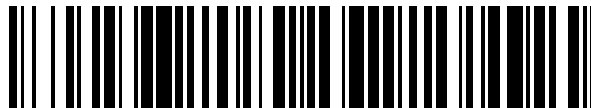


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 547 428**

51 Int. Cl.:

C12P 7/06 (2006.01)

C12N 1/20 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.04.2010 E 10770002 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.08.2015 EP 2425003**

54 Título: **Mejora de la captura del carbono en la fermentación**

30 Prioridad:

29.04.2009 US 173968 P

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

06.10.2015

73 Titular/es:

**LANZATECH NEW ZEALAND LIMITED (100.0%)
24 Balfour Road Parnell
Auckland 1052, NZ**

72 Inventor/es:

OAKLEY, SIMON DAVID

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 547 428 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

Mejora de la captura del carbono en la fermentación

Campo de la invención

5 Esta invención se refiere a los sistemas y procedimientos para mejorar la captura global de carbono y/o mejorar la eficacia global de procesos que incluyen la fermentación microbiana. En concreto, la invención se refiere a la mejora de la captura del carbono y/o a la mejora de la eficacia de procesos que incluyen la fermentación microbiana de un sustrato de gas de síntesis (o sintegás) que comprende CO.

Antecedentes de la invención

10 El etanol se está convirtiendo rápidamente en un importante combustible de transporte líquido rico en hidrógeno en todo el mundo. El consumo mundial de etanol en 2005 se estimó que era de 12.200 millones de galones. También se ha predicho que el mercado mundial para la industria del etanol para combustible crecerá considerablemente en el futuro debido a un incremento del interés por el etanol en Europa, Japón, EE. UU. y varias naciones en vías de desarrollo.

15 Por ejemplo, en EE. UU., el etanol se utiliza para producir E10, una mezcla de etanol al 10% en gasolina. En las mezclas E10, el componente etanol actúa como un oxigenante, lo que incrementa la eficacia de la combustión y reduce la producción de contaminantes del aire. En Brasil, el etanol satisface aproximadamente el 30% de la demanda de combustible para transporte, tanto en forma de un oxigenante mezclado en gasolina como en forma de un combustible puro por méritos propios. De igual forma, en Europa, las preocupaciones medioambientales por las consecuencias de las emisiones de gases de efecto invernadero han sido el estímulo para que la Unión Europea (UE) imponga a los países miembros un objetivo obligatorio con respecto al consumo de los combustibles sostenibles para transporte, tales como un etanol procedente de biomasa.

20 La inmensa mayoría del etanol para combustible se produce mediante procedimientos tradicionales de fermentación con levaduras que utilizan como la principal fuente de carbono los glúcidos procedentes de cultivos, tales como la sacarosa extraída de la caña de azúcar o el almidón extraído de cultivos de maíz. Sin embargo, el coste de estas materias primas para los glúcidos está influida por su valor como alimento para los humanos o como pienso para animales, mientras que el cultivo de plantaciones productoras de almidón o sacarosa para la producción de etanol no es económicamente sostenible en todas las regiones del planeta. Por lo tanto, es interesante desarrollar tecnologías que conviertan en etanol para combustible los recursos de carbono más abundantes y/o de menor coste.

25 El CO es un subproducto importante, rico en energía y de bajo coste, de la combustión incompleta de materia orgánica, tal como el carbón o el petróleo y los productos derivados del petróleo. Por ejemplo, se ha informado de que la industria del acero en Australia produce y libera a la atmósfera aproximadamente 500.000 toneladas de CO al año. Además, o como alternativa, las corrientes gaseosas ricas en CO (gas de síntesis) se pueden producir mediante la gasificación de materiales carbonosos, tales como carbón, petróleo y biomasa. Los materiales carbonosos se pueden convertir en productos gaseosos, entre ellos CO, CO₂, H₂ y, en menor cantidad, CH₄, mediante la gasificación con el uso de numerosos procedimientos, entre ellos la pirólisis, craqueo del alquitrán y gasificación del calcinado. El gas de síntesis también se puede producir en un proceso de reformado con vapor, tal como el reformado con vapor de metano o gas natural.

30 Los procesos catalíticos se pueden utilizar para convertir los gases que consisten principalmente en CO y/o CO e hidrógeno (H₂) en una serie de combustibles y productos químicos. Los microorganismos también se pueden utilizar para convertir estos gases en combustibles y productos químicos. Estos procesos biológicos, aunque generalmente son más lentos que las reacciones químicas, tienen varias ventajas sobre los procesos catalíticos, entre ellos mayor especificidad, mayor rendimiento, menor coste energético y mayor resistencia al envenenamiento.

35 La capacidad de los microorganismos para crecer en CO como única fuente de carbono se descubrió por primera vez en 1903. Más tarde se determinó que era una propiedad de los organismos que utilizan la vía bioquímica de la acetilcoenzima A (acetil-CoA) del crecimiento autótrofo (también conocido como la vía de Woods-Ljungdahl y la vía de la monóxido de carbono deshidrogenasa/acetil-CoA sintasa (CODH/ACS)). Un gran número de microorganismos anaerobios, entre ellos los microorganismos carboxidótrofos, fotosintéticos, metanógenos y acetógenos, se ha demostrado que convierten metabólicamente el CO en varios productos finales, a saber, CO₂, H₂, metano, n-butanol, acetato y etanol. Mientras que utilicen el CO como la única fuente de carbono, tales microorganismos producen al menos dos de estos productos finales.

