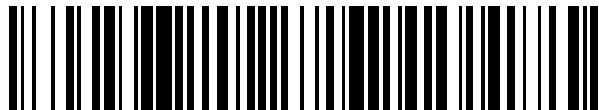


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 630 053**

51 Int. Cl.:

**C08H 8/00** (2010.01)

**C13K 13/00** (2006.01)

**C13K 1/02** (2006.01)

**C10L 1/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **29.09.2010 PCT/IB2010/002591**

87 Fecha y número de publicación internacional: **07.04.2011 WO11039635**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.09.2010 E 10784571 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.05.2017 EP 2483331**

54 Título: **Método y sistema para el fraccionamiento de biomasa lignocelulósica**

30 Prioridad:

**29.09.2009 US 246721 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**17.08.2017**

73 Titular/es:

**NOVA PANGAEA TECHNOLOGIES LIMITED  
(100.0%)**

**92 South Mall  
Cork, IE**

72 Inventor/es:

**NORTH, PETER, HERBERT**

74 Agente/Representante:

**UNGRÍA LÓPEZ, Javier**

ES 2 630 053 T3

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

**DESCRIPCIÓN**

Método y sistema para el fraccionamiento de biomasa lignocelulósica

5 Esta solicitud reivindica prioridad sobre la solicitud de patente provisional de Estados Unidos n.º 61/246.721, presentada el 29 de septiembre de 2009.

**Antecedentes**

10 Actualmente está generalmente aceptado tanto que los combustibles fósiles son limitados como recurso como que causan un aumento neto en las emisiones mundiales de dióxido de carbono, un "gas de efecto invernadero" implicado en un escenario potencial de calentamiento global. Estos combustibles fósiles, en particular el petróleo, son esenciales para la producción de combustibles líquidos de transporte y la gran mayoría de sustancias químicas orgánicas, además de proporcionar una proporción significativa de generación de energía estática.

15 La única fuente alternativa significativa para los combustibles líquidos de transporte y sustancias químicas orgánicas es la biomasa, tal como la biomasa lignocelulósica, y se han dedicado esfuerzos considerables durante muchas décadas para producir procesos eficientes y económicos para la conversión de biomasa en tales combustibles y sustancias químicas.

20 La biomasa lignocelulósica o leñosa está compuesta en gran parte por hemicelulosa, celulosa y lignina. Las fuentes de biomasa lignocelulósica incluyen madera y residuos de madera, residuos agrícolas, tales como la hojarasca de maíz, gramíneas leñosas y residuos residenciales e industriales. Cada uno de los componentes principales de la biomasa lignocelulósica es un material valioso. Por ejemplo, la celulosa está compuesta principalmente por azúcares C6 (glucosa) que pueden procesarse adicionalmente para la producción de etanol, un combustible comercial o recuperarse como azúcar anhidro, levoglucosano o como ácido levulínico y sustancias químicas finas, mezclados con alcoholes superiores y combustibles más valiosos. La hemicelulosa está compuesta por azúcares de C5 o C6, tales como xilosa, arabinosa, galactosa, glucosa y manosa. Estos azúcares también pueden fermentarse a etanol o recuperarse como furfural y otros derivados y procesarse adicionalmente a sustancias químicas finas, alcoholes y otros combustibles comerciales. La lignina es un polímero complejo que puede procesarse adicionalmente a sustancias químicas finas (tal como fenol y aditivos para combustible) o puede utilizarse como combustible directo para la generación de calor y energía para su procesamiento y exportación.

35 El componente de lignina de los materiales de biomasa lignocelulósica da resistencia física a la biomasa y está fuertemente unida a los componentes de hemicelulosa y celulosa. Por lo tanto, aunque es deseable fraccionar la biomasa, la presencia de la lignina dificulta el fraccionamiento y las duras condiciones requeridas para el fraccionamiento pueden resultar en la descomposición de los carbohidratos en productos menos deseables.

40 Varios métodos han intentado eliminar los azúcares de carbohidratos presentes en hemicelulosa y celulosa de la biomasa. Por ejemplo, pueden utilizarse procedimientos bioquímicos y químicos que utilizan enzimas, disolventes, ácido, álcali o agua caliente para intentar disolver los componentes de carbohidratos o lignina de la biomasa lignocelulósica con o sin hidrólisis concomitante. Además, varias formas de pretratamiento, tales como explosión de vapor, agua caliente y procesos ácidos o alcalinos, intentan hacer que los carbohidratos sean accesibles para la separación. Sin embargo, la separación de la biomasa en fracciones y el aislamiento de cada una de estas fracciones, al tiempo que evitan la producción de subproductos y minimizan el consumo de energía (y, por tanto, el coste de producción) sigue siendo difícil.

50 Los procesos descubiertos hasta la fecha para la conversión de biomasa en combustible pueden considerarse generalmente incluidos en una u otra de las dos categorías siguientes. Una categoría es un tratamiento termoquímico de la biomasa entera, sin fraccionamiento o separación de las partes componentes de la biomasa, por medio de pirólisis, gasificación o licuefacción, generando principalmente una mezcla cruda de bioaceite o de gas de síntesis. La otra categoría incluye los pretratamientos físicos y químicos de la biomasa entera, destinados a la destrucción o neutralización (en lugar de separación y recolección) de los componentes volátiles o extraíbles y los componentes hemicelulósicos de la biomasa (que, de otro modo, inhibirían la etapa o etapas siguientes), seguido de una hidrólisis química o microbiológica (enzimática) de los componentes celulósicos y una fermentación microbiológica de los azúcares celulósicos resultantes. También se conocen otros procedimientos que son generalmente de naturaleza química y llevados a cabo en la fase líquida, tal como disolución de disolventes y separación de uno o más de los componentes principales, incluyendo procedimientos de extracción supercríticos. Todos estos procesos se refieren generalmente a la producción de combustible de transporte líquido o a la producción de una sustancia química específica o una gama limitada de sustancias químicas o de productos, tales como cartón comprimido.

**Sumario**

65 En el presente documento se divulgan sistemas, métodos y aparatos para el fraccionamiento de biomasa lignocelulósica. Este fraccionamiento puede usarse para la recuperación y aislamiento de azúcares hemicelulósicos

y celulósicos, incluyendo azúcares de C5 y azúcares de C6, lignina y/u otros componentes de biomasa. El fraccionamiento puede realizarse utilizando procesos continuos, tales como uno o más tubos de vapor continuos, lo que permite una separación rápida y eficiente de los componentes de biomasa.

5 Algunas realizaciones de la presente invención proporcionan funcionalidad de procesamiento termoquímico mejorada. Algunos sistemas reciben la biomasa cruda como materia prima de entrada y producen azúcares hemicelulósicos relativamente puros, azúcares celulósicos y lignina como producto. Algunos sistemas reciben sólido lignocelulósico relativamente puro como entrada y producen tanto azúcares aislados de la hemicelulosa como un sólido de lignina-celulosa relativamente puro como productos. Algunos sistemas reciben un sólido de lignina-celulosa  
10 relativamente puro como entrada y producen tanto azúcares aislados de la celulosa como un carbón de lignina. En algunos sistemas, uno, dos o los tres sistemas tratados en este párrafo pueden incluirse como subsistemas. Cualquiera de los sistemas tratados en este párrafo puede implementarse como procesos de flujo continuo.

15 En algunas realizaciones, la invención incluye un método de fraccionamiento y tratamiento del material de biomasa lignocelulósica que incluye un primer, segundo y tercer reactores de vapor. El método incluye preparar la biomasa reduciendo su tamaño, tratando la biomasa utilizando tratamientos con vapor sobrecalentado y/o EM/EA y alimentando la biomasa tratada en un primer reactor continuo de ciclo de vapor sobrecalentado para separar e hidrolizar hemicelulosa y producir un componente sólido y líquido. El componente líquido incluye hemicelulosa hidrolizada en agua o una mezcla disolvente acuoso y se separa del componente sólido. El método incluye además,  
20 opcionalmente, alimentar la biomasa a un segundo reactor continuo de ciclo de vapor sobrecalentado para reducir el contenido de agua de la biomasa y/o recuperar energía, alimentar el componente sólido a un tercer reactor de vapor sobrecalentado continuo (por ejemplo, un tubo) para separar e hidrolizar el componente de celulosa y volatilizar los productos en la corriente de vapor y separar este de un carbón de lignina y condensar la celulosa hidrolizada y el vapor de agua.

25 En algunas realizaciones, la invención incluye un método para fraccionar el material de biomasa lignocelulósica que incluye alimentar la biomasa a un reactor de desvolatilización para separar y recoger componentes volátiles de la biomasa, alimentar la biomasa a un reactor de hidrólisis de hemicelulosa para separar e hidrolizar hemicelulosa, separar la biomasa en un primer componente sólido y un componente líquido, en el que el componente líquido  
30 incluye hemicelulosa hidrolizada en agua o disolvente y en el que el componente sólido incluye celulosa y lignina y tiene menos de aproximadamente 10 % de hemicelulosa, alimentar el componente sólido a un reactor de hidrólisis de celulosa que comprende un reactor de vapor sobrecalentado para hidrolizar y vaporizar el componente de celulosa y condensar la celulosa vaporizada. En algunas realizaciones, el reactor de hidrólisis de celulosa aplica vapor a la biomasa a una temperatura de al menos 300 °C. En algunas realizaciones, el reactor de hidrólisis de  
35 celulosa aplica vapor a la biomasa a una temperatura entre aproximadamente 400 y 550 °C. El reactor de hidrólisis de celulosa puede aplicar presión a la biomasa a 1-3 bares. En algunas realizaciones, el reactor de hidrólisis de celulosa aplica vapor a la biomasa a una temperatura entre aproximadamente 400 y 550 °C y una presión de 1-3 bares.

40 En algunas realizaciones, la invención incluye un método para aislar celulosa de una biomasa que incluye alimentar una biomasa a un reactor de hidrólisis de celulosa, incluyendo la biomasa lignina y celulosa y menos de aproximadamente 10 % de hemicelulosa, hidrolizar y vaporizar una porción de la celulosa en el reactor de hidrólisis de celulosa, separar la celulosa vaporizada de un sólido de biomasa restante y condensar la celulosa vaporizada. En algunas realizaciones, el método incluye además alimentar la biomasa a un reactor de hidrólisis de hemicelulosa  
45 para separar e hidrolizar hemicelulosa antes de alimentar la biomasa al reactor de hidrólisis de celulosa. En alguna de dichas realizaciones, el método incluye además separar la biomasa en un primer componente sólido y un componente líquido, en el que el componente líquido incluye hemicelulosa hidrolizada en agua o disolvente, en el que el componente sólido incluye celulosa y lignina y menos de 10 % de hemicelulosa y en el que la etapa de alimentar una biomasa a un reactor de hidrólisis de celulosa incluye alimentar el componente sólido al reactor de  
50 hidrólisis de celulosa.

El reactor de hidrólisis de celulosa puede aplicar solo vapor al sólido de biomasa o puede aplicar una mezcla de vapor y otro gas. Por ejemplo, el reactor puede aplicar una mezcla de vapor y nitrógeno, hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono o combinaciones de más de un gas.

55 El reactor de hidrólisis de celulosa también puede aplicar tratamiento electromagnético o electroacústico (EM/EA) a la biomasa. Por ejemplo, el reactor de hidrólisis de celulosa puede aplicar campo eléctrico pulsado, energía ultrasónica, energía de microondas o combinaciones de los mismos a la biomasa en el reactor. En algunas realizaciones, el reactor de hidrólisis de celulosa aplica energía ultrasónica a la biomasa, mientras que en otras realizaciones aplica energía de microondas a la biomasa, mientras que en todavía otras realizaciones aplica energía ultrasónica y de microondas a la biomasa.  
60

Después de la hidrólisis de hemicelulosa y antes de alimentar la biomasa al reactor de hidrólisis de celulosa, los procedimientos de la invención pueden alimentar el componente sólido de la biomasa a un secador para reducir el contenido en agua del componente sólido. En algunas realizaciones, el secador es un reactor continuo de vapor sobrecalentado. En algunas realizaciones, los métodos de la invención pueden incluir desgaste del componente  
65

sólido después de extraerlo del reactor de la hidrólisis de hemicelulosa y antes de alimentar el componente sólido en el reactor de hidrólisis de la celulosa. Por ejemplo, los métodos de la invención pueden incluir secar primero la biomasa y, después, desgastar la biomasa antes de la hidrólisis de la celulosa.

5 El reactor de hidrólisis de celulosa puede hidrolizar completamente la celulosa para producir un vapor de azúcares  
celulósicos y un carbón de lignina. El reactor de hidrólisis de celulosa puede producir un vapor de azúcares  
celulósicos y un segundo componente sólido. El segundo componente sólido puede introducirse en un segundo  
reactor, que puede ser un reactor de vapor sobrecalentado. En algunas realizaciones, el reactor de hidrólisis de  
10 celulosa hidroliza parcialmente la celulosa y el segundo reactor es un segundo reactor de hidrólisis de celulosa que  
completa la hidrólisis de la celulosa y separa el azúcar celulósico vaporizado de la lignina. En otras realizaciones, el  
reactor de hidrólisis de celulosa completa la hidrólisis de la celulosa y el segundo reactor reduce la lignina a un gas  
condensable que puede recuperarse. En el presente documento se divulgan también sistemas para fraccionar el  
material de biomasa lignocelulósica que incluye un medio para liberar componentes volátiles de la biomasa, un  
15 medio para hidrolizar hemicelulosa en la biomasa, un medio para separar la biomasa en un componente sólido y un  
componente líquido, en el que el componente líquido incluye azúcares hemicelulósicos hidrolizados y un medio para  
hidrolizar y vaporizar celulosa. El sistema puede incluir además un medio para secar el componente sólido de la  
biomasa después de la separación del componente sólido y el componente líquido. En alguna de dichas  
realizaciones, el sistema puede incluir además un tensor para atraer el componente sólido después del secado. En  
20 algunas realizaciones, el medio para hidrolizar y vaporizar celulosa incluye un generador electromagnético o  
electroacústico para aplicar tratamiento electromagnético o electroacústico a la biomasa.

En algunas realizaciones, el método incluye la preparación de un material de biomasa lignocelulósica que tiene  
células intactas para fraccionamiento que incluye proporcionar la biomasa, alimentar la biomasa a un reactor de  
vapor sobrecalentado a presión elevada, calentar la biomasa con vapor sobrecalentado al tiempo que se mantiene la  
25 presión elevada para explotar las células de biomasa dentro del reactor de vapor y separar la biomasa explotada del  
vapor. En algunas realizaciones, el calentamiento incluye calentar la biomasa a una temperatura entre  
aproximadamente 150 °C y aproximadamente 190 °C en un plazo de aproximadamente 5 a aproximadamente 10  
segundos. En algunas realizaciones, la temperatura de la biomasa se incrementa a entre aproximadamente 150 °C y  
aproximadamente 190 °C y la presión se mantiene entre aproximadamente 10 y aproximadamente 15 bares. En  
30 algunas realizaciones, el reactor de vapor sobrecalentado comprende una estructura tubular en la que el vapor  
circula de forma continua en un circuito. En alguna de dichas realizaciones, la biomasa fluye a través del reactor  
mientras es arrastrada en el vapor. En algunas realizaciones, el método incluye además aplicar tratamiento EM/EA a  
la biomasa dentro del reactor. El tratamiento EM/EA puede incluir microondas, ultrasonidos, campo eléctrico pulsado  
o una combinación de los mismos.

35 En algunas realizaciones, el método de preparación de un material de biomasa lignocelulósica que tiene células  
intactas para el fraccionamiento incluye, además, liberar componentes volátiles de la biomasa al vapor. El método  
también puede incluir separar los componentes volatilizados del vapor.

40 En algunas realizaciones, el método de preparación de un material de biomasa lignocelulósica que tiene células  
intactas para fraccionamiento incluye también alimentar la biomasa explotada a un reactor de hidrólisis de  
hemicelulosa para hidrolizar hemicelulosa, separar la biomasa en un componente sólido y un componente líquido, en  
el que el componente líquido incluye hemicelulosa hidrolizada y en el que el componente sólido incluye celulosa y  
lignina, y alimentar el componente sólido en un reactor de hidrólisis de celulosa para hidrolizar el componente de  
45 celulosa y separar los azúcares celulósicos de la lignina. El reactor de hidrólisis de hemicelulosa y/o el reactor de  
hidrólisis de celulosa pueden ser reactores continuos de vapor sobrecalentado. En el presente documento también  
se divulgan sistemas para preparar un material de biomasa lignocelulósica que tiene células intactas para  
fraccionamiento que incluyen un reactor de vapor tubular, una entrada de vapor para la entrada de vapor  
sobrecalentado en el reactor de vapor, un ventilador para mover continuamente el vapor a través del reactor, una  
50 entrada para biomasa al interior del reactor de vapor para la entrada del material de biomasa y una salida de  
biomasa dentro del reactor de vapor y aguas abajo de la entrada de biomasa para la eliminación de la biomasa, en el  
que el reactor está diseñado para mantener el vapor a una temperatura y presión suficientes para romper o explotar  
la biomasa a medida que la biomasa pasa entre la entrada de biomasa y la salida de biomasa. Por ejemplo, la  
temperatura puede ser de aproximadamente 150 °C a aproximadamente 190 °C y la presión puede ser de  
55 aproximadamente 10 a aproximadamente 15 bares. El ventilador puede estar diseñado para hacer circular el vapor a  
una velocidad suficiente para que la biomasa sea arrastrada dentro del vapor y que pase desde la entrada a la salida  
en aproximadamente 5 a aproximadamente 10 segundos. En algunas realizaciones, el reactor comprende un circuito  
de vapor en el que el vapor circula continuamente a través del circuito. El sistema puede incluir además una salida  
para separar y eliminar los componentes volátiles de la biomasa liberada por explosión de las células de biomasa.

