido calefactor, en el que el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente se enfría a una presión  $P_s$  en el intervalo de 22,1 MPa a 35 MPa (absoluta), a partir de una temperatura de al menos  $T_3$  hasta una temperatura máxima de  $T_4$ ,

en el que  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$  son temperaturas en °C que se pueden calcular usando las fórmulas matemáticas

$$T_1 = 3,2 \times P_p + 301,6,$$

$$T_2 = 3,8 \times P_p + 292,4,$$

$$T_3 = 3,8 \times P_s + 292,4,$$

y

$$T_4 = 3,2 \times P_s + 301,6,$$

en el que  $P_p$  y  $P_s$  denotan las presiones  $P_p$  y  $P_s$ , respectivamente, en MPa.

2. Un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la biomasa húmeda se selecciona de residuos de fermentación, lodos residuales, lodos de dragado, algas, estiércol animal y mezclas de los mismos, e incluye agua en al menos un 40 % del peso, con relación al peso total de la biomasa húmeda.

3. Un procedimiento de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en el que  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$  son temperaturas en °C que se pueden calcular usando las fórmulas matemáticas

$$T_1 = 2,9 \times P_p + 306,2,$$

$$T_2 = 4,1 \times P_p + 287,8,$$

$$T_3 = 4,1 \times P_s + 287,8,$$

y

$$T_4 = 2,9 \times P_s + 306,2,$$

en el que  $P_p$  y  $P_s$  denotan las presiones  $P_p$  y  $P_s$  respectivamente, en MPa que tienen valores en el intervalo de 22,1 MPa a 33 MPa.

4. Un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 3, en el que  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$  son temperaturas en °C que se pueden calcular usando las fórmulas matemáticas

$$T_1 = 2,6 \times P_p + 310,8,$$

$$T_2 = 4,4 \times P_p + 283,2,$$

$$T_3 = 4,4 \times P_s + 283,2,$$

y

$$T_4 = 2,6 \times P_s + 310,8,$$

en el que  $P_p$  y  $P_s$  denotan las presiones  $P_p$  y  $P_s$ , respectivamente, en MPa que tienen valores en el intervalo de 22,1 MPa a 32 MPa.

5. Un procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-4, en el que el procedimiento comprende

el calentamiento de la biomasa húmeda logrando un aumento de la temperatura de al menos 10 °C, en particular, en el intervalo de 20 °C to 450 °C, más en particular, en el intervalo de 30 °C a 400 °C.

- 5 6. Un procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-5, en el que el procedimiento comprende el enfriamiento del producto de la gasificación calentado adicionalmente logrando una disminución de la temperatura de al menos 10 °C, en particular, en el intervalo de 20 °C to 450 °C, más en particular, en el intervalo de 30 °C a 400 °C.
- 10 7. Un procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-6, en el que el intercambio térmico comprende el intercambio térmico entre un flujo de la biomasa húmeda y un flujo del producto de gasificación fluido calentado adicionalmente que va contra la corriente del flujo de la biomasa húmeda.
- 15 8. Un procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-7, en el que el calentamiento del producto de gasificación fluido obtenido comprende el intercambio térmico con un segundo fluido calefactor, en particular, un gas caliente.
- 20 9. Un procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-8, en el que el calentamiento adicional del producto de gasificación fluido comprende un calentamiento para lograr un aumento de la temperatura en el intervalo de 10 °C a 200 °C, en particular, en el intervalo de 20 °C a 150 °C.
- 25 10. Un procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-9, en el que el procedimiento comprende, como etapa adicional, mantener la temperatura del producto de gasificación fluido calentado adicionalmente durante un período de al menos 5 minutos, en particular, en el intervalo de 5 minutos a 1 hora, más en particular en el intervalo de 10 minutos a 40 minutos.
- 30 11. Un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 10, en el que mantener la temperatura comprende mantener la temperatura dentro de un margen de más o menos 50 °C, en particular, dentro de un margen de más o menos 40 °C, más en particular, dentro de un margen de más o menos 30 °C.
- 35 12. Un aparato de reacción para la gasificación de biomasa húmeda, que comprende  
 el que  
 - un reactor (32) que comprende un tubo de reacción (46) y un primer dispositivo de calentamiento (48), en el que  
 - el tubo de reacción (46) está configurado para estar conectado de manera fluida a una fuente de biomasa húmeda con una presión  $P_p$  en el intervalo de 22,1 MPa a 35 MPa (absoluta), y  
 - el primer dispositivo de calentamiento (48) está configurado para calentar el tubo de reacción (46) y la biomasa húmeda, cuando está presente en el tubo de reacción (46), mediante intercambio térmico con un primer fluido calefactor para calentar la biomasa húmeda a partir de una temperatura máxima de  $T_1$  a una temperatura de al menos  $T_2$ , y  
 - un segundo dispositivo de calentamiento (35); el segundo dispositivo de calentamiento (35) está conectado de manera fluida al tubo de reacción (46) y al primer dispositivo de calentamiento (48), y ese segundo dispositivo de calentamiento (35) está configurado para recibir el producto de gasificación fluido para calentar el producto de gasificación fluido adicionalmente mediante el uso de energía de una fuente de energía e introducir el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente a una presión  $P_s$  en el intervalo de 22,1 MPa a 35 MPa (absoluta) en el primer dispositivo de calentamiento para su uso como primer fluido calefactor; en ese uso, el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente se enfría a partir una temperatura de al menos  $T_3$  a una temperatura máxima de  $T_4$ ,
- 50 en el que  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$  son temperaturas en °C que se pueden calcular usando las fórmulas matemáticas