40 Las bacterias anaerobias, tales como las del género *Clostridium*, se ha demostrado que producen etanol a partir de CO, CO₂ y H₂ a través de la vía bioquímica del acetil-CoA. Por ejemplo, diferentes cepas de *Clostridium ljungdahlii* que producen etanol a partir de gases se describen en la solicitud de patente internacional WO 00/68407, patente europea EP 117309, patentes de los EE. UU. n.ºs 5.173.429, 5.593.886 y 6.368.819, y las solicitudes de patente internacional WO 98/00558 y WO 02/08438. También se sabe que la bacteria *Clostridium autoethanogenum* sp produce etanol a partir de gases (Abrini et al. *Archives of Microbiology* 161, págs. 345-351 (1994)).

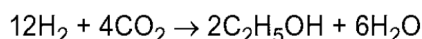
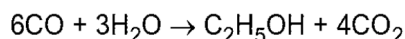
Sin embargo, la producción del etanol por microorganismos mediante la fermentación de gases está asociada típicamente a la coproducción de acetato y/o ácido acético. Como parte del carbono disponible se convierte por lo general en acetato/ácido acético en vez de en etanol, la eficacia de la producción de etanol con tales procesos de fermentación puede ser menor de lo deseable. De igual forma, a menos que el subproducto acetato/ácido acético se pueda utilizar para algún otro fin, podría plantear un problema de eliminación de residuos. Los microorganismos convierten el acetato/ácido acético en metano y, por lo tanto, podrían acabar contribuyendo a las emisiones de gases de efecto invernadero.

Las solicitudes de patente internacional WO 2007/11757 y WO 2008/115080 describen procedimientos que producen alcoholes, en concreto etanol, mediante la fermentación anaerobia de los gases que contienen monóxido de carbono. El acetato producido como subproducto del procedimiento de fermentación descrito en la solicitud de patente internacional WO 2007/11757 se convierte en el gas hidrógeno y en el gas dióxido de carbono, de los cuales uno o ambos se pueden utilizar en el proceso de fermentación anaerobia.

La fermentación de sustratos gaseosos que comprenden CO para producir productos tales como ácidos y alcoholes favorece típicamente la producción de ácidos. La productividad de los alcoholes puede reforzarse mediante los procedimientos conocidos en la técnica, tales como los procedimientos descritos en las solicitudes de patente internacional WO 2007/117157, WO 2008/115080, WO 2009/022925 y WO 2009/064200.

La patente de los EE.UU. US 7.078.201 y la solicitud de patente internacional WO 02/08438 también describen la mejora de los procesos de fermentación para producir etanol mediante la variación de las condiciones (p. ej., pH y potencial de oxidorreducción) del medio líquido de nutrientes en el cual se realiza la fermentación. Tal y como se describe en estas publicaciones, se pueden utilizar procedimientos parecidos para producir otros alcoholes, tal como el butanol.

La fermentación microbiana del CO en presencia de H₂ puede conducir a una transferencia de carbono sustancialmente completa a un alcohol. Sin embargo, en ausencia de suficiente H₂, parte del CO se convierte en alcohol, mientras que una porción significativa se convierte en CO₂, tal y como se muestra en las ecuaciones siguientes:



La producción de CO₂ representa la ineficacia de la captura global de carbono y, si se libera, también podría acabar contribuyendo a las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, el dióxido de carbono y otros compuestos que contienen carbono, tales como metano, producidos durante un procedimiento de gasificación, también se pueden liberar a la atmósfera si no se consumen en una reacción de fermentación integrada.

Es un objeto de la presente invención dar a conocer uno o varios sistemas y/o procedimientos que superan las desventajas conocidas en la técnica y dar a conocer al público nuevos procedimientos para la producción óptima de una serie de productos útiles.

Compendio de la invención

En un primer aspecto, la invención da a conocer un procedimiento para incrementar la captura del carbono en un procedimiento de fermentación, en donde el procedimiento incluye la gasificación de una materia prima para producir un sustrato de gas de síntesis en un gasificador y poner en contacto al menos una porción del sustrato de gas de síntesis con uno o varios microorganismos en un biorreactor para producir uno o varios productos, en donde los productos son uno o varios ácidos y/o alcoholes, en donde una corriente saliente sale del biorreactor y en donde al menos una porción de la corriente saliente se envía al gasificador.

En realizaciones concretas, la corriente saliente comprende uno o varios componentes de la corriente de gas de síntesis que no se han convertido en productos y/o subproductos mediante fermentación. En otra realización, la corriente saliente comprende subproductos gaseosos producidos durante la fermentación del sustrato.

En realizaciones concretas, los componentes de la corriente de gas de síntesis que no se han convertido en productos y/o subproductos de la fermentación incluyen CO, CO₂, CH₄ y/o H₂. En algunas realizaciones, al menos una porción del CO₂ producido como un subproducto de la fermentación se devuelve al gasificador.

En algunas realizaciones de la invención, el procedimiento incluye separar y/o enriquecer al menos una porción de los componentes seleccionados de la corriente saliente y devolver los componentes separados y/o enriquecidos al gasificador. En realizaciones concretas, el CO₂ y/o el CH₄ se separan y/o enriquecen, y regresan al gasificador.

En otra realización, los componentes separados y/o enriquecidos se devuelven al biorreactor. En realizaciones concretas, el CO y/o el H₂ se separan y/o enriquecen, y se devuelven al biorreactor.