60 El sistema para preparar un material de biomasa lignocelulósica que tiene células intactas para fraccionamiento  
puede incluir, adicionalmente, una fuente de tratamiento EM/EA entre la entrada y la salida de biomasa, tal como un  
generador de microondas, ultrasonidos, de campo eléctrico pulsado o una combinación de los mismos.

65 Las realizaciones de la invención también incluyen métodos de fraccionamiento de material de biomasa  
lignocelulósica que incluyen alimentar la biomasa a un reactor de desvolatilización, alimentar la biomasa preparada a

- un reactor de hidrólisis de hemicelulosa para separar e hidrolizar hemicelulosa, separar la biomasa en un componente sólido y un componente líquido en el que el componente líquido incluye hemicelulosa hidrolizada en agua o disolvente y en el que el componente sólido incluye celulosa y lignina, alimentar el componente sólido en un reactor de hidrólisis de celulosa para hidrolizar el componente de celulosa y separar la celulosa hidrolizada de la lignina, en el que el tratamiento EM/EA se aplica a La biomasa en el reactor de desvolatilización, el reactor de hidrólisis de hemicelulosa, y/o en el reactor de hidrólisis de celulosa. El tratamiento EM/EA puede incluir microondas, energía ultrasónica, campo eléctrico pulsado o una combinación de los mismos. Las reacciones en los reactores pueden aumentarse, suplementarse o intercalarse con el uso de tratamiento EM/EA.
- En algunas realizaciones, el tratamiento EM/EA se aplica a la biomasa tanto en el reactor de hidrólisis de hemicelulosa como en el reactor de hidrólisis de celulosa. En algunas realizaciones, el tratamiento EM/EA se aplica a un parámetro que incluye frecuencia, forma de pulso, potencia o duración, y uno o más de estos parámetros es ajustable. Los tratamientos EM/EA pueden ayudar a romper (lisis) las células, especialmente a temperaturas bajas, aumentar la tasa de transferencia de calor a lo largo de agregados de células, aumentar la permeabilidad de la membrana celular, degradar o reducir las estructuras poliméricas de hemicelulosa, celulosa y lignina, ayudar en las reacciones hidrolíticas y de otros tipos de los polímeros de carbohidratos y ayudar a la extracción de lípidos, proteínas y componentes no carbohidratos de las células.
- En algunas realizaciones, el reactor de hidrólisis de hemicelulosa es un reactor de tubo de recirculación. En algunas realizaciones, el reactor de hidrólisis de celulosa es un reactor tubular.
- En algunas realizaciones, el reactor de desvolatilización comprende un reactor de vapor sobrecalentado a presión elevada que calienta rápidamente la biomasa con vapor sobrecalentado al tiempo que mantiene la presión elevada para explotar la biomasa dentro del reactor de vapor. En alguna de dichas realizaciones, el tratamiento EM/EA se aplica a la biomasa dentro del reactor de desvolatilización. El método puede incluir además la liberación, separación y eliminación de componentes volátiles de la biomasa en el reactor de desvolatilización.
- En algunas realizaciones, un sistema para fraccionar la biomasa incluye medios para liberar los componentes volátiles de la biomasa, medios para hidrolizar hemicelulosa en la biomasa, medios para hidrolizar y vaporizar celulosa y un generador de EM/EA para aplicar el tratamiento EM/EA a la biomasa en uno o más de los medios anteriores.
- En algunas realizaciones, la invención incluye un sistema para fraccionar material de biomasa lignocelulósica que comprende un primer reactor de circuito de vapor sobrecalentado para explotar la biomasa dentro del circuito de vapor, un segundo reactor de circuito de vapor sobrecalentado para hidrolizar la hemicelulosa, un tercer reactor de circuito de vapor sobrecalentado para reducir el contenido de humedad de la biomasa y un cuarto reactor de vapor sobrecalentado para hidrolizar la celulosa en un vapor y formar un carbón de lignina, en el que la biomasa se transporta de forma continua a través del primer, segundo, tercer y cuarto reactores de vapor.
- En algunas realizaciones, la etapa de hidrólisis de hemicelulosa emplea dos o más etapas de procesamiento continuo. En algunas realizaciones, la etapa de hidrólisis de hemicelulosa incluye pasar la biomasa a un tornillo, extrusión u otro sistema transportador para continuar la hidrólisis de hemicelulosa. La hemicelulosa hidrolizada puede extraerse usando un lavado secuencial de múltiples etapas, con agua o mezclas agua/disolvente y deshidratación a altas presiones. Como alternativa, la hemicelulosa hidrolizada puede extraerse pasando la biomasa a una presión de aproximadamente 1-2 bares y lixiviando con agua o mezclas agua/disolvente. En algunas realizaciones, la hemicelulosa hidrolizada se deshidrata aplicando prensas de tornillo o de extrusión a alta presión a la biomasa. En algunas realizaciones, los sólidos de biomasa residual incluyen celulosa y lignina y menos de 10 % de hemicelulosa. A continuación, los sólidos residuales pueden desgastarse.
- En algunas realizaciones, la energía se recupera en forma de vapor de alta presión, parte de la cual o en su totalidad se sobrecalienta, tal como el vapor portador para la etapa de hidrólisis de celulosa.

#### Breve descripción de las figuras

- Los siguientes dibujos son ilustrativos de realizaciones particulares de la presente invención y, por lo tanto, no limitan el alcance de la invención. Los dibujos no están a escala (a menos que se indique lo contrario) y están destinados para su uso junto con las explicaciones de la siguiente descripción detallada. A continuación se describirán realizaciones de la presente invención junto con los dibujos adjuntos, en los que los mismos números indican elementos similares.

- La figura 1 es un diagrama esquemático de un sistema para la preparación de material lignocelulósico para fraccionamiento;
- La figura 2 es un diagrama esquemático de un sistema alternativo para la preparación de material lignocelulósico para fraccionamiento;
- La figura 3 es un diagrama esquemático de un sistema de desvolatilización;
- La figura 4 es un diagrama esquemático de un reactor de circuito de vapor de flujo continuo para la hidrólisis y

fraccionamiento de hemicelulosa;

La figura 5 es un diagrama esquemático de otra realización de un reactor de circuito de vapor de flujo continuo para la hidrólisis y fraccionamiento de hemicelulosa;

5 La figura 6 es un diagrama esquemático de una realización alternativa de un reactor de circuito de vapor de flujo continuo para la hidrólisis y fraccionamiento de hemicelulosa;

La figura 7 es un diagrama esquemático de otra realización alternativa de un reactor de circuito de vapor de flujo continuo para la hidrólisis y fraccionamiento de hemicelulosa;

10 La figura 8 es un diagrama esquemático de un sistema de termólisis de flujo continuo para la hidrólisis de celulosa y el fraccionamiento de celulosa y lignina;

La figura 9 es un diagrama esquemático de un sistema alternativo de termólisis de flujo continuo para la hidrólisis de celulosa y el fraccionamiento de celulosa y lignina; y

La Figura 10 es un diagrama de flujo de un proceso de fraccionamiento de biomasa.

## Descripción

15 La siguiente descripción detallada es de naturaleza ilustrativa y no pretende limitar el alcance, la aplicabilidad o la configuración de la invención de ninguna manera. En su lugar, la siguiente descripción proporciona ilustraciones prácticas para implementar realizaciones de ejemplo de la presente invención. Se proporcionan ejemplos de construcciones, materiales, dimensiones y procedimientos de fabricación para elementos seleccionados y todos los demás elementos emplean lo que los expertos en el campo de la invención conocen. Los expertos en la materia reconocerán que muchos de los ejemplos proporcionados tienen alternativas adecuadas que pueden usarse.

20 Se pueden utilizar realizaciones de la invención para proporcionar un fraccionamiento completo de la biomasa en todas sus partes constituyentes (tales como volátiles/extraíbles; azúcares hemicelulósicos; azúcares celulósicos; fenoles de lignina; proteínas; sales inorgánicas; etc.), al tiempo que mantiene tanto como sea posible la complejidad estructural de los componentes químicos monoméricos individuales. De este modo, se puede producir una gama muy amplia de productos combustibles de transporte químicos y líquidos de una manera flexible y económica. A partir de estos productos primarios, algunos de los cuales son sustancias químicas de plataforma, se puede recrear la complejidad completa de la actual industria de química orgánica. El bioaceite producido es menos complejo y menos difícil, ya que es principalmente un producto de la hidrólisis y despolimerización de la celulosa, con una contribución mucho menor de otros componentes, en comparación con otros procesos.

25 Además, las realizaciones de la invención se pueden diseñar para proporcionar un proceso continuo de fase de vapor de tiempo de residencia bajo que, por tanto, puede extenderse a escalas muy grandes (tal como 50.000 a 500.000 barriles al día de equivalente de aceite) en un único sitio. Esto garantiza economías de escala y se ajusta a la escala de las refinerías de petróleo. Los productos combustibles pueden producirse, por tanto, en escalas proporcionales a la demanda mundial actual de petróleo de 80 millones de barriles al día y el procesamiento secundario en un complejo de biorrefinería puede ser equivalente a la actual escala de la industria química.

40 Las realizaciones de la invención también pueden incluir la aplicación de tecnologías que no se encuentran generalmente en otros procesos de este tipo. Estas tecnologías pueden usarse para mejorar la transferencia de calor y masa hacia y desde las partículas sólidas de biomasa, las cuales están generalmente limitadas en otros procesos y definen las restricciones en sus capacidades, lo que conduce a mayores rendimientos y tiempos de reacción y residencia reducidos.

45 Como tales, las realizaciones de la invención pueden proporcionar el componente primario de una biorrefinería integrada, de modo que se generan i plataformas de productos químicos y reservas de bases de combustible adecuadas para la síntesis o refinación química adicionales, según sea apropiado.

50 Los métodos y sistemas de la invención incluyen sistemas y procedimientos para fraccionar la biomasa lignocelulósica en componentes monoméricos y oligoméricos que incluyen azúcares de C5 y derivados, azúcares de C6 y derivados, lignina y otros componentes minoritarios. . En algunas realizaciones, parte o la totalidad del proceso de fraccionamiento utiliza un proceso de flujo continuo, que hace posible fraccionar cantidades muy grandes de biomasa con una eficiencia elevada y costes reducidos.

55 La biomasa se prepara primero para el fraccionamiento. Esta preparación implica las operaciones estándar normalmente implicadas para la biomasa específica utilizada (limpieza, etc.) y puede incluir reducir el tamaño de la biomasa, desairear la biomasa y/o precalentar la biomasa. También puede incluir la extracción de componentes valiosos, tales como aminoácidos o aceites. A continuación se abre la biomasa por algunos medios de rotura celular, tales como explosión de vapor. En algunas realizaciones, la explosión de vapor utiliza un proceso de calentamiento rápido de la biomasa en un reactor de circuito de vapor continuo a presión aumentada, explotando las células de biomasa y retirando componentes volátiles de la biomasa. En otras realizaciones, la explosión de vapor se puede complementar, aumentar o sustituir mediante tratamientos EM/EA.

65 Después de la preparación, la extracción y la desvolatilización de la biomasa, a continuación se somete a hidrólisis de hemicelulosa. En algunas realizaciones, la hidrólisis de hemicelulosa incluye un proceso de dos etapas que

incluye una primera etapa de ciclo de vapor de alta presión para comenzar la hidrólisis, seguido de un sistema de retención de segunda etapa, tal como un sistema de transportador para completar el proceso de hidrólisis de hemicelulosa. En otras realizaciones, la primera etapa de hidrólisis de hemicelulosa puede incluir más de un tratamiento de vapor a alta presión, seguido de un sistema de retención de segunda etapa. La hemicelulosa hidrolizada se disuelve en solución acuosa y se separa del sólido restante de biomasa mediante un sistema de lixiviación.

A continuación, el sólido de biomasa puede secarse hasta un contenido de humedad deseado y puede triturarse hasta un tamaño de partícula fina. Sin embargo, en algunas realizaciones, tales como las realizaciones que emplean tratamientos EM/EA durante la hidrólisis de celulosa pueden no incluir el secado y la trituración. La siguiente etapa es la hidrólisis de la celulosa. En algunas realizaciones, la hidrólisis de celulosa incluye termólisis ultra rápida. La termólisis ultrarrápida se puede realizar en un reactor de vapor continuo a baja presión y temperatura, tal como entre aproximadamente 350 y aproximadamente 450 grados centígrados. En estas condiciones, el enlace entre la lignina y la celulosa se rompe y la celulosa hidrolizada puede retirarse en una corriente de vapor con vapor de agua mientras la lignina forma un carbón sólido. En algunas realizaciones, la hidrólisis de celulosa se realiza en dos o más etapas usando dos o más reactores de vapor sobrecalentados, con cada reactor posterior a una temperatura más alta que cada reactor anterior.

Los métodos y sistemas de la invención se pueden llevar a cabo utilizando sistemas continuos, tales como reactores de vapor continuos (por ejemplo, circuitos, tubos, etc.) y sistemas transportadores, por ejemplo, lo que permite un sistema de procesamiento continuo. Como tal, evita los retrasos de tiempo inherentes a los sistemas que utilizan procesamiento discontinuo. Los sistemas de procesamiento continuo descritos en el presente documento también son más eficientes energéticamente que los sistemas discontinuos, dado que no requieren aumentar repetidamente la temperatura o la presión para cada lote, sino que los reactores de vapor solo deben mantener la temperatura y presión deseadas a medida que los materiales de biomasa entran y fluyen a través de la sistemas. La exactitud inherente del control permite un aumento gradual de la gravedad del tratamiento y da como resultado un fraccionamiento completo y complejo de la biomasa.

#### ***Preparación del material lignocelulósico***

El proceso de fraccionamiento de la biomasa comienza con la preparación del material de biomasa. Las realizaciones de la invención pueden utilizar cualquier material lignocelulósico, tal como madera dura o blanda, hierbas, residuos agrícolas, otros materiales vegetales, residuos municipales o una combinación de uno o más materiales de biomasa. Ejemplos de madera útil en las realizaciones de la invención incluyen pino, álamo, abeto, picea, alerce, haya, roble y palmeras y residuos de palma, por ejemplo. El material puede incluir madera de troncos, tallos, ramas raíces, duramen, recortes de madera, corteza de madera, serrín, poda de madera y residuos forestales, por ejemplo. Los materiales o desechos agrícolas que se pueden usar en las realizaciones de la invención incluyen hojarasca de maíz, mazorcas de maíz, granos de maíz, fibras de maíz, paja, residuos de plantación de plátano, paja de arroz, cáscara de arroz, paja de avena, cáscara de avena, fibra de maíz, tallo de algodón, algodón desmotado, paja de trigo, bagazo de caña de azúcar, restos de caña de azúcar, residuos de sorgo, residuos del procesamiento del azúcar, paja de cebada, paja de cereal, paja de trigo, paja de canola y hojarasca de soja, por ejemplo. Las hierbas pueden incluir pasto varilla hierba cordón, raigrás, caña chinesca, hierba de Bermuda, hierba de canaria de caña alfalfa. Otros materiales vegetales pueden incluir material vegetal de madera y no de madera, incluyendo tallos, cañas, arbustos, follaje, corteza, raíces, vainas, frutos, cáscaras, fibras, vides y algas. Los residuos municipales pueden incluir residuos residenciales, tales como residuos de papel y alimentos y residuos industriales, tales como desperdicios de papel y cartón, lodos de papel y otros desechos celulósicos.

La biomasa puede introducirse en un sistema de preparación desde el almacenamiento o directamente desde el tránsito. Primero, se puede pasar a través de la hendidura de la bolsa u otro proceso automático de descontención, si es necesario, y, después, a un proceso de detección y eliminación de metales y/o a una presión u otro proceso de lavado, en el que se eliminan la suciedad y las piedras de la biomasa.

A continuación, la biomasa puede transportarse y procesarse en un sistema de secado, tal como un chorro de aire u otro sistema de secado, para eliminar el exceso de agua superficial. Después, la biomasa limpia puede pasarse a una o más etapas de trituración.