$$T_1 = 3,2 \times P_p + 301,6,$$

$$T_2 = 3,8 \times P_p + 292,4,$$

$$T_3 = 3,8 \times P_s + 292,4,$$

55 y

$$T_4 = 3,2 \times P_s + 301,6,$$

en el que  $P_p$  y  $P_s$  denotan las presiones  $P_p$  y  $P_s$ , respectivamente, en MPa.

- 60 13. Un aparato de reacción de acuerdo con la reivindicación 12, en el que el segundo dispositivo de calentamiento

- 5 (35) es un intercambiador de calor (35), un intercambiador de calor que está conectado de manera fluida al tubo de reacción (46), al primer dispositivo de calentamiento (48) y a una fuente de un segundo fluido calefactor, y ese intercambiador de calor (35) está configurado para recibir el producto de gasificación fluido del tubo de reacción (46) para calentar el producto de gasificación fluido adicionalmente mediante intercambio térmico con el segundo fluido calefactor y para introducir el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente en el primer dispositivo de calentamiento (48) para su uso como primer fluido calefactor.
- 10 **14.** Un aparato de reacción de acuerdo con las reivindicaciones 12 o 13, en el que el aparato de reacción comprende adicionalmente una unidad de separación, en particular un ciclón (37), situado en la conexión de fluidos que conecta el tubo de reacción (46) con el segundo dispositivo de calentamiento (35); una unidad de separación que está configurada para eliminar sólidos arrastrados del producto de gasificación fluido.
- 15 **15.** Un aparato de reacción de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 12-14, en el que el aparato de reacción comprende adicionalmente un recipiente (39) conectado de manera fluida al segundo dispositivo de calentamiento (35) para recibir el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente del segundo dispositivo de calentamiento (35) y conectado de manera fluida al primer dispositivo de calentamiento (48) para introducir el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente al primer dispositivo de calentamiento (48) para usarlo como primer fluido calefactor; un recipiente que está configurado para albergar el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente durante un período de tiempo.
- 20 **16.** Un aparato de reacción de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 12-15, en el que el aparato de reacción comprende adicionalmente un intercambiador de calor (42) posicionado en la conexión de fluidos que conecta el segundo dispositivo de calentamiento (35) con el primer dispositivo de calentamiento (48) y en la conexión de fluidos que conecta el tubo de reacción (46) con el segundo dispositivo de calentamiento (35); un intercambiador de calor que está configurado para intercambiar calor entre el producto de gasificación fluido calentado adicionalmente y el producto de gasificación fluido.
- 25