Aún en otra realización, el procedimiento incluye separar al menos una porción de uno o varios productos de fermentación a partir de la corriente saliente antes de que al menos una porción de la corriente saliente pase al gasificador. En realizaciones concretas, el producto es alcohol. En realizaciones concretas, el etanol se retira de la corriente saliente antes de que al menos una porción de la corriente saliente se devuelva al gasificador.

- 5 También se describe un procedimiento para mejorar la eficacia global y/o la captura de carbono de un proceso de fermentación, en donde el procedimiento incluye:

conversión de una materia prima en gas de síntesis en un gasificador;

enviar al menos una porción del gas de síntesis a un biorreactor;

fermentar al menos una porción del gas de síntesis en el biorreactor para producir productos;

- 10 en donde el procedimiento incluye separar al menos una porción de uno o varios componentes del gas de síntesis antes de enviar el gas de síntesis al biorreactor, y desviar uno o varios componentes al gasificador.

En realizaciones concretas, uno o varios componentes separados de la corriente de gas de síntesis se seleccionan de H₂S, CO₂, alquitranes y/o BTEX.

- 15 En un tercer aspecto, la invención da a conocer un procedimiento para producir productos mediante la fermentación de un sustrato de gas de síntesis por uno o varios microorganismos, en donde el gas de síntesis procede de la gasificación de una materia prima y se produce en un gasificador, en donde el procedimiento incluye dirigir al interior del gasificador al menos una porción de un subproducto de dióxido de carbono producido en la fermentación, en donde los productos son uno o varios ácidos y/o alcoholes.

- 20 En realizaciones concretas de los diferentes aspectos anteriores, la fermentación anaerobia produce productos que son uno o varios ácidos y/o alcoholes a partir de CO y, facultativamente, de H₂. En realizaciones concretas, la fermentación anaerobia se lleva a cabo en un biorreactor, en donde uno o varios cultivos microbianos convierten el CO y, facultativamente, el H₂ en productos que son uno o varios ácidos y/o alcoholes. En algunas realizaciones, el producto es etanol.

- 25 En realizaciones concretas, el cultivo microbiano es un cultivo de bacterias carboxidótrofas. En algunas realizaciones, las bacterias se seleccionan de *Clostridium*, *Moorella* y *Carboxydotherrmus*. En realizaciones concretas, la bacteria es *Clostridium autoethanogenum*.

- 30 Según diferentes realizaciones de la invención, la fuente de carbono para la reacción de fermentación es gas de síntesis procedente de la gasificación. El sustrato de gas de síntesis típicamente contendrá una mayor proporción de CO, tal como de al menos aproximadamente el 20% a aproximadamente el 95% de CO en volumen, del 40% al 95% de CO en volumen, del 40% al 60% de CO en volumen, y del 45% al 55% de CO en volumen. En realizaciones concretas, el sustrato comprende aproximadamente el 25% o aproximadamente el 30% o aproximadamente el 35% o aproximadamente el 40% o aproximadamente el 45% o aproximadamente el 50% de CO, o aproximadamente el 55% de CO, o aproximadamente el 60% de CO, en volumen. Los sustratos que tienen una concentración menor de CO, tal como el 6%, también pueden ser adecuados, en particular cuando están presentes cantidades significativas
- 35 de H₂ y facultativamente de CO₂.

De acuerdo con un cuarto aspecto, la invención da a conocer un sistema para incrementar la eficacia de un procedimiento para producir productos que son uno o varios alcoholes y facultativamente ácidos mediante la fermentación microbiana de sustratos de gas de síntesis, en donde el sistema comprende:

a. un gasificador configurado para producir un sustrato de gas de síntesis que comprende CO y H₂;

- 40 b. un biorreactor configurado para convertir al menos una porción de CO y, facultativamente, de H₂ del sustrato de gas de síntesis en productos;

c. medios para enviarlos de vuelta al gasificador al menos una porción de uno o varios componentes del sustrato de gas de síntesis que no se han convertido en uno o varios productos y/o al menos una porción de al menos un subproducto de la fermentación de una corriente saliente que sale del biorreactor.

- 45 En realizaciones concretas, el sistema incluye medios para separar y/o enriquecer determinados componentes de la corriente saliente y enviarlos de vuelta al gasificador. En realizaciones concretas, el sistema incluye medios para separar y/o enriquecer al menos una porción de CO₂ y/o CH₄ de la corriente saliente y enviar de vuelta al gasificador el CO₂ y/o el CH₄ separado y/o enriquecido.

- 50 En realizaciones concretas, el sistema incluye además medios para separar y/o enriquecer al menos una porción de CO y/o H₂ de la corriente saliente y enviar de vuelta al biorreactor el CO y/o el H₂ separado y/o enriquecido.

En otra realización, el sistema además incluye medios para separar y/o enriquecer uno o varios productos de la corriente saliente.

También se describe un sistema para incrementar la eficacia de los procedimientos para producir productos mediante la fermentación microbiana de los sustratos de gas de síntesis, en donde el sistema comprende:

- 1) un gasificador configurado para producir una corriente de gas de síntesis que comprende CO y H₂;
- 5 2) medios para separar al menos una porción de determinados componentes de la corriente de gas de síntesis y enviar de vuelta al gasificador los componentes separados;
- 3) medios para enviar a un biorreactor un residuo de la corriente de gas de síntesis que comprende CO y H₂
- 4) un biorreactor configurado para convertir en productos al menos una porción de CO y, facultativamente, de H₂ a partir del residuo de la corriente de gas de síntesis.

En realizaciones concretas, el sistema incluye medios para separar y/o enriquecer al menos una porción de H₂S, CO₂, alquitranes y/o BTEX a partir de la corriente del sustrato del gas de síntesis antes de enviarlos al biorreactor.