El material lignocelulósico experimenta trituración, tal como mediante la creación de virutas o copos, con el fin de alcanzar un tamaño de partícula deseado. Esto puede realizarse por medio de una máquina de escamado y cribado, por ejemplo una desbastadora de cuchilla con tamiz vibratorio, por ejemplo. El tamaño de partícula se elige para mantener la biomasa en suspensión y permitir la transferencia de calor a través de la biomasa dentro de los sistemas de reactor continuo, que depende de la velocidad del vapor, la densidad de la biomasa y la forma de la biomasa, entre otros factores similares. En algunas realizaciones, el material se tritura a aproximadamente 0,5 a 5 mm de espesor y aproximadamente 12 a 80 mm de anchura y longitud. El tamaño de partícula preferente puede depender del diámetro de los tubos empleados en las etapas de procesamiento posteriores. Algunas realizaciones trituran material hasta aproximadamente 0,5 a 1,5 mm de espesor y de aproximadamente 12 a 15 mm de anchura y longitud. Algunas realizaciones trituran material hasta aproximadamente 2 a 5 mm de espesor y de

- aproximadamente 60 a 80 mm de anchura y longitud. El tamaño preferente de los copos miden aproximadamente 1 a 3 mm de espesor y aproximadamente de 25 a 40 mm de longitud y anchura en algunas realizaciones. Los tamaños de material preferentes también se pueden expresar en términos de diámetros equivalentes de partículas esféricas. Por consiguiente, los tamaños preferentes pueden ser de aproximadamente 5 a 10 mm en diámetro equivalente.
- 5 algunas realizaciones que tienen secciones cilíndricas, tales como materias primas de tipo hierba, los tamaños preferentes pueden ser de aproximadamente 2 a 5 mm de diámetro y de 25 a 50 mm de longitud. El tamaño de partícula es una función de la capacidad del sistema y, por lo tanto, de las dimensiones, así como de las características de la materia prima, de modo que algunas realizaciones pueden emplear otros intervalos de tamaños.
- 10 Algunos materiales pueden determinarse mediante un tamiz para subdimensionar. En algunas realizaciones, se puede añadir una proporción de material subdimensionado al material del tamaño deseado para su procesamiento adicional, pasando el resto a sistemas de procesamiento diferentes. En algunos casos, un sistema de procesamiento diferente puede ser un sistema para fraccionar la biomasa, estando configurado el tamaño del sistema para manipular tamaños de material más pequeños (por ejemplo, un sistema de circuito de menor capacidad y menor
- 15 diámetro). El material de gran tamaño puede reciclarse a la máquina de formación de copos o desmenuzado y triturar hasta el tamaño deseado. Se espera que un sistema comercial pueda tener un número de sistemas de reactor funcionando en paralelo, procesando cada sistema el material de biomasa de un tamaño diferente y/o materia prima diferente.
- 20 En algunas realizaciones, el material de partida de biomasa puede estar compuesto por muchos materiales diferentes, tales como corteza, ramitas y hojas. El procesamiento de dicho material para reducir su tamaño también hace que el material sea más homogéneo y, por tanto, más adecuado para el procesamiento. Al espesor deseado, tal como el descrito anteriormente, el calor se transfiere al centro de la biomasa lo suficientemente rápido, lo que lo convierte en un tamaño útil para su uso en los procesos del reactor de vapor descritos más adelante. Además, el uso
- 25 de piezas finas largas tales, como copos, por ejemplo, permite que las piezas que son lo suficientemente finas se calienten rápido pero todavía tienen un tamaño suficiente para permitir la separación ciclónica de la biomasa sólida del vapor, tal como en un separador ciclónico, tal como puede ocurrir en diversas etapas de los procedimientos de fraccionamiento descritos en el presente documento. En algunas realizaciones, el proceso de reducir el tamaño del material (por ejemplo, mediante alimentación, molienda y tamizado) dura aproximadamente un minuto.
- 30 En algunas realizaciones, el material lignocelulósico puede procesarse adicionalmente para eliminar el aire de la biomasa. Esto puede conseguirse aplicando un vacío a la biomasa y/o desplazando aire en la biomasa con un gas inerte tal como CO<sub>2</sub> O nitrógeno. En algunas realizaciones, las etapas posteriores del proceso de fraccionamiento producen CO<sub>2</sub>, que puede recogerse y utilizarse para la desaireación del material de partida de la biomasa. En
- 35 algunas realizaciones, el material de biomasa se coloca bajo vacío o vacío parcial y se extrae un gas inerte dentro del material, desplazando el aire y retirando el oxígeno del material. La retirada del oxígeno del material es deseable para reducir el nivel de degradación oxidativa de los productos y otros mecanismos de reacción indeseables, lo que se puede producir cada vez más a temperaturas y presiones elevadas y en presencia de catalizadores ácidos. El rendimiento de azúcares y otros productos preferentes puede reducirse por degradación oxidativa, dando lugar a rendimientos reducidos de combustible y otros productos secundarios. La degradación también puede generar
- 40 productos gaseosos, tales como CO<sub>2</sub>, que puede dar como resultado el desperdicio de la materia prima.
- La preparación del material lignocelulósico puede incluir, opcionalmente, la extracción y recogida de componentes volátiles y otros componentes no lignocelulósicos, tales como aceites esenciales, terpenos, aminoácidos, etc., donde
- 45 estos componentes existen en proporciones significativas y tienen valor comercial. Por ejemplo, el aceite de eucalipto puede retirarse y aislarse antes del fraccionamiento de la madera de eucalipto para extraer el valor máximo de la materia prima. Las proteínas y los aminoácidos pueden retirarse de las hierbas y los desechos de los cultivos, para su uso en piensos animales o productos farmacéuticos. Estos componentes pueden recuperarse por su valor comercial y/o para evitar interferencias con el proceso de fraccionamiento o contaminación de los productos de
- 50 fraccionamiento. Pueden retirarse utilizando un proceso completamente continuo. En algunas realizaciones, estos componentes se retiran a través de una o más etapas de extracción. En algunas realizaciones, las etapas de extracción comprenden un proceso continuo de extracción a contracorriente usando uno o más disolventes. La etapa de extracción puede utilizar uno o más tratamientos EM/EA, tales como campos eléctricos pulsados (PEF), energía ultrasónica (US) y/o microondas (MW) para lisar las células y efectuar la transferencia de masa de los componentes
- 55 de interés a los disolventes. Los tratamientos EM/EA pueden aplicarse a la biomasa inmediatamente antes o durante la extracción. Estas extracciones pueden realizarse a temperatura ambiente o a una temperatura elevada, tal como una temperatura entre la ambiente y aproximadamente 150 grados centígrados o de entre aproximadamente 60 y aproximadamente 120 grados centígrados. Los disolventes pueden elegirse basándose en el tipo de componente soluble que se va a extraer. Entre los ejemplos de disolventes adecuados se incluyen hidrocarburos, tales como
- 60 aceite mineral, cetonas, cetonas, alcoholes y/o aromáticos. En algunas realizaciones, se aplica un primer disolvente al material de biomasa y el componente o componentes solubles se retiran del material haciendo fluir el disolvente a través del material, recogiendo el disolvente y aislando o separando el componente soluble. A continuación se aplica un segundo disolvente al material para permitir que el primer disolvente sea lavado usando un lavado posterior con agua. El segundo disolvente también puede recogerse y el componente soluble y/o el primer disolvente pueden
- 65 separarse del segundo disolvente y aislarse. Por ejemplo, el segundo disolvente puede ser tanto hidrófilo como hidrófobo, de manera que sea capaz de disolver el primer disolvente y después puede lavarse con el posterior



lavado con agua. A continuación, se puede hacer fluir uno o más lavados con agua a través del material. En algunas realizaciones, tales etapas de extracción pueden durar aproximadamente dos minutos y medio, durando cada etapa aproximadamente un minuto más aproximadamente 30 segundos para la alimentación total y la descarga.

5 La etapa de extracción de los componentes volátiles y otros componentes no lignocelulósicos puede realizarse mediante un equipo de extracción continua a contracorriente o a favor de la corriente, tal como un transportador o extrusor de uno o dos tornillos, un extractor de placas verticales, un extractor rotatorio o una centrifugadora extractora, por ejemplo.

10 En algunas realizaciones, la retirada opcional de los volátiles y otros componentes no lignocelulósicos se puede proporcionar como una corriente lateral. En dichas realizaciones, la parte de una biomasa para la que se desea la extracción puede desviarse hacia la corriente lateral, tal como una serie de extracciones a contracorriente como se ha descrito anteriormente. Después, el flujo a la corriente lateral de extracción puede detenerse y el flujo de biomasa sin extracción puede proceder directamente a la etapa de precalentamiento o al reactor de hidrólisis de hemicelulosa. En dichas realizaciones, el flujo de biomasa desde una etapa de preparación incluye una ramificación para la extracción opcional o para sortear la extracción. Tales sistemas permiten la flexibilidad en la manipulación de diversos materiales de biomasa para los cuales se puede o no desear la extracción.

20 El material lignocelulósico puede procesarse adicionalmente precalentando el material. Por ejemplo, el material se puede precalentar usando vapor vivo (es decir, inyección de vapor directamente en el proceso), disolvente caliente o calentamiento indirecto. Por ejemplo, en algunas realizaciones, el material puede precalentarse usando vapor a baja presión. En algunas realizaciones, el vapor a baja presión se puede aplicar al material usando un proceso continuo que incluye un transportador, tal como un transportador de tornillo. El material puede precalentarse a una temperatura de entre aproximadamente 100 y aproximadamente 200 grados centígrados, tal como una temperatura entre aproximadamente 120 y aproximadamente 150 grados centígrados. El material se precalienta para reducir la demanda térmica en el primer reactor de vapor y asegurar que se alcanza rápidamente la temperatura de funcionamiento del reactor. La temperatura se mantiene, preferentemente, por debajo de aquella en la que se produce una hidrólisis de hemicelulosa significativa, tal como inferior a 180 grados centígrados. En algunas realizaciones, el proceso de desaireación y precalentamiento de la biomasa puede durar aproximadamente de dos a tres minutos.

35 En algunas realizaciones, el proceso para la retirada de los componentes no lignocelulósicos descrita anteriormente es un proceso de extracción con disolvente caliente. En tal procedimiento, uno o más de los disolventes están a una temperatura aumentada cuando se aplican, lo que da como resultado el calentamiento de la biomasa. Por lo tanto, los disolventes calientes pueden llevar a cabo la función de precalentar la biomasa a una temperatura deseada, así como a extracción.

40 En algunas realizaciones, puede incluirse una etapa de ajuste del contenido de agua para llevar el contenido de agua de la biomasa al nivel deseado. Por ejemplo, puede ser necesario añadir agua a la biomasa seca, tal como paja. Se puede añadir agua como vapor o agua durante una etapa de precalentamiento como se ha descrito anteriormente. Como alternativa, se puede añadir agua al reactor de desvolatilización para suplementar el agua liberada de la biomasa, para mantener el caudal másico de vapor sobrecalentado requerido. Por ejemplo, el contenido de agua puede aumentarse hasta aproximadamente el 50 %.

45 En las figuras 1 y 2 se muestran realizaciones de sistemas para la preparación de un material de biomasa lignocelulósica para fraccionamiento. Un material de biomasa lignocelulósica se alimenta desde el almacenamiento de materias primas a una máquina de formación de copos y cribado 2 para reducir la materia prima a un tamaño deseado. A continuación se hace pasar la materia prima a una entrada del sistema de desaireación 4 y, luego, a un sistema de desaireación 6 que elimina el aire de la biomasa usando un vacío 8. El vacío se rompe (o el aire se desplaza) con un gas inerte (N<sub>2</sub> o CO<sub>2</sub>). El sistema de desaireación 6 incluye un transportador, tal como un transportador de tornillo, que transporta la biomasa a la salida 10 del sistema de desaireación a través de la cual la biomasa sale del sistema de desaireación 6.

55 En el sistema mostrado en la figura 1, la biomasa pasa después a un primer, segundo y tercer sistema de lavado de disolvente 12, 14, 16, cada uno de los cuales incluye una entrada 18, 20, 22 y una salida 24, 26, 28, aunque realizaciones alternativas podrían incluir más o menos de tres sistemas de lavado. En cada sistema de lavado con disolvente 12, 14, 16, la biomasa entra a través de la entrada 18, 20, 22, es transportada a través del sistema 12, 14, 16 sobre o en una unidad de procesamiento continuo, tal como un transportador de tornillo, y sale a través de la salida 24, 26, 28 para pasar a la siguiente etapa del proceso. Los sistemas de lavado con disolvente 12, 14, 16, como se muestra, son sistemas de lavado a contracorriente. El primer sistema de lavado con disolvente 12 utiliza un primer disolvente y también puede estar equipado con uno o más sistemas que emplean uno o más de los generadores de tratamiento EM/EA 29 (tales como PEF, US, MW) que abren las células y mejoran la extracción de los componentes de interés en el disolvente. El segundo sistema de lavado con disolvente 14 utiliza un segundo disolvente. El componente soluble disuelto en cada disolvente se recupera de cada lavado con disolvente después de pasar o fluir a través de la biomasa. Los disolventes pueden reutilizarse después para lavados con disolventes adicionales. Después de los dos lavados con disolvente, la biomasa se lava en el tercer sistema de lavado con

disolvente 16 con agua caliente, utilizando de nuevo un sistema a contracorriente. En algunas realizaciones, el agua está a una temperatura entre aproximadamente 90 y aproximadamente 200 grados centígrados. En otras realizaciones, el agua está a una temperatura entre aproximadamente 120 y aproximadamente 150 grados centígrados. El disolvente se retira de la biomasa mediante el agua caliente, al tiempo que el agua caliente precalienta la biomasa a la temperatura deseada antes de que la biomasa pase a la siguiente etapa del proceso de fraccionamiento. En algunas realizaciones, la siguiente etapa es la desvolatilización de la biomasa.

En la figura 2 se muestra un sistema de preparación de la biomasa alternativo. En este sistema, no hay lavados con disolvente y, como tal, se puede usar cuando no hay extractos valiosos. Sin embargo, el sistema puede todavía emplear un lavado con agua caliente 16 como se describe con respecto a la Figura 1. En dichas realizaciones, el lavado con agua caliente 16 funciona para precalentar la biomasa antes del procesamiento adicional.

Debe reconocerse que los sistemas mostrados en las figuras 1 y 2 pueden representar dos sistemas distintos. Como alternativa, un sistema puede incluir tanto el proceso mostrado en la figura 1 como el proceso de la figura 2 como rutas alternativas. En dicha realización, el sistema puede incluir una válvula de desviación o dos alimentadores de transferencia controlada separados después de la etapa de desaireación, lo que permite que la biomasa proceda opcionalmente a través de la extracción con disolvente o que evite la extracción con disolvente y pasar directamente al precalentamiento. Tal sistema puede utilizarse cuando una parte de la biomasa que se procesará incluye extractos valiosos, mientras que otra porción no incluye tales extractos.

Se puede usar uno o más de los tratamientos EM/EA 29 (tales como PEF, US, MW) en conexión con uno o más de los sistemas de lavado 12, 14, 16 para mejorar el rendimiento de los sistemas de lavado 12, 14, 16. Por ejemplo, uno o más de los sistemas de lavado con disolvente 12, 14 o el sistema de lavado con agua 16 pueden incluir un generador de campo eléctrico pulsado para aplicar PEF a la biomasa antes de entrar o pasar a lo largo del transportador de lavado con disolvente. El PEF puede crear agujeros en las paredes celulares que pueden permitir una extracción más rápida de materiales de la biomasa. Los parámetros de PEF varían con la materia prima, pero, en algunas realizaciones, pueden incluir intensidad de campo de 10 a 20 kv/cm, una duración del pulso de 5 a 10 microsegundos, un periodo de pulso de 10 a 20 milisegundos y/o un tiempo de exposición de 0,1 a 0,2 segundos, por ejemplo.

### **Desvolatilización**

Las realizaciones de la invención incluyen un proceso de desvolatilización. En algunas realizaciones, los componentes volátiles (tales como gases residuales, compuestos orgánicos de bajo peso molecular y algunos aceites y lípidos) se eliminan de la biomasa mediante destilación de vapor de una o varias etapas o por volatilización rápida. En algunas realizaciones, se puede usar una forma única de explosión de vapor utilizando un proceso continuo de calentamiento de vapor muy rápido para separar las células de la biomasa. Este proceso somete el material de biomasa a alta temperatura y a una presión moderada o alta, lo que hace que el agua en las células se expanda y vaporice, dando lugar a un aumento de la presión interna suficiente para romper o explotar las células. En otras realizaciones, la biomasa se rompe usando una combinación de vapor y uno o más de los tratamientos EM/EA en un proceso análogamente continuo.

El proceso de explosión de vapor de flujo continuo (o rotura de vapor mejorada) proporciona varias ventajas, incluyendo pasar de forma continua el biomaterial a través del sistema, control fino de las condiciones de procesamiento, conservación de la energía mejorada y la capacidad de retirar y recoger los componentes volátiles contenidos en la biomasa. El proceso de explosión de vapor de flujo continuo (o rotura mejorada) se puede realizar usando vapor sobrecalentado, tal como en un tubo de vapor sobrecalentado tal como un circuito de vapor. La biomasa se introduce en el tubo de vapor donde se expone al vapor sobrecalentado, elevando rápidamente la temperatura de la biomasa. Además de la rotura celular por simple calentamiento con vapor, la rotura puede producirse por cavitación y permeabilización o poración de la pared celular. Debido a la velocidad del calentamiento, el vapor es incapaz de difundirse fuera de la célula antes de que haga que la célula estalle. Por lo tanto, mientras las células están todavía bajo presión y temperatura elevadas dentro del tubo de vapor, las células de biomasa estallan o explotan, abriendo las células. Al romper la estructura celular, los componentes se hacen más accesibles, lo que permite el posterior fraccionamiento de hemicelulosa, celulosa y lignina.

En algunas realizaciones, el vapor sobrecalentado está a una temperatura de entre aproximadamente 120 y aproximadamente 220 grados centígrados y una presión entre aproximadamente 6 y aproximadamente 16 bares. En algunas realizaciones, la temperatura está, preferiblemente, entre 150 y 190 grados centígrados y la presión 10 a 15 bares. A esta temperatura y presión, la biomasa se puede calentar muy rápidamente sin formar carbón o sufrir hidrólisis significativa de las fracciones de carbohidratos.

El vapor sobrecalentado puede fluir a través de una tubería, tubo o estructura similar. Para mejorar el rendimiento energético, el vapor puede fluir en un circuito continuo bajo la fuerza de un soplador o ventilador. Cuando la biomasa se inyecta en la tubería, es arrastrada en el vapor y es transportada con el vapor, de manera que las partículas de biomasa se suspenden y se mueven a través de la tubería sin sedimentarse en el fondo de la tubería. Además, el vapor y la biomasa pueden ser transportados a través del sistema a alta velocidad, generalmente a velocidades de

10 a 25 m/s y, preferiblemente, a velocidades de 15 a 20 m/s. Mediante el uso de este proceso de arrastre de vapor sobrecalentado, la biomasa se calienta mucho más rápidamente que con un proceso fijo o discontinuo, lo que permite el calentamiento rápido requerido para que se produzca explosión de vapor. Esto puede crear un flujo altamente turbulento, que, junto con el vapor de alta temperatura y los coeficientes de película de condensación superficial  
 5 altos, permite una transferencia más rápida del calor del vapor a la biomasa. Se cree que el vapor se condensa en el exterior de la partícula de biomasa, lo que da lugar a transferencia de calor a la biomasa por conducción, convección y radiación.