FIG. 1

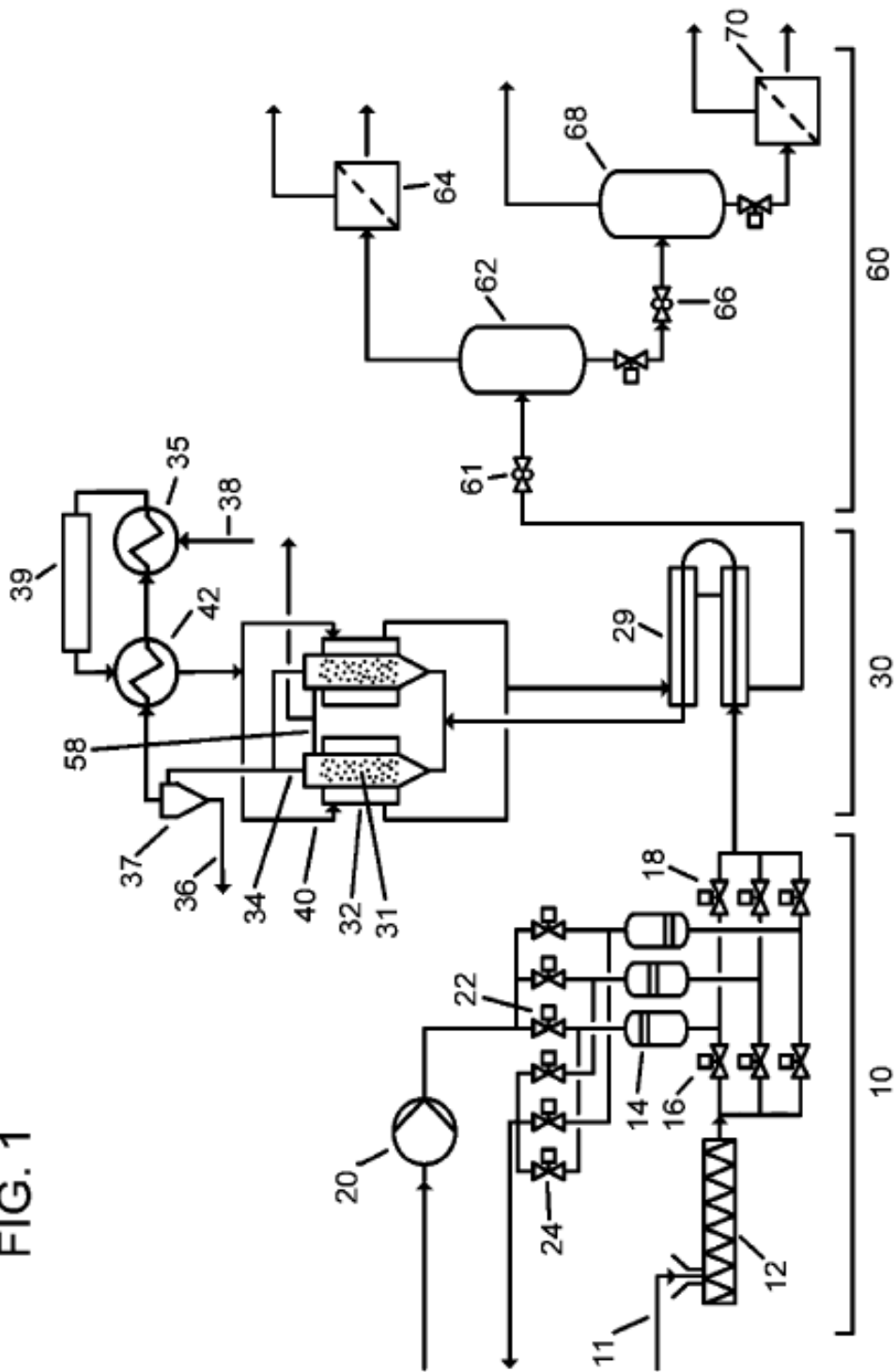


FIG. 2

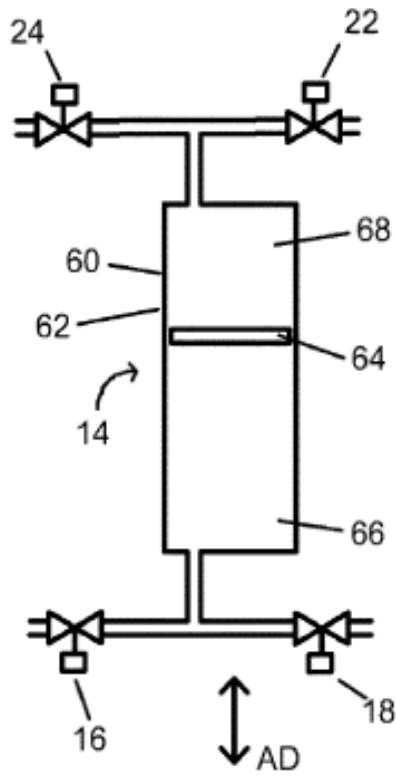


FIG. 3

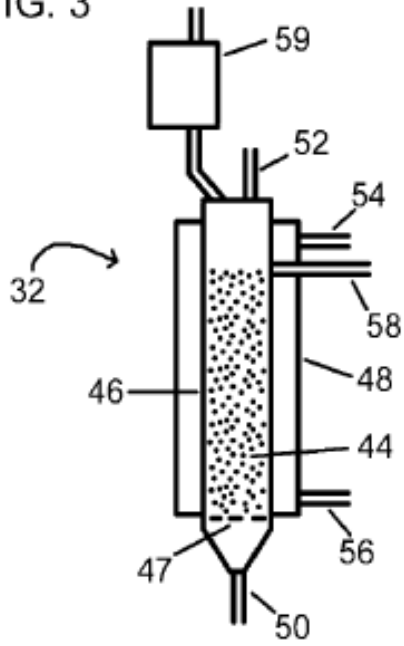




FIG. 4