En realizaciones concretas del cuarto aspecto, el sistema comprende medios para determinar si la corriente del sustrato de gas de síntesis que comprende CO y H₂ tiene una composición deseada. Se puede utilizar cualquier medio conocido para este propósito. Además, o como alternativa, se dan a conocer medios de determinación para determinar la composición de la corriente saliente y/o de la corriente separada antes de devolverla al gasificador. Si se determina que la corriente o corrientes tienen una composición indeseable para una etapa concreta, la corriente se puede desviar hacia otro sitio.

En realizaciones concretas de la invención, el sistema incluye medios para calentar y/o enfriar las diferentes corrientes pasadas entre las diferentes etapas del sistema. Además, o como alternativa, el sistema incluye medios para comprimir al menos porciones de las diferentes corrientes que se pasan por las diferentes etapas del sistema.

20 De acuerdo con realizaciones concretas de cada uno de los diferentes aspectos de la invención, el procedimiento utilizado para la separación y/o enriquecimiento del gas comprende uno o varios de los procedimientos de fraccionamiento criogénico, adsorción molecular, adsorción por oscilaciones de presión o absorción.

Aunque la invención es en su mayor parte como se define más arriba, no se limita a ello y también incluye realizaciones de las cuales la siguiente descripción da a conocer ejemplos.

25 Breve descripción de los dibujos

La invención se describirá ahora en detalle con referencia a las figuras acompañantes, en las cuales:

La figura 1 es una representación esquemática de un sistema que incluye medios para devolver a un gasificador una corriente saliente de un fermentador.

30 La figura 2 muestra la producción de metabolitos y el crecimiento microbiano a lo largo del tiempo en la fermentación del ejemplo 1.

La figura 3 muestra el consumo de gas y la producción a lo largo del tiempo para la fermentación del ejemplo 1.

Descripción detallada de la invención

El gas de síntesis, producido de la gasificación de los materiales carbonosos, tales como carbón, petróleo, biocombustible o biomasa, se puede fermentar de forma anaerobia para producir productos, tales como ácidos y alcoholes. Los sustratos procedentes del gas de síntesis idóneos para ser utilizados en los procedimientos de fermentación también contienen típicamente CO₂ y otros compuestos que contienen carbono, tales como metano. Además, en muchas reacciones de fermentación, por ejemplo, donde el CO se convierte en productos que incluyen ácidos y/o alcoholes, se pueden producir volúmenes significativos de CO₂. La presente invención se refiere a los procedimientos, sistemas y procesos que mejoran la captura global de carbono en tales procesos de fermentación que utilizan el gas de síntesis procedente de la gasificación.

Según los procedimientos de la invención, se mejora la eficacia y/o la captura de carbono globales de un proceso de fermentación de un sustrato de gas de síntesis procedente de la gasificación. Según un aspecto concreto de amplias miras, se da a conocer un procedimiento para mejorar la eficacia y/o la captura de carbono globales de un proceso de fermentación, en donde el procedimiento incluye:

45 conversión de una materia prima en gas de síntesis en un gasificador;

enviar el gas de síntesis a un biorreactor;

fermentar al menos una porción del gas de síntesis en el biorreactor para producir productos, en donde los productos son uno o varios ácidos y/o alcoholes;

en donde al menos un componente del gas de síntesis que no se ha convertido en productos y/o subproductos del

proceso de fermentación sale del biorreactor en una corriente saliente, en donde al menos una porción de la corriente saliente se devuelve al gasificador.

En realizaciones concretas, los componentes del gas de síntesis que contienen carbono producidos por gasificación, tales como CO, CO₂ y/o CH₄, se envían a un biorreactor, en donde al menos una porción del CO es convertido en productos, tales como alcoholes y/o ácidos, por la acción de una o varias bacterias carboxidótrofas. Los componentes que no se han convertido en productos salen típicamente del biorreactor en una corriente saliente. Sin embargo, según la invención, los componentes que contienen carbono en la corriente saliente, tal como CO, CO₂ y/o CH₄ sin convertir, se pueden redirigir de vuelta al gasificador y al menos reciclarlos parcialmente en compuestos que incluyen CO, CO₂ y CH₄. También se pueden devolver al gasificador, y con ello reciclarlos, otros componentes que no contienen carbono, tales como H₂ y/o H₂O, que salen del biorreactor con la corriente saliente.

Sin desear comprometerse con la teoría, se considera que, en un gasificador, el material carbonoso se somete a varios procesos diferentes. Esencialmente, se introduce en el gasificador una pequeña cantidad de oxígeno o aire para permitir que parte del material orgánico se queme para producir monóxido de carbono y energía. Esto, a su vez, impulsa una segunda reacción que convierte más material orgánico en hidrógeno y monóxido de carbono adicional. Los gasificadores que funcionan en condiciones de equilibrio estacionario producen corrientes gaseosas que contienen componentes que incluyen CO, CO₂, H₂ y, facultativamente, CH₄, en proporciones en su mayor parte constantes. Así pues, devolver al gasificador los componentes que contienen carbono, tales como CO, CO₂ y/o CH₄ sin convertir, reducirá la cantidad de combustible necesario para ser gasificado y producir la misma corriente en gran medida constante. A su vez, el CO, CO₂ y/o CH₄ de la corriente gasificada se pueden enviar al biorreactor, en donde más CO, y facultativamente CO₂, se convertirán en productos, lo que mejora la captura global de carbono del proceso.