Además, el uso de tratamientos EM/EA, con el vapor de alta velocidad, puede aumentar sustancialmente la  
 10 velocidad de transferencia de energía, desde los periodos de horas o decenas de minutos para los procesos discontinuos a segundos, con PEF, por ejemplo, actuando para abrir membranas celulares en microsegundos. Los tratamientos EM/EA pueden aplicarse a la biomasa inmediatamente antes de entrar en el tubo de desvolatilización o cuando pasa a través del tubo de vapor de desvolatilización. Una porción del tubo puede ser un generador de campo eléctrico pulsado, un generador de energía ultrasónica o un generador de microondas, dirigiendo el tratamiento  
 15 EM/EA al tubo. En algunas realizaciones, el PEF se puede aplicar a la biomasa durante la desvolatilización. De nuevo, los parámetros de PEF varían con la materia prima y pueden incluir una intensidad de campo de 10 a 20 kv/cm, una duración del pulso de 5 a 10 microsegundos, un periodo de pulso de 10 a 20 milisegundos y/o un tiempo de exposición de 0,1 a 0,2 segundos. En otras realizaciones, la energía ultrasónica puede aplicarse a la biomasa durante la desvolatilización. Los parámetros US pueden incluir una frecuencia de 20 a 40 kHz y/o una exposición de  
 20 30 a 90 segundos. En otras realizaciones adicionales, tanto el PEF como la energía ultrasónica pueden aplicarse a la biomasa durante la desvolatilización. Puede aplicarse primero el PEF, seguido del US o se puede aplicar primero el US, seguido del PEF. El US, por ejemplo, puede calentar las células de biomasa de dentro hacia afuera, en cuestión de segundos, mientras que el vapor transfiere calor desde el exterior de la biomasa hacia el interior. Por lo tanto, el US permite un proceso de desvolatilización más rápido y más eficiente. En algunas realizaciones, el  
 25 proceso completo de desvolatilización de la biomasa puede durar aproximadamente de una hora y media a tres minutos (incluyendo aproximadamente cuatro a cinco segundos en un circuito de vapor sobrecalentado).

El uso de un tubo de vapor sobrecalentado, tal como un circuito de vapor para diversos procesos de reacción, incluyendo desvolatilización e hidrólisis de hemicelulosa, por ejemplo, permite un control preciso de las condiciones  
 30 de temperatura y presión, así como el tiempo de arrastre de la biomasa dentro del sistema. Además, el tiempo de tránsito de la biomasa dentro del sistema puede controlarse controlando la velocidad del soplador para aumentar o disminuir la velocidad del vapor en el que la biomasa es arrastrada. Por lo tanto, la temperatura, la presión y la velocidad de la biomasa se pueden controlar cuidadosamente e independientemente para optimizar el proceso. Un tiempo de residencia de circuito único puede ser del orden de 5 a 10 segundos.

La explosión de vapor de flujo continuo abre la estructura de las células de biomasa para permitir el fraccionamiento de la biomasa y también libera los componentes volátiles y no carbohidratos de la biomasa, tales como ácidos, aceites y terpenos (por ejemplo, trementina y aceites esenciales). Los componentes volátiles se vaporizan por la temperatura elevada y también se someten a destilación por vapor debido al vapor sobrecalentado. El proceso de  
 40 destilación con vapor reduce el punto de ebullición efectivo de ciertos componentes volátiles, tales como componentes orgánicos como aceites, a una temperatura que es inferior al punto de ebullición del componente puro a temperatura atmosférica, lo que dan como resultado la volatilización de los componentes a una temperatura menor de lo que, de lo contrario, se requeriría. Esto hace posible eliminar componentes más volátiles de los que de otro modo sería posible calentando a una temperatura específica sola sin la presencia de vapor sobrecalentado.

Se pueden los componentes volátiles liberados mediante el proceso de explosión de vapor, por ejemplo permitiendo que los vapores pasen a un dispositivo de recogida de gas, tal como un condensador, tal como un condensador de contacto directo, un depurador o un aparato similar. El dispositivo de recogida de gas puede estar dispuesto en línea dentro del tubo o circuito de vapor para permitir un flujo continuo e ininterrumpido de material de biomasa y vapor y  
 50 puede operar continuamente, lo que permite que el vapor y la biomasa fluyan continuamente a través. Además de eliminar los componentes volátiles, cualquier oxígeno o cualquier gas inerte remanente dentro de la biomasa puede retirarse por el proceso de explosión de vapor, realizando o completando de este modo el proceso de desaireación. Por lo tanto, el proceso de vapor de sobrecalentamiento de flujo continuo provoca la desvolatilización a través de destilación instantánea de vapor, explosión de vapor (con o sin tratamiento EM/EA) de las células de biomasa y  
 55 desaireación completa de la biomasa.

Entre los ejemplos de reactores de vapor continuos que se pueden usar para el proceso de desvolatilización se incluyen, por ejemplo, reactores convencionales de uno o varios tubos con o sin elementos internos estáticos o rotatorios, transportadores o extrusores de tornillo, reactores de lecho fluidizado, tales como un lecho de burbujeo, de chorros o de lecho circulante, reactores ablativos y, en general, cualquier sistema continuo de paso simple.

Antes de entrar en el reactor de vapor utilizado para la explosión del vapor de flujo continuo, la biomasa está a presión atmosférica, al tiempo que en el interior del reactor de vapor está a una presión elevada. Por lo tanto, la biomasa debe inyectarse en el reactor de vapor utilizando un sistema de alimentación de sólidos que puede  
 65 funcionar contra esta diferencia de presión. En una realización, el sistema de alimentación de sólidos es un sistema de tipo tolva de bloqueo/tanque de soplado. Este sistema es un sistema discontinuo accionado de una manera

rápida y ciclada, pero puede hacerse operar de una manera esencialmente suave continuamente a través de la adición de un sistema transportador, tal como un alimentador de tornillo o rotatorio. En otra realización, el sistema de alimentación de sólidos es una bomba de sólidos, un dispositivo centrífugo en el que se utiliza fricción para mover sólidos en un flujo de tapón. Tales sistemas de alimentación de sólidos pueden usarse en cualquiera de las diversas etapas descritas en el presente documento en las que se requiere un sistema de alimentación de sólidos, o en las que la biomasa se transfiere de un sistema o etapa a otro.

En la Figura 3 se muestra una realización de un sistema y proceso para la explosión de vapor de alta presión de flujo continuo (y rotura celular mejorada). La biomasa preparada, tal como la biomasa resultante del proceso mostrado en la figura 1 o la figura 2, se introduce en un sistema de alimentación de sólidos 30. A continuación, la biomasa se inyecta en el circuito de vapor continuo 32 en una entrada de circuito de vapor 34. Un ventilador 36 en conexión con el circuito de vapor 32 empuja el vapor y la biomasa arrastrada a través del circuito de vapor 32. Dentro del circuito de vapor 32, la biomasa se calienta rápidamente usando vapor sobrecalentado a temperatura y presión altas, opcionalmente junto con uno o más de los generadores de tratamiento EM/EA 33, para romper o explotar la estructura celular de la biomasa, liberar los componentes volátiles y preparar la biomasa para el fraccionamiento, mientras que la biomasa se transporta dentro del circuito de vapor 32. El vapor explotó, o se rompió, la biomasa viaja a través del circuito de vapor 32 a una entrada de separador 38, en línea con el circuito de vapor 32 para entrar en el separador 40. El separador 40, tal como un separador ciclónico, separa la biomasa sólida del vapor y de los componentes volatilizados. El vapor sale del separador 40 junto con los componentes volatilizados y los gases inertes a través de una primera salida separadora 42 para continuar circulando a través del circuito de vapor 32. El vapor y los componentes volatilizados pasan a un dispositivo de recogida de gas 44, tal como una torre de pulverización, que depura los componentes volatilizados solubles. El resto de los gases inertes y otros gases y vapores pasan y una porción de éstos, junto con una proporción similar del vapor, se retiran del circuito bajo control de presión del dispositivo 46 de control de la presión. El dispositivo de control de la presión 46 puede compensar la presión de circuito aumentada causada por gases inertes y vapores volátiles de bajo punto de ebullición mediante la ventilación de algunos de los gases, vapores (y vapor) para equilibrar la presión en el circuito. A continuación, los componentes condensables pueden condensarse mediante un condensador o eliminarse mediante un depurador separado, por ejemplo, para su recuperación. El vapor restante y los gases recirculan de nuevo al ventilador 36 y a través del circuito de vapor 32 para su reutilización. La biomasa explotada sale del separador 40 a través de una segunda salida del separador 48 para salir del circuito de vapor 32 y pasar a la siguiente etapa del proceso de fraccionamiento. En algunas realizaciones, la biomasa pasa a la etapa de hidrólisis de hemicelulosa después de la desvolatilización.

En algunas realizaciones, los sólidos que salen del separador 40 se introducen en uno o más sistemas de explosión de vapor adicionales, tales como uno o más sistemas de circuito de vapor 32 y separador 40, para repetir el proceso de explosión de vapor sobre cualquier biomasa que permanece sin explotar. En dichas realizaciones, cualquier componente volátil adicional puede recogerse nuevamente y la biomasa sólida completamente explotada (o abierta) puede, por tanto, pasar a la siguiente etapa del proceso de fraccionamiento.

#### 40 **Hidrólisis de hemicelulosa**

Una vez que se han completado las etapas preparatorias, la biomasa está ahora lista para someterse a la extracción de la hemicelulosa. La hemicelulosa puede retirarse de la biomasa mediante cualquier método o combinación de métodos, tales como procesos con agua caliente, ácido o álcali. En algunas realizaciones, la hemicelulosa se retira mediante hidrólisis usando vapor sobrecalentado. En algunas realizaciones, la totalidad de las etapas preparatorias puede durar de aproximadamente de siete a nueve minutos y medio con extracción de aceite o cuatro y medio a siete minutos sin extracción de aceite.

En algunas realizaciones, la hemicelulosa se hidroliza usando vapor sobrecalentado, en un proceso continuo, tal como arrastrando la biomasa en un reactor de vapor continuo (por ejemplo, un circuito, un tubo, etc.). Entre los ejemplos de reactores de vapor continuos que pueden usarse para la hidrólisis de hemicelulosa se incluyen, por ejemplo, reactores convencionales de uno o varios tubos con o sin elementos internos estáticos o rotatorios, transportadores o extrusores de tornillo, reactores de lecho fluidizado tales como reactores de burbujeo, de chorros o de lecho circulante, reactores ablativos y, en general, cualquier sistema continuo de paso simple.

En algunas realizaciones, el vapor se aplica a la biomasa a una presión de aproximadamente 10 a 35 bares y una temperatura de aproximadamente 170 a 250 grados centígrados. En otras realizaciones, la presión es de 23 a 32 bares y la temperatura es de 220 a 240 grados centígrados. La temperatura y la presión son suficientes para hidrolizar la hemicelulosa, minimizando o evitando la degradación del material de biomasa. Aunque tanto la hidrólisis como la cinética de la reacción de degradación son funciones de tiempo, la temperatura y las condiciones tales como el pH, presentan un óptimo diferente, de manera que es posible maximizar la recuperación de azúcares de producto mediante la selección de las condiciones de funcionamiento apropiadas. En algunas realizaciones, se utiliza un único reactor de vapor, mientras que, en otras realizaciones, se utilizan dos o más reactores de vapor en serie con las condiciones de cada reactor seleccionadas para obtener diferentes productos,

En algunas realizaciones, la etapa de hidrólisis emplea uno o más de los tratamientos EM/EA, tales como los

tratados en otra parte del presente documento, para mejorar la transferencia de calor y ayudar en la degradación de la hemicelulosa. Por ejemplo, uno o más de PEF, US o microondas se pueden aplicar a la biomasa en, o antes de, el reactor de hidrólisis de hemicelulosa. En algunas realizaciones, un generador de ultrasonidos produce energía ultrasónica dentro, o inmediatamente antes, del reactor para dirigir la energía ultrasónica a la biomasa a medida que

5 entra o pasa a través del reactor. Los parámetros de energía ultrasónica varían con la materia prima y la reacción o los productos deseados y pueden ser, típicamente, frecuencia de 20 a 40 kHz o de 200 kHz a 1 MHz; duración de 1 a 5 segundos o de 30 a 90 segundos. La energía ultrasónica (o microondas) puede proporcionar un método suplementario de calentamiento de la biomasa en el reactor de hemicelulosa calentando la biomasa internamente, haciendo que la reacción de hidrólisis de hemicelulosa sea más rápida.

10 En algunas realizaciones, la hidrólisis de hemicelulosa comienza en una primera etapa o ubicación de vapor sobrecalentado, tal como un tubo o circuito de vapor continuo y, a continuación, continúa en una segunda ubicación o etapa de vapor sobrecalentado o saturado, tal como fuera del tubo o circuito de vapor. En algunas realizaciones, esta segunda etapa está aproximadamente a la misma temperatura y presión que la primera etapa, actuando la

15 segunda etapa como un sistema de retención, permitiendo que la reacción de hemicelulosa que comenzó en la cámara de reacción o en el circuito de vapor se complete. La biomasa puede mantenerse en este sistema de retención durante un tiempo suficiente para que la reacción de hidrólisis de hemicelulosa llegue a su término, tal como de aproximadamente uno a dos minutos, por ejemplo, a una temperatura deseada. La terminación de las reacciones de hidrólisis podría llevarse a cabo a una temperatura más baja, pero se requerirían tiempos de

20 residencia más largos para completar la hidrólisis. El sistema de retención puede comprender un depósito de retención, por ejemplo o puede ser un sistema transportador, tal como un transportador de movimiento lento. Como alternativa, todo el proceso de hidrólisis de hemicelulosa puede producirse dentro de una única etapa o ubicación, tal como manteniendo la biomasa en una cámara de reacción o manteniéndola dentro del tubo o circuito de vapor durante un tiempo más largo, suficiente para que la reacción de hidrólisis de hemicelulosa llegue a su término. Sin embargo, la longitud del circuito/tubo de vapor es directamente proporcional al coste del sistema, por lo que puede ser más costoso alargar el tubo o circuito de vapor que incluir una segunda etapa separada fuera del circuito/tubo de vapor.

30 El proceso de la reacción comienza en el ambiente de vapor sobrecalentado. Sin embargo, las dos etapas de la reacción no se correlacionan necesariamente con las dos etapas del proceso de vapor sobrecalentado descrito anteriormente. La sección de circuito/tubo sobrecalentado se emplea para proporcionar la transferencia de calor para iniciar la reacción, ayudada, cuando sea deseable, con tratamientos de EM/EA. Posteriormente, los parámetros de reacción se pueden determinar basándose en factores económicos y de conveniencia. Debe observarse que las hemicelulosas y las celulosas no son moléculas sencillas, puras, sino mezclas de polímeros, copolímeros y

35 polímeros reticulados, formados a partir de una serie de azúcares monoméricos. Cada uno de tales polímeros tiene su propia cinética de hidrólisis.

40 En algunas realizaciones, se proporcionan dos o más reactores continuos de vapor de agua sobrecalentado de hemicelulosa en una serie. El primer reactor puede estar a una temperatura más baja que el segundo reactor. Si se utiliza un tercer reactor, temperatura del segundo reactor puede ser menor que el tercer reactor. Por ejemplo, el primer reactor de hemicelulosa puede hidrolizar parcialmente la hemicelulosa (usando una temperatura más baja y/o un tiempo de reacción más corto que el segundo reactor), produciendo oligómeros, tales como oligómeros que tienen 2-20 azúcares. A continuación, se retirarían estos oligómeros y otros productos, tal como mediante lixiviación o prensa a alta presión, y el componente sólido restante procedería a continuación para su posterior procesamiento.

45 En el segundo reactor de hemicelulosa, se pudo completar la hidrólisis de hemicelulosa, produciendo monómeros de azúcar hemicelulósicos.

50 A continuación, se retira la hemicelulosa hidrolizada de la biomasa. Los azúcares de C5 algunos de C6 producidos por hidrólisis de hemicelulosa son generalmente solubles en agua y pueden disolverse en el agua circundante y absorberse en la biomasa después de la exposición al vapor sobrecalentado. Esta solución puede ser una solución de azúcar relativamente compleja, que comprende los azúcares monoméricos particulares de la materia prima seleccionada, más algunos oligómeros de las hemicelulosas y algunos azúcares, oligómeros, etc. de las celulosas y derivados de azúcar (azúcares anhidros, etc.). Otros contaminantes pueden incluir volátiles residuales, tales como ácido acético, alcoholes, etc. y cualquier otro componente soluble, tal como aminoácidos, sales minerales, etc.

55 En algunas realizaciones, los azúcares se retiran de la biomasa en una sola o en múltiples etapas, usando agua adicional y secuencias de lavado y separación líquido/sólido. Por ejemplo, los azúcares C5 y C6 pueden retirarse utilizando un flujo de agua contracorriente para lixiviar los azúcares de hemicelulosa C5 y C6 de los sólidos de la biomasa. En algunas realizaciones, los azúcares de C5 y C6 pueden retirarse después de la primera disminución de la presión, tal como entre aproximadamente la presión atmosférica y aproximadamente 2 bares, y, después, ventilar los vapores para evaporar una parte del agua que contiene los azúcares disueltos. El vapor instantáneo, que contendrá licor cargado de azúcar arrastrado, se puede condensar en un condensador directo o indirecto y el licor recuperado se envía para la recuperación de azúcar. A continuación, los azúcares hemicelulósicos hidrolizados se lixivian de la biomasa. En algunas realizaciones, la lixiviación a baja presión emplea un flujo de agua a

60 contracorriente para retirar los azúcares hemicelulósicos disueltos. En otras realizaciones, los azúcares hemicelulósicos disueltos pueden retirarse utilizando una o más etapas de lavado y separación a alta presión, tal

como usando el equipos de extrusión o compresión, tales como prensas de tornillo de alta presión y equipos de lavado continuo, tales como transportadores o tornillos de contraflujo. En algunas realizaciones, los azúcares hemicelulósicos disueltos se pueden retirar utilizando tanto prensas como procesos de lixiviación a baja presión. En algunas realizaciones, el proceso completo de hidrólisis y retirada de hemicelulosa puede durar aproximadamente de uno y medio a tres minutos.