Además, los componentes que contienen hidrógeno, tales como el H₂ que queda después de la fermentación, el agua y/o los productos extraídos del biorreactor por la corriente de gases también se pueden reciclar devolviéndolos al gasificador, lo que mejora la captura de H₂ global del proceso. Además, o como alternativa, incrementar la eficacia de la provisión de hidrógeno al biorreactor también mejorará la captura global del carbono, ya que el H₂ reduce la cantidad de CO₂ producido en la reacción de fermentación.

En realizaciones concretas, se separan de la corriente saliente los componentes deseados, tales como los productos extraídos del biorreactor. El producto o productos separados se pueden combinar con el producto o productos separados del caldo de fermentación por medios convencionales.

En otra realización de la invención, el gas saliente que sale de la reacción de fermentación puede facultativamente someterse a una separación para retirar los componentes deseados, tales como CO y/o H₂, y devolverlos directamente al biorreactor. Además, o como alternativa, la separación del gas se puede utilizar para enriquecer un determinado componente de la corriente saliente, tal como el CO₂ y/o el CH₄, de tal manera que la corriente enriquecida en CO₂ y/o en CH₄ se pueda enviar al gasificador. En realizaciones concretas, un primer componente de la corriente saliente, tal como el CO₂ o el CH₄, se puede separar de uno o varios segundos componentes. En realizaciones concretas, el primer componente se devuelve al gasificador, mientras que uno o varios segundos componentes se pueden dirigir al biorreactor y/o puerto de desagüe. Otros componentes menos deseables, por ejemplo, compuestos inertes tales como el N₂, también se pueden separar mediante los medios conocidos en la técnica y desviarlos a una corriente de desagüe para su eliminación.

Se conoce en la técnica cómo mejorar la eficacia de la fermentación observada por el incremento de la productividad del etanol, en donde el CO₂ se proporciona a un gasificador. Las cantidades óptimas de CO₂ proporcionadas al gasificador se detallan en la solicitud de patente internacional WO 2009/154788.

Definiciones

A menos que se defina de otra manera, la siguiente terminología, tal y como se utiliza a lo largo de esta especificación, se define como sigue:

La terminología «captura del carbono» y «captura global de carbono» se refieren a la eficacia de la conversión de una fuente de carbono, tal como una materia prima, en productos. Por ejemplo, la cantidad de carbono en una materia prima de biomasa de madera que se convierte en productos útiles, tales como alcohol.

La terminología «materia prima» se refiere a un material carbonoso, tal como basura urbana sólida, material forestal, restos de madera, material de construcción, material vegetal, carbón, petróleo, materiales de desecho de pasta y de papel, por ejemplo, licor negro, coproductos petroquímicos, biogás, neumáticos y combinaciones de los mismos.

La terminología «gas de síntesis» o «sintegás» se refiere a una mezcla de gases que contiene al menos una porción de monóxido de carbono e hidrógeno producidos por la gasificación y/o reformado de una materia prima carbonosa.

La terminología «sustrato que comprende monóxido de carbono» y terminología similar se debe saber que incluye cualquier sustrato en el que el monóxido de carbono se pone a disposición de una o varias cepas de bacterias para el crecimiento y/o la fermentación, por ejemplo.

Los «sustratos gaseosos que comprenden monóxido de carbono» incluyen cualquier gas que contiene monóxido de carbono. El sustrato gaseoso contendrá típicamente una proporción significativa de CO, preferiblemente al menos aproximadamente del 5% a aproximadamente el 95% de CO en volumen.

5 El término «biorreactor» incluye un fermentador que consiste de uno o varios recipientes y/o disposiciones en torres o tuberías, que incluye el tanque reactor con agitación continua (CSTR, por su nombre en inglés), un reactor de células inmovilizadas, un reactor con recuperación por inyección de gas, un reactor con columna de burbujas (BCR, por su nombre en inglés), un reactor con membrana, tal como el biorreactor con membrana de fibras huecas (HFMBR, por su nombre en inglés), un reactor en lecho de goteo (TBR, por su nombre en inglés), biorreactor monolítico, biorreactores de bucles forzados o bombeados, o combinaciones de los mismos, u otro recipiente u otro dispositivo idóneo para el contacto del gas con el líquido.

15 El término «ácido» tal y como se utiliza en la presente memoria incluye tanto ácidos carboxílicos como el anión del carboxilato asociado, tal como la mezcla de ácido acético libre y acetato presente en un caldo de fermentación, tal y como se describe en la presente memoria. La proporción de ácido molecular por carboxilato en el caldo de fermentación depende del pH del sistema. Además, el término «acetato» incluye tanto sal de acetato sola como una mezcla de ácido acético molecular o libre y la sal de acetato, tal como una mezcla de la sal de acetato y el ácido acético libre presente en un caldo de fermentación, tal y como se describe en la presente memoria.

20 La terminología «composición deseada» se utiliza para hacer referencia a la cantidad deseada de una sustancia y a los tipos de componentes de dicha sustancia, tal como, por ejemplo, de una corriente de gas. Más en concreto, se considera que un gas tiene una «composición deseada» si contiene un componente concreto (p. ej., CO y/o H₂) y/o contiene un componente concreto en una cantidad concreta y/o no contiene un componente concreto (p. ej., un contaminante perjudicial para los microorganismos) y/o no contiene un componente concreto en una cantidad concreta. Se puede considerar más de un componente cuando se determina si una corriente de gases tiene una composición deseada.