La etapa de lixiviación o expresión de la biomasa para la retirada de los azúcares hemicelulósicos y la separación de la biomasa en un componente líquido y un componente sólido puede realizarse mediante un equipo de extracción continua a contracorriente o a favor de corriente, tal como un transportador o extrusor de tornillo simple o doble, un extractor de placas verticales, un extractor rotatorio o una centrifugadora extractora, por ejemplo.

Los azúcares hemicelulósicos aislados que incluyen monómeros y oligómeros de azúcar de C5 y C6 (y derivados, tales como azúcares anhidros, aldehídos, etc.) son útiles como productos individuales y tienen diversos usos comerciales. En algunas realizaciones, pueden usarse algunos azúcares de C5 y derivados de azúcar para la fermentación, tal como para la producción de alcoholes, incluyendo etanol y alcoholes superiores, tales como butanol. Dichos procesos de fermentación pueden realizarse junto con el proceso de fraccionamiento o pueden realizarse por separado. En algunas realizaciones, los azúcares de C5 aislados pueden procesarse adicionalmente, tal como para la conversión en otras sustancias químicas. Por ejemplo, los azúcares de C5 pueden convertirse en furfural. Los productos de hidrólisis de hemicelulosa también se pueden pasar para procesamiento adicional en paralelo con, o junto con, productos de hidrólisis de celulosa. Algunos de estos procesos se identifican más adelante, en la discusión del procesamiento de celulosa.

En la Figura 4 se muestra una realización de un sistema y proceso de dos etapas para la hidrólisis en vapor de hemicelulosa en flujo continuo. La biomasa, tal como la biomasa desvolatilizada producida por el sistema de la figura 2, pasa a un sistema de alimentación de sólidos 50, al igual que los sistemas de alimentación de sólidos descritos anteriormente. El sistema de alimentación de sólidos 50 inyecta la biomasa en el circuito de vapor continuo 52 en la entrada del circuito de vapor 54. El soplador 56 mueve el vapor y la biomasa arrastrada a través del circuito de vapor 52, que hace circular el vapor a través del circuito vapor 52. La biomasa fluye de forma turbulenta y se calienta rápidamente dentro del circuito de vapor 52, comenzando la hidrólisis de la hemicelulosa. De nuevo, también se puede emplear en este circuito, opcionalmente, un generador 58 de tratamiento EM/EA. La biomasa pasa a través del circuito de vapor 52 a través de la entrada del separador 60 al separador 62, tal como un separador ciclónico, que separa el vapor de la biomasa. El vapor sale del separador 62 a través de una primera salida del separador 64 para continuar circulando a través del circuito de vapor 52. La biomasa calentada sale del separador 62 a través de una segunda salida del separador 66 y pasa al sistema de retención 68, que, en la realización mostrada, es un transportador de tornillo de movimiento lento a la misma temperatura y presión que el circuito de vapor 52. La hidrólisis de hemicelulosa continúa completándose dentro del sistema de retención 68. Al final del sistema de retención 68, la biomasa se mueve a un sistema de alimentación de sólidos 70 y al sistema de lixiviación de azúcar de hemicelulosa 72. En la realización mostrada, el agua fluye a través de la biomasa para lavar los azúcares a contracorriente cuando la biomasa se mueve a lo largo del transportador. El agua sale del sistema de lixiviación para la recuperación de los azúcares hemicelulósicos. Esta lixiviación a baja presión puede durar aproximadamente de cuatro minutos y medio a cinco minutos y medio. Los azúcares hemicelulósicos se pueden separar después del agua por destilación convencional o por técnicas tales como pervaporación y filtración (utilizando membranas), destilación reactiva o extracción, por ejemplo. La biomasa sólida a partir de la que se ha retirado la hemicelulosa y que ahora incluye celulosa y lignina sale del sistema de lixiviación 72 y continúa para su posterior procesamiento. La biomasa sólida puede incluir muy poca hemicelulosa, tal como de 5 % a 10 % en peso de hemicelulosa. En algunas realizaciones, la biomasa sólida pasa para la eliminación de los azúcares de la celulosa, tal como por el sistema mostrado en la figura 8.

En la figura 5 se muestra una realización alternativa. Como en la figura 4, la hidrólisis de hemicelulosa se realiza usando un circuito de vapor y un transportador de tornillo. En esta realización alternativa, la biomasa que contiene los azúcares de hemicelulosa pasa del sistema de retención 68 a una primera prensa de tornillo de alta presión 74 para deshidratar la biomasa y, después, al tornillo de mezcla y lavado 76. Una segunda prensa de tornillo de alta presión 78 se muestra en la figura 8, donde también funciona como un tornillo de alimentación 81 para la etapa de secado. Esta expresión de alta presión puede durar aproximadamente de un minuto y medio a tres minutos.

Un sistema alternativo para la hidrólisis de la hemicelulosa se muestra en la Figura 6, que tiene dos reactores de hemicelulosa en serie para la primera etapa. El primer reactor de hemicelulosa y el sistema de lixiviación de azúcar hemicelulósico se describen con respecto a la figura 4, aunque las condiciones de reacción (tales como la temperatura, la presión y el tiempo de reacción) pueden modificarse de tal manera que la hidrólisis de hemicelulosa sea incompleta. Los productos de hemicelulosa hidrolizados del primer reactor de hemicelulosa son lixiviados por el sistema de lixiviación 72 y el sólido residual que incluye la hemicelulosa no hidrolizada, la celulosa y la lignina se pasan al segundo reactor de hidrólisis de hemicelulosa. El sólido residual se vuelve a presurizar usando un sistema de alimentación de sólidos, tal como un sistema de tolva de bloqueo/tanque de soplado. El segundo reactor de hemicelulosa incluye los mismos componentes que el primer reactor de hemicelulosa, pero puede aplicar diferentes condiciones de reacción. Por ejemplo, el tiempo, la temperatura o la presión pueden ser tales que la hidrólisis de la hemicelulosa sea completa. El producto de azúcar hemicelulósico puede ser azúcares monoméricos, por ejemplo, y

el sólido residual puede ser celulosa y lignina con solo un pequeño componente de hemicelulosa, tal como menor del 10 %. En la realización mostrada, el segundo reactor de hemicelulosa incluye un segundo sistema de alimentación de sólidos 250, un segundo circuito de vapor continuo 252 que tiene una entrada 254 para la entrada de biomasa y un soplador 256 para el vapor circulante. Los tratamientos EM/EA pueden aplicarse mediante un generador de tratamiento EM/EA 258. Un segundo separador 262 incluye una entrada 260, una primera salida del separador 264 para que el vapor salga y una segunda salida del separador 266 para pasar la biomasa a un segundo sistema de retención 268 y, a continuación, a un segundo sistema de alimentación de sólidos 270 y a un segundo sistema de lixiviación de azúcar de hemicelulosa 272.

En la figura 7 se muestra una realización alternativa adicional. En esta realización, como en la figura 6, hay dos circuitos del reactor de hemicelulosa en serie. En esta realización, sin embargo, después de salir del sistema de retención 68, el agua que incluye la hemicelulosa hidrolizada se retira utilizando prensas de tornillo de alta presión como en la figura 5. Una primera prensa de tornillo de alta presión 74 elimina la biomasa, seguida de un tornillo de mezcla y lavado 76. Una segunda prensa de tornillo de alta presión 78 se muestra después del primer reactor de hemicelulosa, mientras que la segunda prensa de tornillo de alta presión 78 que sigue al segundo reactor de hemicelulosa puede verse en la figura 8, donde también funciona como un tornillo de alimentación 81 para la etapa de secado. Como en la figura 6, la biomasa se vuelve a presurizar antes de entrar en el segundo reactor de hidrólisis de hemicelulosa por medio de la prensa de tornillo de alta presión 78.

En algunas realizaciones, el componente sólido que queda después de la retirada de azúcares hemicelulósicos se procesa adicionalmente para la retirada de azúcares celulósicos, tal como mediante los procedimientos descritos en el presente documento. En otras realizaciones, el componente sólido que incluye celulosa y lignina y relativamente libre de hemicelulosa, tal como que tiene menos del 10 % de hemicelulosa, puede usarse para otros procesos, tal como para la producción de cartón comprimido. El sólido de celulosa y lignina puede combinarse con una resina tradicional, tal como urea o formaldehído. Como alternativa, la hemicelulosa obtenida como se describe en el presente documento puede convertirse en una resina por procesamiento químico separado y combinarse con el sólido de celulosa y lignina para fabricar cartón comprimido.

#### **Hidrólisis de celulosa**

En realizaciones en las que se continúa el biofraccionamiento, la celulosa y la lignina en el sólido restante se separan una de otra. Esto puede realizarse mediante solubilización con disolvente de lignina, mediante procedimientos hidrolíticos enzimáticos o ácidos (diluidos o concentrados) o mediante procesos pirolíticos a alta temperatura. En algunas realizaciones, la biomasa de celulosa se somete a termólisis ultrarrápida para romper los enlaces de lignina de la celulosa, hidrolizar simultáneamente la celulosa y vaporizar los productos de la hidrólisis.

Después de la retirada de la hemicelulosa, tal como por el proceso mostrado en las figuras 3-7, la biomasa sólida restante incluye, principalmente, celulosa y lignina. En muchas realizaciones, sobre una base seca, la biomasa sólida restante es aproximadamente 60-70 % de lignina y 30-40 % de celulosa, con pequeñas cantidades de insolubles, tales como sales inorgánicas. En algunas realizaciones, la biomasa sólida se deshidrata para eliminar el agua de superficie suelta, como puede ser necesario para el procesamiento posterior. Por ejemplo, el agua se puede retirar utilizando una prensa de alta presión. En algunas realizaciones, la biomasa sólida tiene un contenido de agua de más de aproximadamente 60 %, tal como aproximadamente 60-75 % antes de la deshidratación. Después de la deshidratación, el contenido de agua de la biomasa puede reducirse a menos de aproximadamente 60 %, tal como aproximadamente 50 a 60 %.

En algunas realizaciones, el sólido deshidratado puede secarse después utilizando un reactor de vapor sobrecalentado (por ejemplo, un circuito, un tubo, etc.). El proceso de deshidratación produce vapor de alta presión. Este vapor adicional se puede recuperar para su uso como energía y la presión utilizada en el proceso de deshidratación puede determinarse en base a los requisitos de recuperación de energía. Esta recuperación de energía puede producirse mediante el uso directo del vapor en otra parte del proceso de fraccionamiento. Además, o como alternativa, la energía puede recuperarse después de la transferencia de calor a un fluido limpio, tal como a través de un turbo-generador de reducción de presión para generar energía. Los sistemas que pueden usarse para la etapa de secado del componente sólido de la biomasa incluyen reactores de vapor continuos, tales como reactores convencionales de uno o varios tubos con o sin elementos internos estáticos o rotatorios, transportadores o extrusores de tornillo, reactores de lecho fluidizado, tales como un lecho de burbujeo, de chorros o de lecho circulante, reactores ablativos y, por lo general, cualquier sistema continuo de paso simple.

El uso de un tubo o circuito de vapor para el secado también permite que el proceso de secado sea continuo. Como alternativa o adicionalmente, en algunas realizaciones, el secado puede realizarse por contacto directo con una corriente de gas caliente, seco (tal como gases de escape de combustión) o por una serie de sistemas de secado continuos indirectos, incluyendo secadores de cinta y rotativos. La biomasa se puede secar hasta un contenido en agua de aproximadamente 1 a 10 %, y tal como un contenido en agua de aproximadamente 2 a 4 %. En algunas realizaciones, el proceso de secado puede durar de uno a dos minutos (incluyendo cuatro a cinco segundos en el circuito/tubo de vapor).

En algunas realizaciones, la biomasa sólida restante se procesa adicionalmente para reducir su tamaño. Por ejemplo, la biomasa puede cortarse en trozos pequeños usando un molino de desgaste o un molino para reducir el sólido a un polvo fino. En algunas realizaciones, puede usarse un intervalo de tamaños de aproximadamente 0,5 a 5 mm de diámetro, mientras que en otras realizaciones se puede usar un intervalo de tamaños de aproximadamente 2 a 3 mm de diámetro. La reducción de tamaño se utiliza para asegurar que la partícula alcanza rápidamente la temperatura a la que tiene lugar la termólisis, tal como en aproximadamente 0,5 a 3 segundos. El desgaste de la biomasa puede utilizarse en realizaciones en las que la biomasa experimentará por ejemplo una termólisis ultrarrápida. En realizaciones en las que la termólisis de la celulosa incluye tratamientos EM/EA, el secado y/o el desgaste de la biomasa pueden ser opcionales.

A continuación, se puede realizar termólisis ultrarrápida sometiendo la biomasa a vapor o gas inerte, o una combinación de vapor y gas inerte, opcionalmente junto con uno o más de los tratamientos EM/EA. Los tratamientos EM/EA pueden emplearse para aumentar la velocidad de transferencia de calor y ayudar a romper las estructuras microcristalinas de las moléculas poliméricas más grandes y más complejas. En algunas realizaciones, se pueden aplicar uno o más de PEF, energía ultrasónica o energía de microondas a la biomasa inmediatamente antes de que entre o cuando pase a través del reactor de celulosa o de cualquier reactor posterior. Como tal, una parte del reactor puede incluir un generador de tratamiento EM/EA para dirigir el tratamiento EM/EA a la biomasa antes o cuando pasa a través del tubo del reactor, por ejemplo. En algunas realizaciones, se aplica energía de microondas, mientras que en otras realizaciones se aplica energía ultrasónica, mientras que en todavía otras realizaciones, tanto la energía de microondas como la de ultrasonidos se aplican a la biomasa en, o antes, el mismo reactor. La energía de microondas y ultrasonidos se puede aplicar en cualquier orden, por separado, en proximidad inmediata, consecutiva o simultáneamente. Esta combinación de tratamientos puede ser particularmente útil, ya que la energía de ultrasonidos puede romper los cristales de celulosa, mientras que la energía de microondas puede proporcionar un calentamiento rápido. En algunas realizaciones, la energía de ultrasonidos se puede aplicar a una frecuencia de 20 a 40 kHz o de 200 kHz a 1 MHz y una duración de 1 a 5 segundos o de 30 a 90 segundos. La energía de microondas se puede aplicar a una frecuencia de 0,8 a 3 GHz y una duración de 1 a 10 segundos. En algunas realizaciones, cuando los tratamientos de EM/EA se usan en la etapa de hidrólisis de celulosa, las etapas de secado y/o desgaste de la biomasa antes de introducirla en el reactor de celulosa se pueden omitir.

La termólisis ultrarrápida se puede realizar usando un proceso continuo, tal como alimentando la biomasa en un reactor de vapor continuo. En algunas realizaciones, el reactor incluye solamente vapor como gas portador. En otras realizaciones, el vapor se utiliza en combinación con un gas inerte para hidrolizar y transportar la biomasa. Entre los ejemplos de gases inertes que se pueden usar incluyen CO<sub>2</sub>, CO, nitrógeno, hidrógeno o combinaciones de los mismos. Ciertos gases portadores pueden dar lugar a reacciones que favorecen la producción de ciertos productos de celulosa. Como tal, el gas o gases portadores se pueden seleccionar y utilizar de acuerdo con los productos deseados. Por ejemplo, el uso de hidrógeno como gas portador puede dar lugar a la producción de bioaceites menos oxigenados.

En algunas realizaciones, el vapor y/o gas sobrecalentado se pueden aplicar a la biomasa a una temperatura entre aproximadamente 350 y aproximadamente 550 grados centígrados. En algunas realizaciones, el vapor y/o gas sobrecalentado puede aplicarse a la biomasa a una temperatura entre aproximadamente 400 y aproximadamente 450 grados centígrados. Las temperaturas reales dependen de la materia prima y de los productos deseados. En algunas realizaciones, el vapor y/o gas sobrecalentado pueden aplicarse a la biomasa a una presión de entre aproximadamente 0 bar y aproximadamente 4 bares, tal como a una presión de entre aproximadamente 1 bar y aproximadamente 2 bares, dependiendo de las pérdidas de presión en el sistema. Utilizando la temperatura y el tiempo de residencia apropiados, se rompe la unión entre la lignina y la celulosa, y la celulosa se hidroliza por el vapor en azúcares de C6 y otros compuestos volátiles que se vaporizan. El sólido que permanece después de la vaporización de la celulosa consiste en un carbón de lignina. En algunas realizaciones, se puede seleccionar la presencia de vapor y el uso de una temperatura que sea suficientemente baja para evitar sustancialmente la pirólisis de la biomasa, lo que causaría que la celulosa formara una proporción mucho mayor de diversos hidrocarburos tales como alquitrán, aceites y gases. Por lo tanto, en dichas realizaciones, la temperatura de la reacción de termólisis debe ser lo suficientemente alta para la hidrólisis pero no demasiado alta o bien la celulosa se pirolizará y la composición química de los productos se alterará en gran medida. En algunas realizaciones, la termólisis puede durar de aproximadamente 30 segundos a un minuto (incluyendo de medio a cinco segundos en el reactor).