25 El término «corriente» se utiliza para hacer referencia a un flujo de material hacia el interior, a través, y hacia el exterior, desde una o varias etapas de un proceso, por ejemplo, el material con que se alimenta un biorreactor y/o un eliminador optativo de CO₂. La composición de la corriente puede variar a medida que pasa a través de etapas concretas. Por ejemplo, a medida que la corriente pasa a través del biorreactor, puede disminuir el contenido de CO de la corriente, mientras que puede incrementarse el contenido de CO₂. De igual forma, a medida que la corriente pasa a través de la etapa del eliminador de CO₂, el contenido de CO₂ disminuirá.

30 A menos que el contexto lo requiera de otra manera, las frases «fermentar», «proceso de fermentación» o «reacción de fermentación» y similares, tal y como se usan en la presente memoria, pretenden englobar tanto la fase de crecimiento como la fase de biosíntesis del producto del proceso.

35 La terminología «incrementar la eficacia», «incremento de la eficacia», «eficacia incrementada» y similares, cuando se utilizan en relación con el proceso de fermentación, incluye, pero sin limitarse a ellos, incrementar uno o varios de: la tasa de crecimiento de los microorganismos en la fermentación, el volumen o masa del producto deseado (tales como los alcoholes) producidos por volumen o masa del sustrato (tal como el monóxido de carbono) consumido, la tasa de producción o el nivel de producción del producto deseado, y la proporción relativa del producto deseado producido en comparación con otros subproductos de la fermentación, y además puede reflejar el valor (que puede ser positivo o negativo) de cualquier subproducto generado durante el proceso.

40 Mientras que algunas realizaciones de la invención, a saber, las que incluyen la producción de etanol mediante la fermentación anaerobia con CO y, facultativamente, H₂ a modo de sustrato principal, se reconocen fácilmente por ser mejoras valiosas de la tecnología de gran interés hoy en día, se debe apreciar que la invención es aplicable a la producción de productos alternativos, tales como otros alcoholes, y al uso de sustratos alternativos, en particular sustratos gaseosos, como sabrán los expertos en la técnica a los cuales se dirige la invención tras tener en cuenta la presente descripción. Por ejemplo, los sustratos gaseosos que contienen dióxido de carbono e hidrógeno se pueden utilizar en realizaciones concretas de la invención. Además, la invención puede ser aplicable a las fermentaciones para producir acetato, butirato, propionato, caproato, etanol, propanol y butanol, e hidrógeno. A modo de ejemplo, estos productos se pueden producir mediante fermentación con microorganismos del género *Moorello*, *Clostridia*, *Ruminococcus*, *Acetobacterium*, *Eubacterium*, *Butyribacterium*, *Oxobacter*, *Methanosarcina*, *Methanosarcina* y *Desulfotomaculum*.

Proceso de gasificación

55 La invención se puede aplicar en concreto para sostener la producción de productos del gas de síntesis procedente de la gasificación. En algunas realizaciones de la invención, una materia prima se convierte en gas de síntesis mediante la gasificación, y el gas de síntesis se envía a una reacción de fermentación en donde al menos una porción de CO y/o H₂ se convierte en los productos, que son uno o varios ácidos y/o alcoholes.

La gasificación es un proceso termoquímico en el que las materias primas carbonosas (ricas en carbono), tales como carbón, coque de petróleo o biomasa, se convierten en un gas que comprende hidrógeno y monóxido de carbono (y cantidades menores de dióxido de carbono y otros gases en cantidad insignificante) con poco oxígeno,

típicamente en condiciones de presión elevada, calor elevado y/o de vapor. Lo típico es que el gas resultante comprenda principalmente CO y H₂, con un volumen mínimo de CO₂, metano, etileno y etano. La gasificación se basa en procesos químicos a temperaturas elevadas (típicamente <700 °C), en donde cualquier material que contiene carbono se convierte en gas de síntesis. Las materias primas que contienen carbono incluyen carbón, petróleo, coque de petróleo, gas natural, biomasa y desechos orgánicos, tales como la basura urbana sólida, sedimentos de aguas residuales o subproductos de procesos industriales, tales como la industria de la pasta de papel.

En el proceso de gasificación, el material carbonoso se somete a varios procesos diferentes, que incluyen:

1. El proceso de la pirólisis (o desvolatilización) se produce cuando las partículas carbonosas se calientan hasta que los volátiles se liberan y se produce el calcinado. El proceso depende de las propiedades del material carbonoso y determina la estructura y la composición del calcinado, que a continuación se someterá a las reacciones de gasificación.
2. El proceso de la combustión se produce cuando los productos volátiles y parte del calcinado reaccionan con el oxígeno para formar dióxido de carbono y monóxido de carbono, lo que proporciona calor para las posteriores reacciones de gasificación.
3. La producción adicional de productos gaseosos tiene lugar cuando el calcinado reacciona con el dióxido de carbono y el vapor para producir monóxido de carbono e hidrógeno.
4. Además, la reacción reversible de cambio de fase de gas y agua alcanza el equilibrio con mucha rapidez a las temperaturas de un gasificador. Esto equilibra las concentraciones de monóxido de carbono, vapor, dióxido de carbono e hidrógeno de la corriente de gas de síntesis resultante que sale del gasificador.

Los expertos en la técnica serán conscientes de que existen muchos aparatos y/o sistemas de gasificación idóneos para la producción del gas de síntesis. Un resumen de diferentes procesos de gasificación idóneos para la producción del gas de síntesis se dan a conocer en *Synthetic Fuels Handbook: Properties, Processes and Performance* (J. Speight, McGraw-Hill Professional, 2008). El aparato de gasificación de ejemplo incluye un lecho fijo a contracorriente, un lecho fijo a inyección, flujo arrastrado, lecho fluido, arco con plasma, gasificadores de una única etapa, gasificadores de varias etapas, o combinaciones de los mismos.