En otras realizaciones, la termólisis de celulosa puede realizarse usando dos o más reactores continuos de vapor y/o gas sobrecalentado. Las condiciones de reacción del primer reactor de celulosa, incluyendo temperatura, presión, tiempo de reacción y gas portador, pueden seleccionarse de tal manera que la reacción de hidrólisis de la celulosa favorezca la producción de uno o más primeros productos celulósicos. Por ejemplo, el primer reactor de celulosa puede producir oligómeros de celulosa o una proporción más elevada de un azúcar de C-6 específico. El segundo reactor de celulosa y cualquiera reactor de celulosa posterior pueden tener diferentes condiciones de reacción, tal como para completar la hidrólisis de la celulosa. En dichas realizaciones, el segundo reactor puede considerarse un segundo reactor de hidrólisis de celulosa. Por ejemplo, el primer reactor de celulosa puede estar a una temperatura de 350-500 °C, mientras que el segundo reactor de celulosa puede estar a una temperatura de 450-550 °C, siendo la temperatura en el primer reactor menor que en el segundo reactor. En otras realizaciones, el segundo reactor puede proporcionar condiciones para pirolizar la lignina, en cuyo caso el segundo reactor puede comprender un reactor de



pirólisis de lignina. Esto puede seguir a la hidrólisis completa de la celulosa. Por ejemplo, el primer reactor puede hidrolizar la celulosa a una temperatura de aproximadamente 350-550 °C y el segundo reactor puede pirolizar la lignina a una temperatura de 450-650 °C, con la temperatura del primer reactor menor que el segundo reactor. En otras realizaciones adicionales, la hidrólisis de celulosa puede realizarse parcialmente mediante un primer reactor de hidrólisis de celulosa para producir un primer producto de azúcar celulósico y, después, la hidrólisis de celulosa puede completarse mediante un segundo reactor de hidrólisis de celulosa. Por tanto, un tercer reactor (un reactor de pirólisis de lignina) puede pirolizar la lignina. En dichas realizaciones, el primer reactor puede estar a una temperatura de 350-500 °C, el segundo reactor puede estar a una temperatura de 400-550 °C y el tercer reactor puede estar a una temperatura de aproximadamente 450-650 °C, siendo la temperatura en el primer reactor menor que en el segundo reactor y siendo la temperatura en el segundo reactor menor que en el tercer reactor.

En algunas realizaciones, el reactor final puede tratar la fracción de lignina restante después de la eliminación de la celulosa por uno o más reactores de celulosa para gasificar la lignina. Tal reactor puede ser un reactor de vapor continuo como los utilizados para la termólisis de la celulosa, pero puede aplicar una temperatura más alta, tal como aproximadamente 900-1200°C, para producir hidrógeno y monóxido de carbono que pueden usarse para procesos de conversión química.

Los azúcares de C6 vaporizados y volátiles pueden separarse a continuación de la biomasa remanente y recogerse. En algunas realizaciones, la biomasa restante (tal como carbón de lignina) y los vapores se pasan a un separador para separar los vapores de los sólidos, tal como un separador ciclónico, que puede estar en línea dentro del circuito/tubo de vapor. El vapor separado incluye los vapores celulósicos hidrolizados, que a continuación pueden condensarse, tal como mediante un condensador de contacto directo, un depurador o un aparato similar. Estos vapores también contienen energía térmica significativa, que puede recuperarse. Los azúcares celulósicos pueden extraerse entonces del líquido condensado, mediante, por ejemplo, cualquiera de las tecnologías enumeradas anteriormente para los productos de hemicelulosa. Los azúcares celulósicos separados pueden incluir glucosa, levoglucosano y ácido levulínico, por ejemplo. Los azúcares celulósicos y los otros productos recogidos pueden utilizarse después para diversos propósitos comerciales o para su posterior procesamiento, tal como la fermentación para producir alcoholes, ya sea en combinación con el proceso de fraccionamiento o por separado. Otras tecnologías posteriores que pueden utilizar los productos primarios de este proceso de fraccionamiento incluyen el proceso de reforma de la fase acuosa de Virent (para gasolina sintética, combustible pesado y diésel); tecnologías de monómero binario de Segetis; y otros procesos de conversión catalítica y procesos de reacción química o bioquímica.

El sólido que queda después de la hidrólisis de la celulosa es un carbón de lignina. El carbón de lignina puede procesarse adicionalmente. Por ejemplo, a lignina puede convertirse químicamente en otros productos, tales como fenoles, lignosulfonatos solubles y, más generalmente, en una gama de materias primas aromáticas, cíclicas y alifáticas. Como alternativa, algunos tipos de lignina pueden pirolizarse para producir fenoles para resinas sintéticas. En algunas realizaciones, la lignina se puede alimentar en un reactor como el reactor de celulosa, como reactor final. Este reactor de lignina puede usarse para pirolizar la lignina para producir productos fenólicos, por ejemplo. En otras realizaciones, la lignina puede quemarse para producir energía, tal como para el funcionamiento del sistema de fraccionamiento. En todavía otras realizaciones, la lignina puede gasificarse para producir hidrógeno y gas de síntesis, encontrando el hidrógeno utilizada en las reacciones de reducción de algunos de los otros productos primarios,

La termólisis y la pirólisis pueden llevarse a cabo en reactores de tubo de flujo arrastrado sencillos o reactores de lecho fluidizado. Ejemplos de reactores de lecho fluidizado que pueden usarse incluyen lecho fluidizado de burbujeo o un lecho fluidizado circulante, o en reactores especiales, tales como un reactor de cono giratorio u otro reactor de tipo ablativo. En las realizaciones que incluyen un reactor de gasificación de lignina, el reactor puede ser cualquiera de los reactores anteriores usados para la termólisis o pirólisis, o puede ser un reactor de lecho fijo de arrastre ascendente o de arrastre descendente. por ejemplo.

Los reactores de lecho fluidizado requieren, generalmente, un medio inerte y calentar la biomasa a través del contacto con el medio particulado precalentado. El medio inerte también puede tener cierta actividad catalítica. La biomasa se introduce en el lecho inerte, que es fluidizado por una corriente de gas caliente que pasa a través de ella.

En la figura 8 se muestra una realización de un sistema y procedimiento para hidrólisis y fraccionamiento de celulosa. Después de la hidrólisis de la hemicelulosa, tal como mediante el sistema mostrado en las figuras 3-7, la biomasa puede prepararse para la termólisis ultrarrápida mediante desecación de la biomasa. La biomasa se pasa a través de la prensa de tornillo de alta presión de deshidratación final 78 que también funciona como tornillo de alimentación, por ejemplo, y en un circuito de vapor de calor sobrecalentado 80 a través de una entrada del circuito de vapor 82 para vapor de agua sobrecalentado secando la biomasa. El circuito de vapor sobrecalentado 80 incluye un soplador 84 que hace que el vapor y la biomasa arrastrada circulen a través del circuito de vapor 80 al separador 86, tal como un separador ciclónico, que separa el vapor de la biomasa. El separador incluye una entrada 88, una primera salida 90 a través de la cual sale el vapor para recircular en el circuito de vapor 80 y una segunda salida 92 a través de la cual sale la biomasa seca. Después de salir del separador, la biomasa puede pasar al sistema de

trituration 94. Desde el sistema de trituration 94, la biomasa pasa a un sistema de alimentación de sólidos 96, como los descritos anteriormente, y luego al reactor de vapor 100 a través de la entrada 102 del reactor de vapor para la separación de la celulosa de la lignina, la hidrólisis de la celulosa en vapores de azúcares de C6 y otros volátiles, y la formación de carbón de lignina dentro del reactor de vapor 100. El reactor de termólisis también puede contener

5 opcionalmente uno o más del generador de tratamiento EM/EA 103. Los vapores de celulosa y el carbón de lignina pasan a través del reactor 100 de vapor a un separador 104, tal como un separador ciclónico, en el que el azúcar de C6 y otros vapores volátiles se separan del carbón de lignina. El separador incluye una entrada 106, una primera salida 108 a través de la cual los vapores de azúcar de C6 separados y vapor salen del separador y una segunda salida 110 a través de la cual el carbón de lignina sale del separador.

10 En la figura 9 se muestra una realización alternativa. Como en la figura 8, la biomasa puede pasar primero a través de un circuito de vapor sobrecalentado 80 para el secado y un sistema de trituration 94. El material sólido que incluye celulosa y lignina pasa a continuación a un primer reactor de vapor 100 para la hidrólisis de la celulosa y, después, a través del separador en un segundo reactor 200 de vapor. Las condiciones del primer reactor de vapor 100 solo pueden hidrolizar parcialmente la celulosa, en cuyo caso el primer reactor de vapor 100 es un primer reactor de hidrólisis de celulosa y el segundo reactor de vapor 200 puede ser un segundo reactor de hidrólisis de celulosa que completa la hidrólisis de celulosa. Como alternativa, el primer reactor de vapor 100 puede completar la hidrólisis de la celulosa de tal manera que el sólido restante esté compuesto solamente por lignina, en cuyo caso el segundo reactor de vapor 200 puede ser un reactor de lignina para la pirólisis de la lignina. El producto resultante del

15 segundo reactor puede separarse por un separador 110, en fenoles y alquitrán.

20 En la figura 9, el segundo reactor 200 de vapor es un tubo de vapor sobrecalentado como el primer reactor 100 de vapor. La biomasa restante pasa del primer separador 104 al segundo reactor 200 de vapor. El segundo reactor de vapor 200 incluye una entrada 202 y una salida 206 a través de la cual la biomasa restante pasa a un segundo separador 204. El segundo separador incluye una primera salida 208 y una segunda salida 210. En la realización mostrada, el primer reactor de vapor 100 hidroliza completamente la celulosa y el segundo reactor de vapor 200 piroliza la lignina para producir fenoles. Los fenoles salen del separador como vapor a través de la primera salida 208 mientras que el carbón de lignina restante sale del separador a través de la segunda salida 210. En realizaciones alternativas, o en condiciones alternativas, el primer reactor de vapor 100 puede hidrolizar

25 incompletamente la celulosa y el segundo reactor de vapor puede completar la hidrólisis de celulosa con los productos celulósicos que salen del segundo separador 204 como vapor a través de la primera salida 208 y el carbón de lignina existente a través de la segunda salida 210.

30 En algunas realizaciones, el biofraccionamiento puede incluir una rama después de la retirada de los azúcares hemicelulósicos y antes de que la celulosa y la lignina restantes continúen a la termólisis de celulosa. En esta rama, una corriente lateral de sólidos de celulosa y lignina puede desviarse para procesamiento separado. Por ejemplo, la corriente lateral puede someter el sólido a tratamiento químico para separar la celulosa y la lignina. Por ejemplo, un tratamiento estándar de pulpa de madera, tal como el proceso con sulfito (utilizando sales de ácido sulfuroso como sulfitos o bisulfitos) o el proceso kraft (utilizando hidróxido de sodio y sulfato de sodio) o el proceso de

35 fraccionamiento limpio en laboratorio nacional de energías renovables (National Renewable Energy Laboratory (NREL)) usando metilisobutilcetona) para disolver la lignina. Por tanto, la pasta de celulosa resultante se puede obtener como producto que se puede usar para la producción de papel o productos químicos celulósicos y fibras. Tal corriente lateral opcional proporciona flexibilidad adicional al sistema.

40 Los diversos sistemas y procesos mostrados en las Figuras 1-9 se pueden usar individualmente, en combinación con otros sistemas de fraccionamiento o pueden usarse juntos en diversas combinaciones. Cuando se usan conjuntamente, los sistemas y procesos mostrados en las figuras 1-9 pueden usarse para formar una realización de un sistema de fraccionamiento en flujo continuo para la separación de los no carbohidratos (lípidos, proteínas, etc.), hemicelulosa, celulosa y lignina de un material de biomasa lignocelulósica en el que la biomasa fluye continuamente a través de todo el sistema. El sistema continuo separa el material lignocelulósico en cuatro o más fracciones separadas, aislando individualmente los no carbohidratos, los azúcares hemicelulósicos, los azúcares celulósicos y la lignina.

45

50

55 En la figura 10 se muestra un diagrama de flujo que muestra un ejemplo de cómo se puede usar el proceso para fraccionar totalmente la biomasa lignocelulósica. Se puede crear un sistema único mediante el cual se pueden incluir las diversas opciones y que se pueden sortear según se desee. De esta forma, el sistema proporciona un alto grado de flexibilidad, capaz de acomodar cualquier materia prima y de ajustarse para producir los productos de fraccionamiento deseados. Como se muestra en el ejemplo de la figura 10, la primera etapa de es la preparación de la biomasa 302. Esta etapa puede o no ser necesaria, dependiendo de la naturaleza y la fuente de la biomasa. si se desean extractos, la siguiente etapa es eliminar los extractos 304. Si no se desean extractos, se puede omitir o sortear esta etapa. A continuación, la biomasa pasa a la siguiente etapa, que es la desvolatilización 306. Los volátiles liberados durante esta etapa pueden aislarse en la etapa de aislamiento de los volátiles 308. La biomasa

60 procede a continuación a las etapas de hidrólisis de hemicelulosa 310 y separación de los componentes líquidos y sólidos 312. El componente líquido puede después proceder a la etapa de aislamiento de los productos hemicelulósicos 314. Si la hidrólisis de hemicelulosa no es completa, el sólido puede continuar a través de las etapas de hidrólisis de hemicelulosa 310 y separación de los componentes líquidos y sólidos 312 de nuevo, aunque esto

65

ocurrirá en un segundo reactor de hemicelulosa y puede usar diferentes condiciones de reacción, tales como con incremento del tiempo y/o la temperatura. Cuando la hidrólisis de hemicelulosa está completa, la biomasa sólida pasa a la etapa de hidrólisis de la celulosa 316. Los vapores producidos por la hidrólisis de celulosa se aíslan en la etapa de aislamiento de productos celulósicos 318. Si la hidrólisis de la celulosa es incompleta, la biomasa restante  
5 puede repetir la etapa de hidrólisis de la celulosa, aunque el proceso ocurrirá en un segundo reactor de hidrólisis de celulosa y puede utilizar diferentes condiciones de reacción, tales como con aumento del tiempo y/o la temperatura. Si la hidrólisis de celulosa está completa, el carbón de lignina 320 resultante puede obtenerse como producto final o puede proceder a la etapa de pirólisis de lignina 322 o de gasificación de lignina 324. En una realización alternativa, después de completarse la hidrólisis de hemicelulosa 310, el componente sólido puede utilizarse para la producción  
10 de cartón comprimido 330.

Se puede suministrar calor a los diversos reactores usando diversos medios. Por ejemplo, se puede usar aceite caliente como en los sistemas de calefacción convencionales, teniendo los reactores camisas de aceite caliente. En algunas realizaciones, la inducción puede usarse para calentar el vapor y/o calentar la biomasa. En otras  
15 realizaciones, puede utilizarse energía infrarroja para el calentamiento.

Se han proporcionado varios tiempos de residencia aproximados. En algunas realizaciones, todo el proceso de fraccionamiento de biomasa pretratada está entre cuatro y medio y once minutos y medio. En realizaciones que emplean un proceso de baja presión para separar la hemicelulosa hidrolizada del sólido de lignina-celulosa en la  
20 etapa de hidrólisis, la biomasa pretratada puede fraccionarse en aproximadamente siete y medio a once minutos y medio y la biomasa cruda puede pretratarse completamente (incluyendo la extracción de aceite) y fraccionado en aproximadamente catorce y medio a veintidós minutos. En las realizaciones que emplean un proceso de alta presión para separar la hemicelulosa hidrolizada del sólido de lignina-celulosa en la etapa de hidrólisis, la biomasa pretratada puede fraccionarse en aproximadamente cuatro y medio a nueve minutos y la biomasa cruda puede  
25 tratarse completamente previamente (incluyendo extracción de aceite) y fraccionado en aproximadamente once y medio a dieciocho minutos y medio.

En la descripción detallada anterior, la invención se ha descrito con referencia a realizaciones específicas. Sin embargo, puede apreciarse que pueden realizarse diversas modificaciones y cambios.  
30

## REIVINDICACIONES

1. Un método de fraccionamiento de material de biomasa lignocelulósica que comprende:

5       alimentar la biomasa a un reactor de desvolatilización para retirar los componentes volátiles no lignocelulósicos de la biomasa usando vapor sobrecalentado a una temperatura entre aproximadamente 120 °C y aproximadamente 220 °C y una presión comprendida entre aproximadamente 6 y aproximadamente 16 bar; después de la desvolatilización, alimentar la biomasa a un reactor de hidrólisis de hemicelulosa para separar e hidrolizar hemicelulosa;

10       separar la biomasa en un primer componente sólido y un componente líquido, en el que el componente líquido incluye hemicelulosa hidrolizada en agua o disolvente y en el que el componente sólido incluye celulosa y lignina y tiene menos de aproximadamente el 10 % de hemicelulosa;

15       alimentar el componente sólido a un reactor de hidrólisis de celulosa que comprende un reactor de vapor sobrecalentado para hidrolizar y vaporizar el componente de celulosa; y  
y condensar la celulosa hidrolizada y vaporizada.

2. El método de la reivindicación 1, en el que el reactor de hidrólisis de celulosa aplica vapor sobrecalentado a la biomasa a una temperatura de al menos 300 °C, preferiblemente a una temperatura entre aproximadamente 350 y 550 °C.

20       3. El método de reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que el reactor de hidrólisis de celulosa aplica presión a la biomasa de 1-3 bares.

25       4. El método de la reivindicación 1, en el que el reactor de hidrólisis de celulosa aplica una mezcla de vapor y un gas al componente sólido, comprendiendo preferentemente el gas nitrógeno, hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono o combinaciones de los mismos.

30       5. El método de la reivindicación 1, que comprende, adicionalmente, aplicar un tratamiento electromagnético o electroacústico (EM/EA) al componente sólido inmediatamente antes de que entre en el reactor de hidrólisis de celulosa y/o a medida que pasa a través del reactor de hidrólisis de celulosa, incluyendo el tratamiento con EM/EA, preferentemente, campo eléctrico pulsado, energía ultrasónica, energía de microondas y combinaciones de los mismos.

35       6. El método de reivindicación 1, en el que el reactor de desvolatilización comprende un reactor de vapor continuo.

40       7. El método de la reivindicación 1, que comprende además alimentar el componente sólido a un secador que comprende un reactor de vapor sobrecalentado continuo después de separar la biomasa en el reactor de hidrólisis de hemicelulosa para reducir el contenido de agua del componente sólido antes de alimentar el componente sólido al reactor de hidrólisis de celulosa.

45       8. El método de la reivindicación 1, que comprende, además, el desgaste del componente sólido después de separar la biomasa en el reactor de la hidrólisis de hemicelulosa y antes de alimentar el componente sólido en el reactor de hidrólisis de la celulosa.

50       9. El método de la reivindicación 1, en el que el reactor de hidrólisis de hemicelulosa comprende un reactor de vapor sobrecalentado continuo.

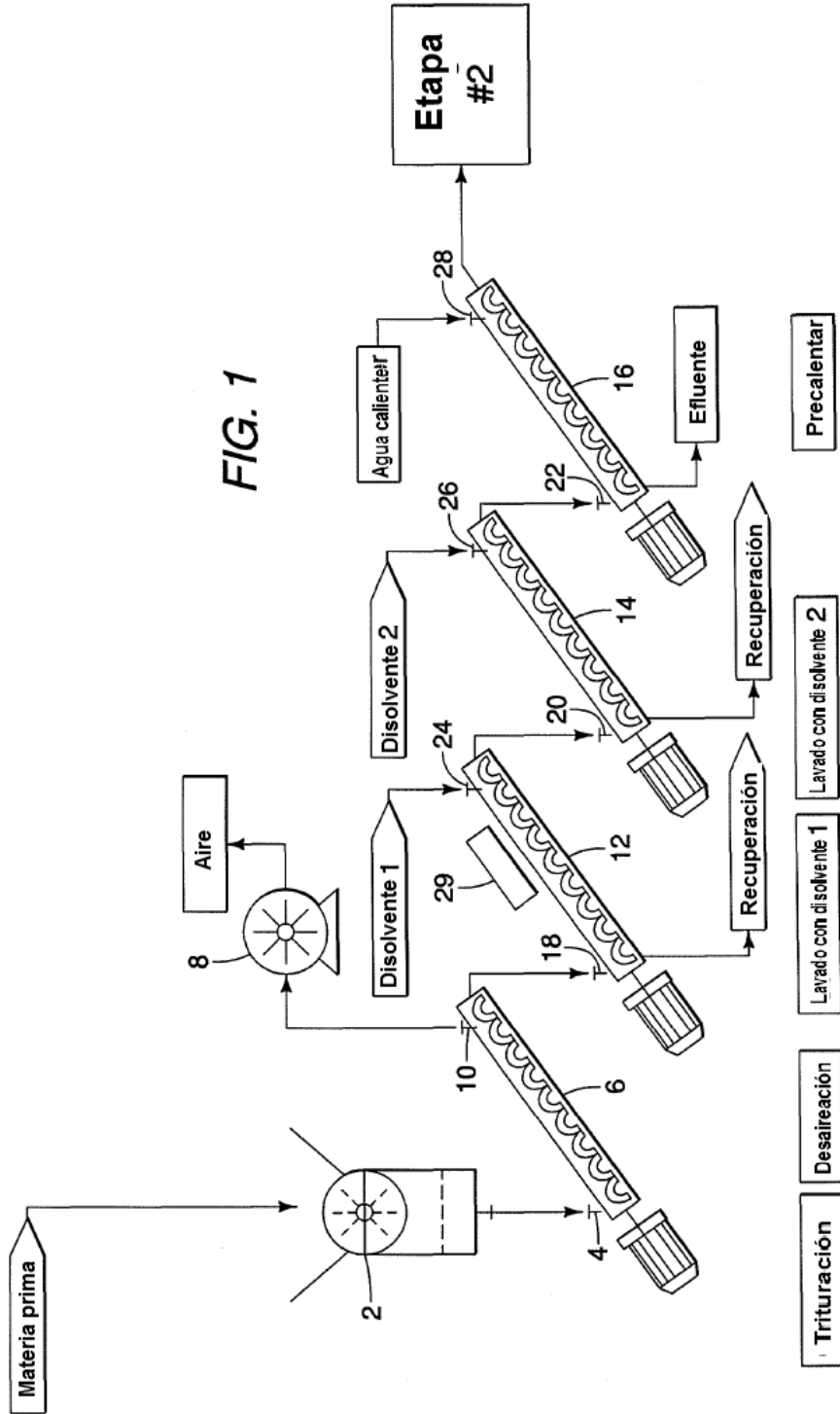
55       10. El método de la reivindicación 1, en el que el reactor de hidrólisis de celulosa produce un vapor de celulosa y un carbón de lignina.

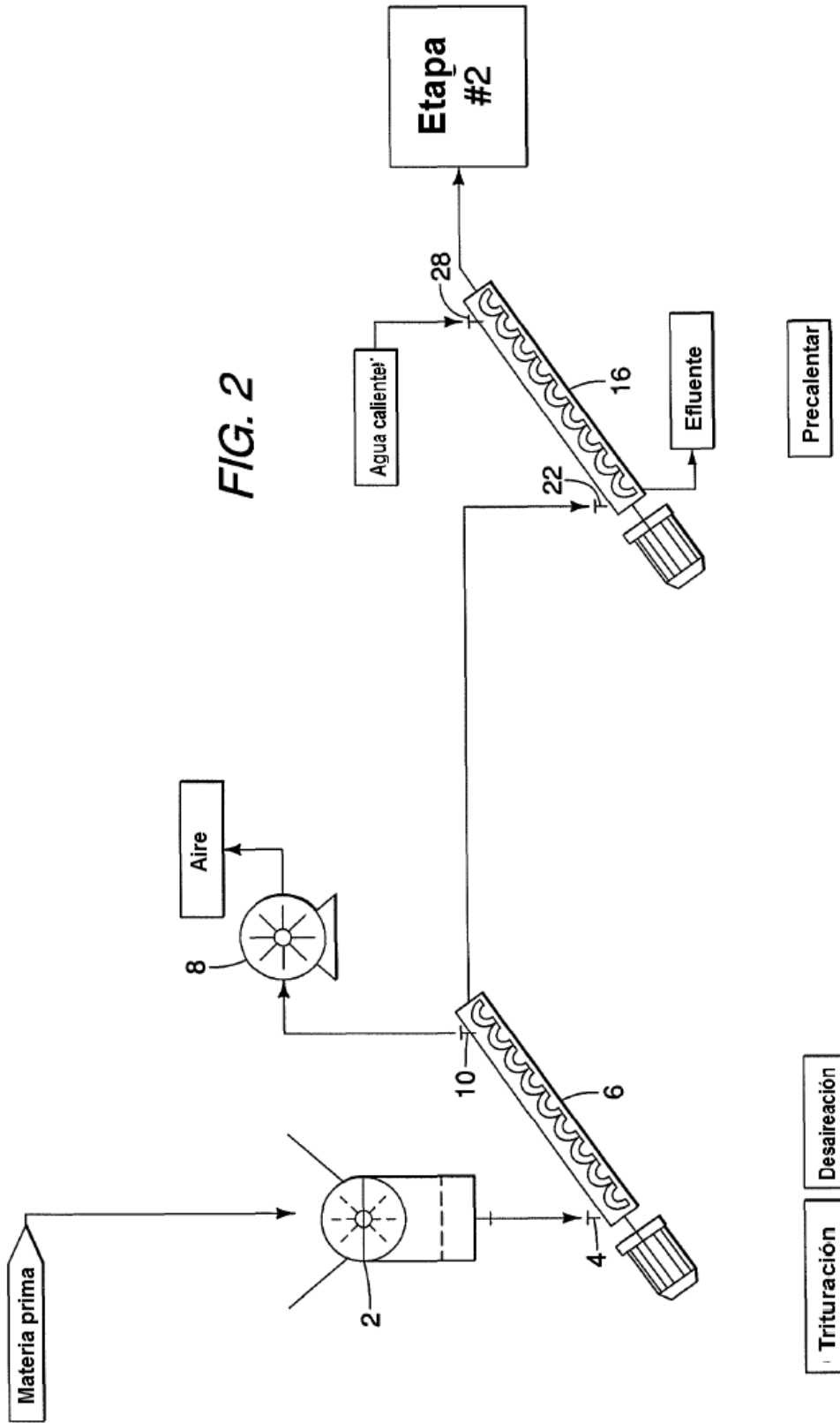
60       11. El método de la reivindicación 1, en el que el reactor de hidrólisis de celulosa hidroliza la celulosa y produce un vapor de azúcar celulósico y un segundo componente sólido.

65       12. El método de la reivindicación 11, que comprende además alimentar el segundo componente sólido a un segundo reactor de hidrólisis de celulosa que comprende un reactor de vapor sobrecalentado continuo.

70       13. El método de la reivindicación 12, en el que el primer reactor de celulosa hidroliza parcialmente la celulosa y el segundo reactor de hidrólisis de celulosa completa la hidrólisis de la celulosa y separa la celulosa vaporizada de la lignina.

75       14. El método de la reivindicación 11, que comprende además alimentar el segundo componente sólido a un reactor de vapor sobrecalentado para reducir la lignina a un vapor condensable.





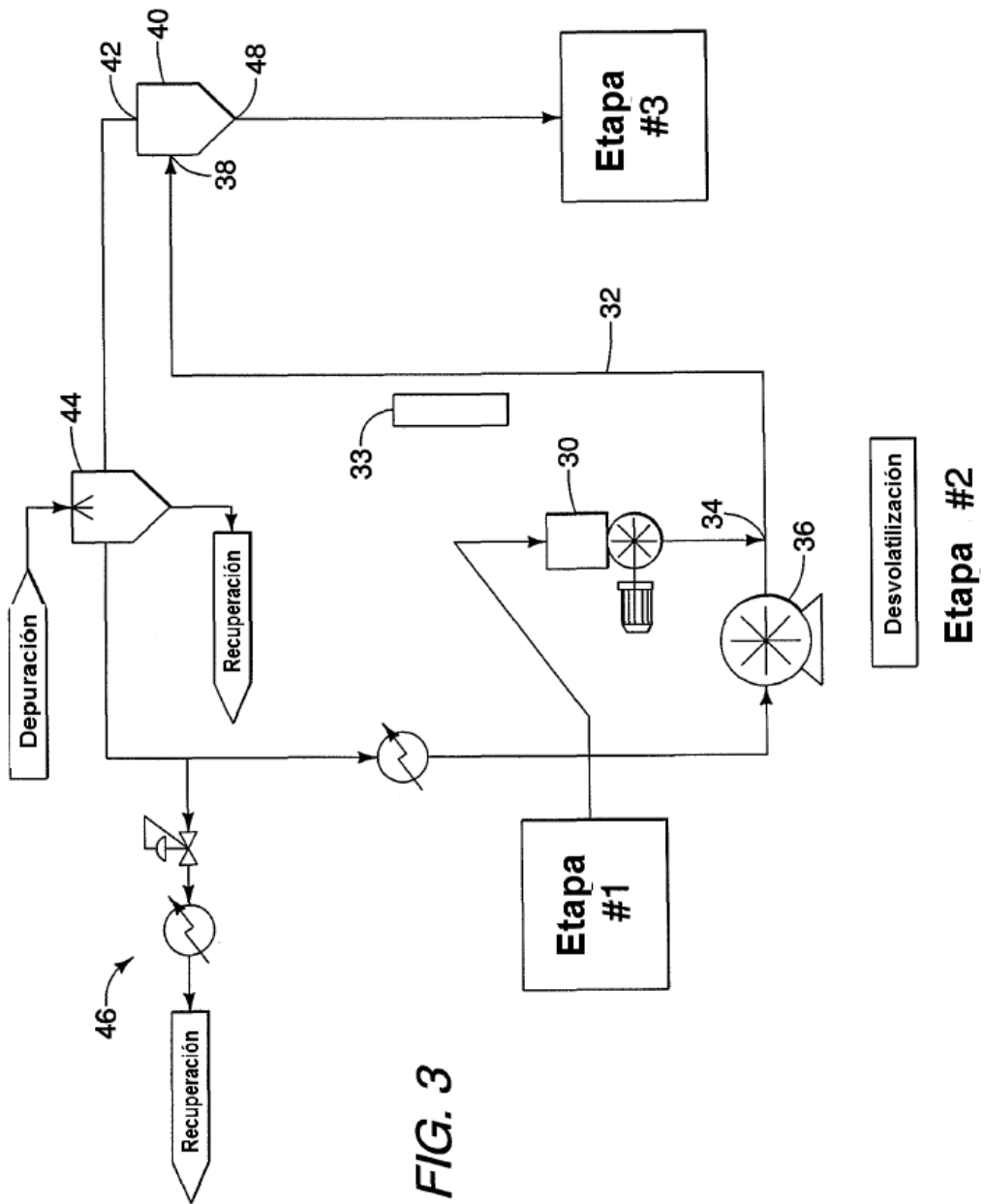
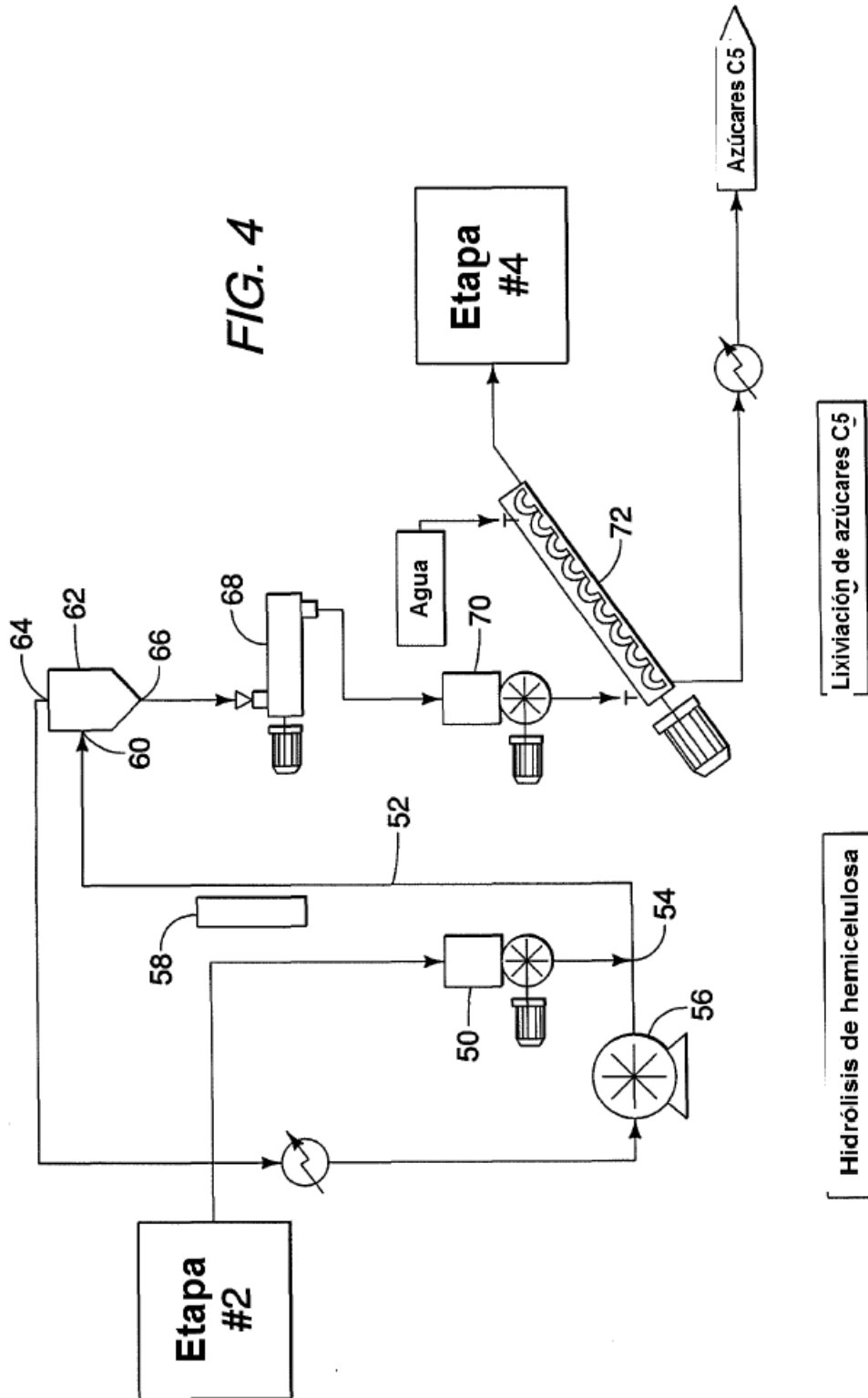