Existen muchas variaciones de diseño de gasificadores y se conocen bien en la técnica, aunque lo típico es que pertenezcan a tres categorías:

Lecho móvil: el combustible de carbono seco se alimenta por la parte superior del gasificador. A medida que cae lentamente por el recipiente, reacciona con el vapor y/u oxígeno a medida que fluyen en sentidos opuestos sobre el lecho. El combustible prosigue el proceso hasta que se gasta completamente y deja detrás un gas de síntesis de temperatura baja y cenizas fundidas. Los contaminantes en cantidades insignificantes se depuran más tarde del gas de síntesis.

Flujo arrastrado: el combustible se puede alimentar seco o húmedo (mezclado con agua) al interior del gasificador. Los reactantes (vapor y/u oxígeno) fluyen en la misma dirección hacia arriba o hacia abajo por el gasificador, a medida que tienen lugar las etapas de gasificación, hasta que el gas de síntesis completado a altas temperaturas sale por la parte superior del reactor. La escoria fundida cae al fondo.

Lecho fluido: el flujo de vapor y/u oxígeno se dirige hacia arriba por la torre del reactor, mientras que el combustible se inyecta en esta corriente, y permanece suspendido en ella, mientras que tiene lugar la gasificación. El gas de síntesis a temperatura moderada sale mientras que la ceniza seca (sin fundir) se evacua por la parte inferior.

Otros ejemplos de los procesos de gasificación para producir gas de síntesis se detallan en las solicitudes de patente internacional n.ºs WO 2008/006049 y WO 2009/009388.

Acondicionamiento del gas de síntesis

Realizaciones concretas de la invención incluyen hacer pasar el gas de síntesis producido en un proceso de gasificación a un biorreactor, en donde se pone en contacto con uno o varios microorganismos y se convierte en los productos. La corriente de gas de síntesis producida en el proceso de gasificación contiene típicamente cantidades pequeñas de subproductos, tales como H₂S, COS, NO_x, BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos), alquitranes y materia particulada. Tales componentes se pueden retirar con una metodología de acondicionamiento estándar en varias operaciones unitarias. Los expertos en la técnica estarán familiarizados con las operaciones unitarias para la eliminación de los componentes indeseables. A modo de ejemplo, los componentes de BTEX se pueden retirar de la corriente de gas de síntesis al hacer pasar la corriente a través de al menos un lecho de carbono activado. Además, se puede utilizar la depuración de Venturi de gran eficacia para retirar la materia particulada y los alquitranes de una corriente de gas de síntesis (*Benchmarking Biomass Gasification Technologies for Fuels, Chemicals Hydrogen Production*; informe preparado para el Ministerio Estadounidense de Energía y el Laboratorio Estadounidense de Tecnología Energética por Ciferno y Marano, 2002). Otros ejemplos de los procedimientos de acondicionamiento del

gas se detallan en la solicitud de patente internacional WO 2009/009388.

Se considera que un gas de síntesis enviado a un biorreactor de fermentación, según los procedimientos de la invención, requerirá un acondicionamiento mínimo, ya que la mayoría de los componentes no se considera que tengan un efecto perjudicial sobre el cultivo de los microorganismos. En realizaciones concretas de la invención, la materia particulada y, facultativamente, los alquitranes se retiran de la corriente de gas de síntesis mediante la depuración de Venturi de alta eficacia. El oxígeno residual se retira facultativamente con un lecho catalizador de cobre caliente, antes de enviar el gas de síntesis al fermentador. Además, o como alternativa, el oxígeno se puede reducir a agua en presencia de hidrógeno con el uso de otros catalizadores metálicos, tales como paladio u óxidos de platino.

10 Reacción de fermentación

Realizaciones concretas de la invención incluyen la fermentación de una corriente de sustrato de gas de síntesis para producir productos que son uno o varios alcoholes y/o ácidos. Se conocen los procesos para la producción del etanol y otros alcoholes a partir de los sustratos gaseosos. Los procesos de ejemplo incluyen los descritos, por ejemplo, en las solicitudes de patente internacional n.ºs WO 2007/117157 y WO 2008/115080, y en las patentes de los EE. UU. n.ºs US 6.340.581, US 6.136.577, US 5.593.886, US 5.807.722 y US 5.821.111.

Se sabe que muchas bacterias anaerobias son capaces de realizar la fermentación del CO a alcoholes, entre ellos el n-butanol y el etanol, y ácido acético, y son idóneas para ser usadas en el procedimiento de la presente invención. Ejemplos de tales bacterias que son idóneas para el uso en la invención incluyen las del género *Clostridium*, tales como las cepas de *Clostridium ljungdahlii* que incluyen las descritas en la solicitud de patente internacional WO 00/68407, la patente europea EP 117309, las patentes de los EE. UU. n.ºs 5.173.429, 5.593.886 y 6.368.819, y las solicitudes de patente internacional n.ºs WO 98/00558 y WO 02/08438, *Clostridium carboxydivorans* (Liou et al., *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 33; págs. 2085-2091) y *Clostridium autoethanogenum* (Abrini et al., *Archives of Microbiology* 161; págs. 345-351). Otras bacterias adecuadas incluyen las del género *Moorella*, entre ellas *Moorella* sp HUC22-1 (Sakai et al., *Biotechnology Letters* 29: págs. 1607-1612) y las del género *Carboxydotherrmus* (Svetlichny, V. A., Sokolova, T. G. et al. (1991), *Systematic and Applied Microbiology* 14: 254-260). Otros ejemplos incluyen *Moorella thermoacetica*, *Moorella thermoautotrophica*, *Ruminococcus products*, *Acetobacterium woodli*, *Eubacterium limosum*, *Butyribacterium methylotrophicum*, *Oxobacter pfennigii*, *Methanosarcina barkeri*, *Methanosarcina acetivorans*, *Desulfotomaculum kuznetsovii* (Simpf et al. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2006, vol. 26, págs 41-65). Además, se debe entender que a la presente invención se le pueden aplicar otras bacterias anaerobias acetógenas, como conocerá un experto en la técnica. También se apreciará que la invención se puede aplicar a un cultivo mixto de dos o varias bacterias.