FIG. 3





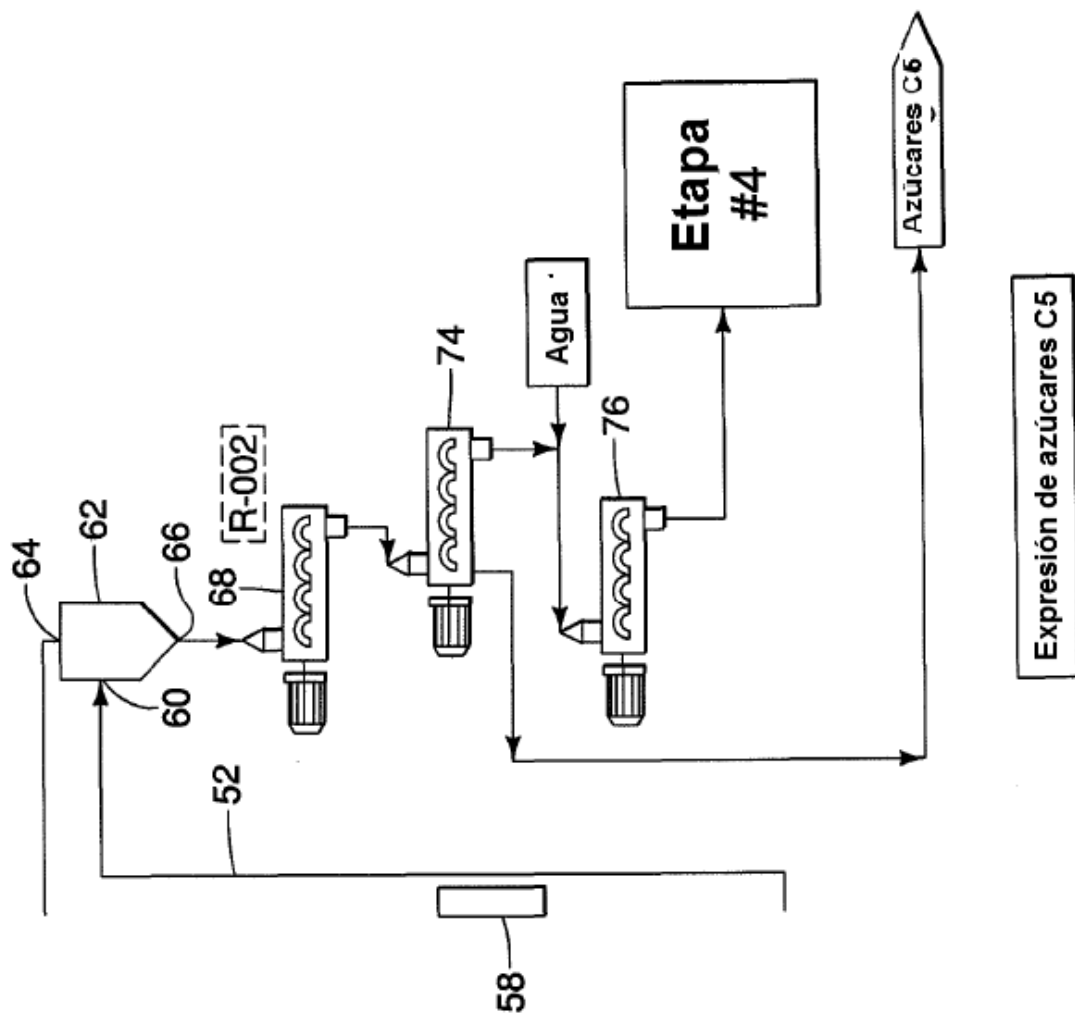
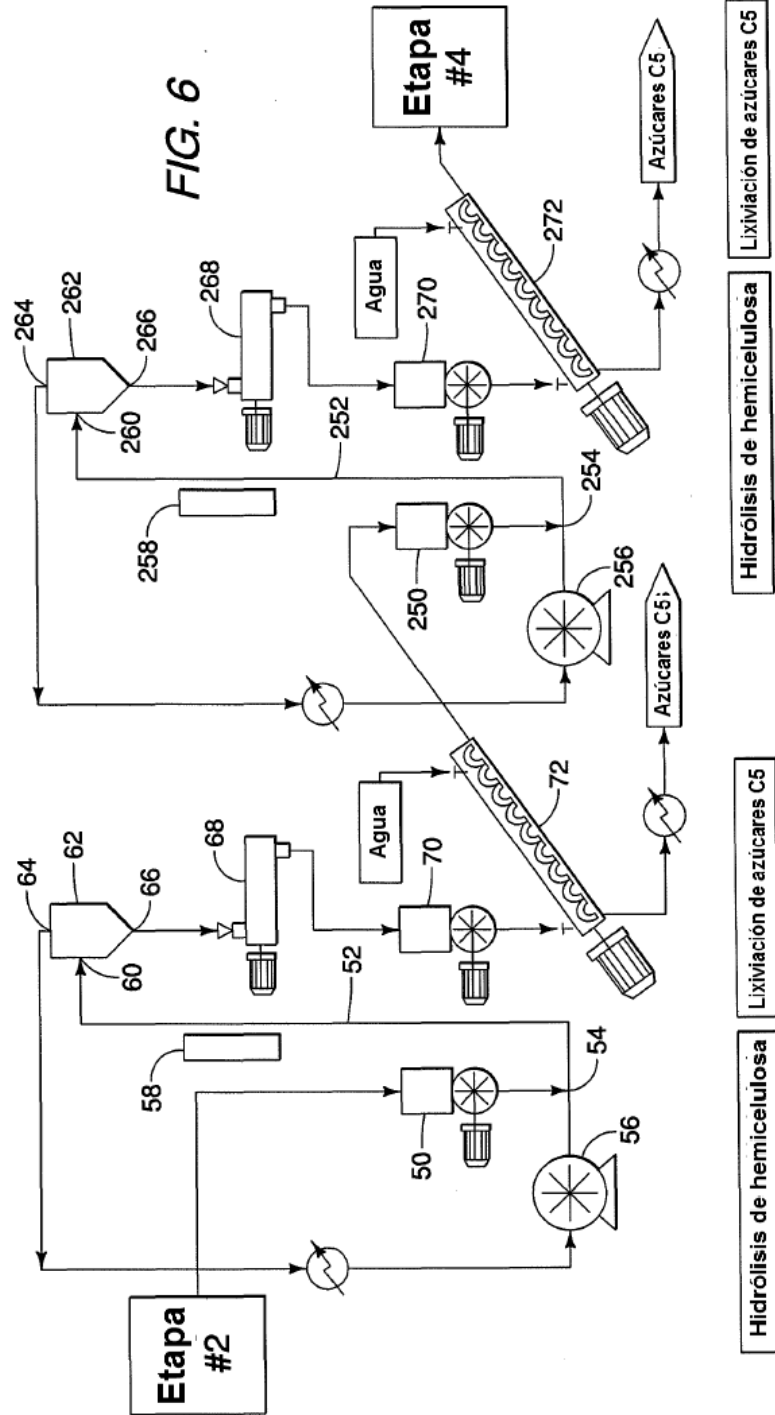
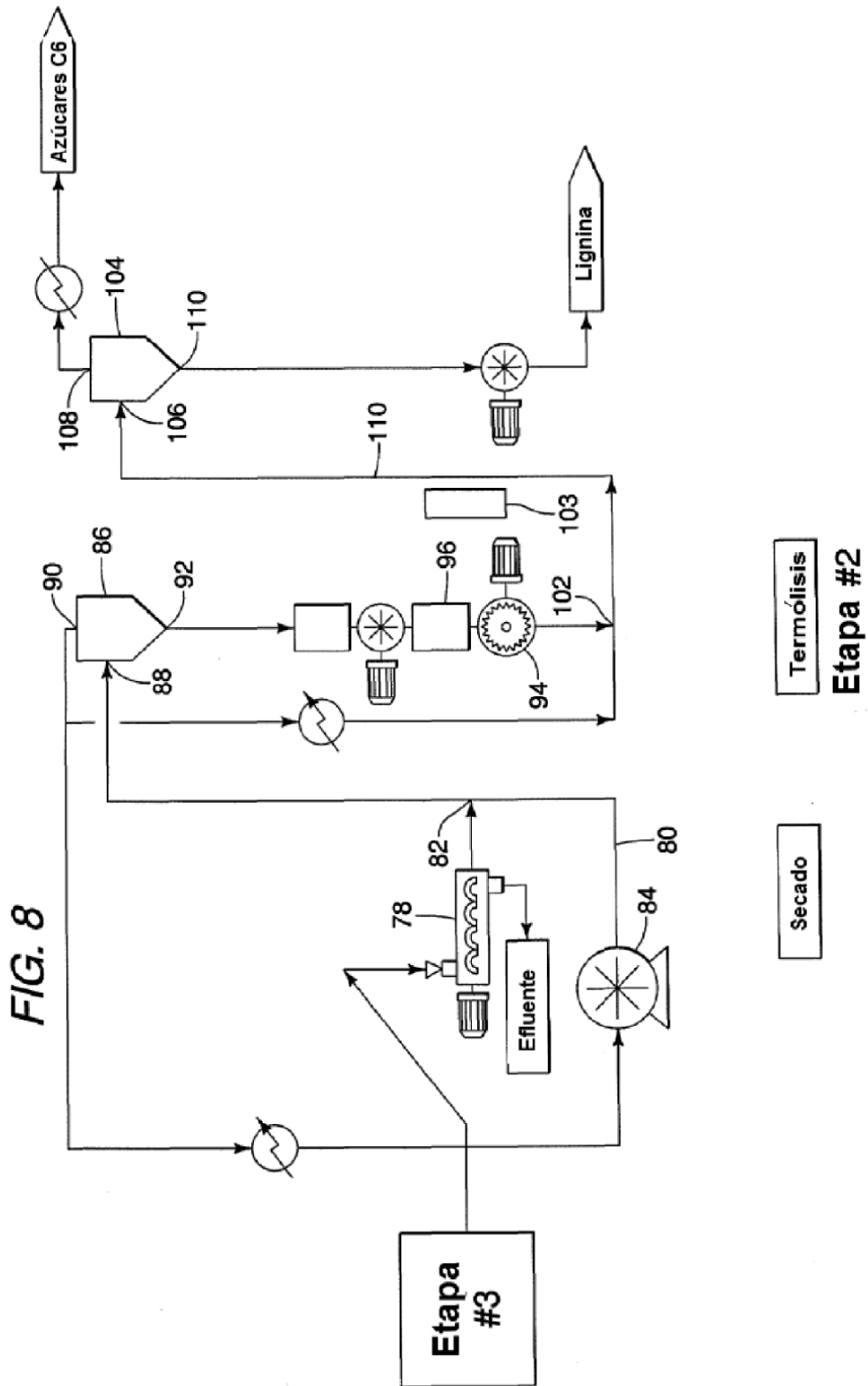
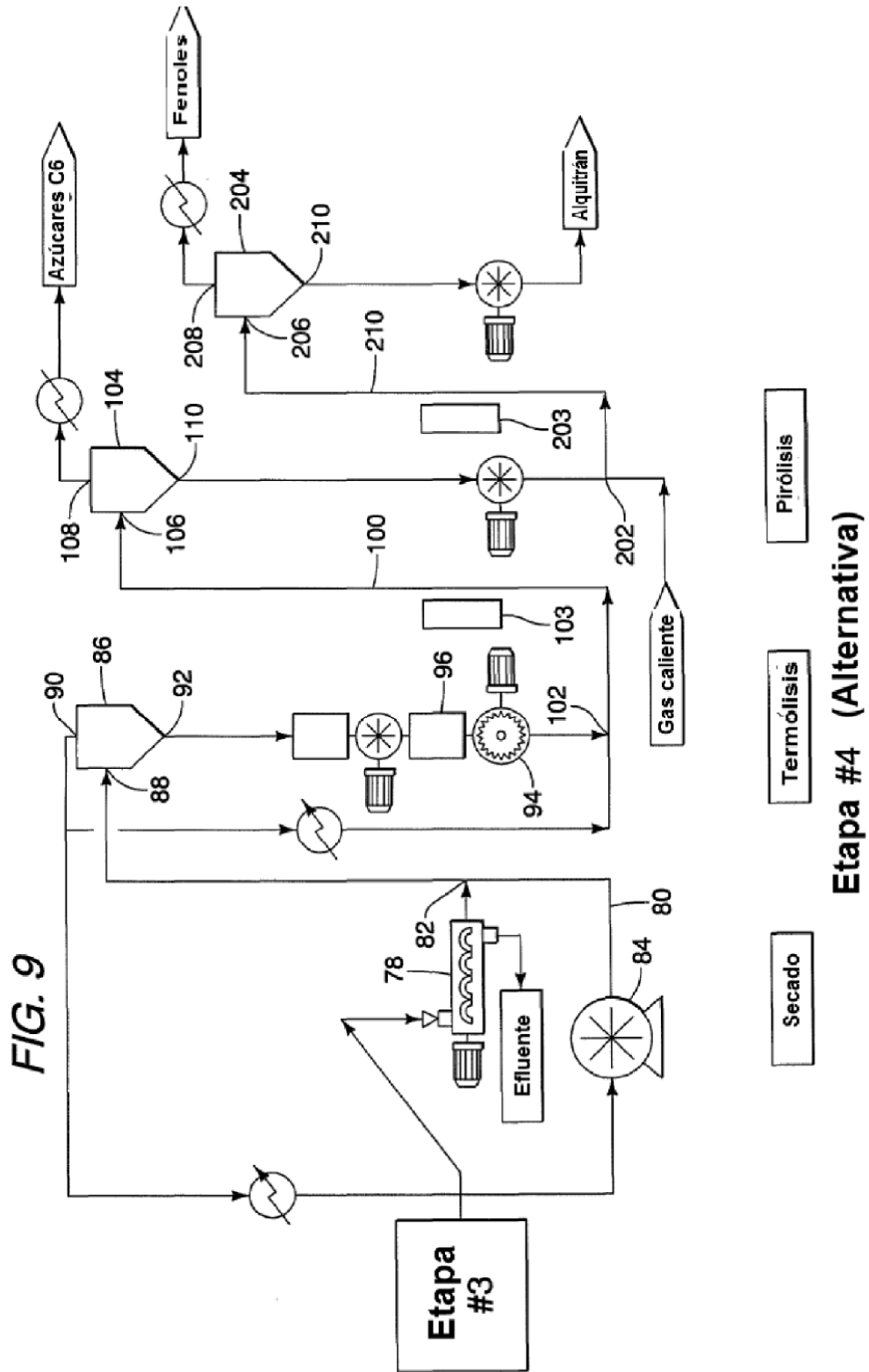


FIG. 5









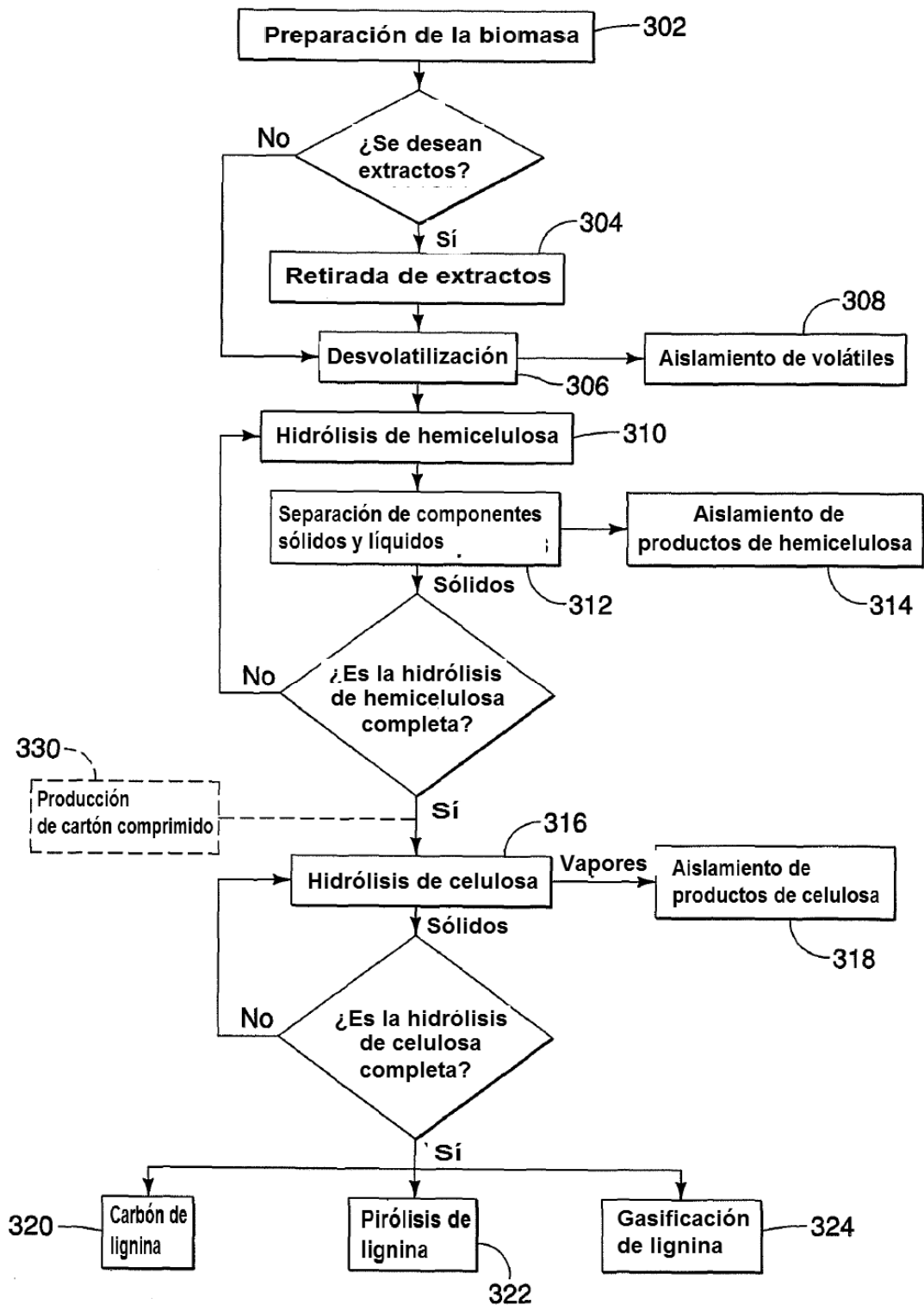


FIG. 10