Un microorganismo de ejemplo idóneo para ser usado en la presente invención es *Clostridium autoethanogenum*. En una realización, el *Clostridium autoethanogenum* es un *Clostridium autoethanogenum* que tiene las características identificativas de la cepa depositada en el Centro Alemán de Recursos para Material Biológico (DSMZ, por su nombre en alemán) con el número de depósito identificativo 19630. En otra realización, el *Clostridium autoethanogenum* es un *Clostridium autoethanogenum* que tiene las características identificativas con el número de depósito del DSMZ 10061. Ejemplos de fermentación de un sustrato que comprende CO para producir productos que incluyen alcoholes mediante *Clostridium autoethanogenum* se dan a conocer en las solicitudes de patente internacional WO 2007/11757, WO 2008/115080, WO 2009/022925, WO 2009/058028, WO 2009/064200, WO 2009/064201, WO 2009/113878 y WO 2009/151342.

El cultivo de las bacterias utilizadas en los procedimientos de la invención se puede realizar con cualquier número de procedimientos conocidos en la técnica para cultivar y fermentar los sustratos con bacterias anaerobias. Las técnicas de ejemplo se dan a conocer en el apartado de «Ejemplos» que viene a continuación. A modo de otro ejemplo, se podrían utilizar los procesos que se describen de manera general en los siguientes artículos que utilizan sustratos gaseosos para la fermentación: (i) K. T. Klasson et al. (1991). «Bioreactors for synthesis gas fermentations resources». *Conservation and Recycling*, 5; 145-165; (ii) K. T. Klasson et al. (1991) «Bioreactor design for synthesis gas fermentations». *Fuel*. 70. 605-614; (iii) K. T. Klasson et al. (1992). «Bioconversion of synthesis gas into liquid or gaseous fuels». *Enzyme and Microbial Technology*. 14; 602-608; (iv) J. L. Vega et al. (1989) «Study of Gaseous Substrate Fermentation: Carbon Monoxide Conversion to Acetate. 2. Continuous Culture». *Biotech. Bioeng.* 34. 6. 785-793; (v) J. L. Vega et al. (1989). «Study of gaseous substrate fermentations: Carbon monoxide conversion to acetate. 1. Batch culture». *Biotechnology and Bioengineering*. 34. 6. 774-784; (vii) J. L. Vega et al. (1990). «Design of Bioreactors for Coal Synthesis Gas Fermentations». *Resources, Conservation and Recycling*. 3. 149-160.

La fermentación se puede realizar en cualquier biorreactor idóneo configurado para el contacto entre gas y líquido, en donde el sustrato se puede poner en contacto con uno o varios microorganismos, tal como un tanque reactor con agitación continua (CSTR), un reactor de células inmovilizadas, un reactor con recuperación por inyección de gas, un reactor con columna de burbujas (BCR), un reactor con membrana, tal como un biorreactor con membrana de fibras huecas (HFMBR) o un reactor en lecho de goteo (TBR), biorreactor monolítico o reactores con bucles. De igual forma, en algunas realizaciones de la invención, el biorreactor puede comprender un primer reactor de crecimiento en el cual se cultivan los microorganismos, y un segundo reactor de fermentación que se alimenta con el caldo de fermentación del reactor de crecimiento y en el cual se produce la mayoría del producto de fermentación (p.

ej., etanol y acetato).

De acuerdo con diferentes realizaciones de la invención, la fuente de carbono para la reacción de fermentación es el gas de síntesis procedente de la gasificación. El sustrato de gas de síntesis contendrá típicamente una proporción importante de CO, tal como al menos aproximadamente el 15% a aproximadamente el 75% de CO en volumen, del 20% al 65% de CO en volumen, del 20% al 60% de CO en volumen y del 20% al 55% de CO en volumen. En realizaciones concretas, el sustrato comprende aproximadamente el 25% o aproximadamente el 30% o aproximadamente el 35% o aproximadamente el 40% o aproximadamente el 45% o aproximadamente el 50% de CO, o aproximadamente el 55% de CO, o aproximadamente el 60% de CO, en volumen. Los sustratos que tienen concentraciones menores de CO, tal como el 6%, también pueden ser adecuados, en particular cuando el H₂ y el CO₂ están también presentes. En realizaciones concretas, la presencia del hidrógeno da lugar a una mejora de la eficacia global de la producción de alcohol. El sustrato gaseoso también puede contener algo de CO₂, por ejemplo, tal como aproximadamente del 1% a aproximadamente el 80% de CO₂ en volumen, o del 1% a aproximadamente el 30% de CO₂ en volumen.

De acuerdo con realizaciones concretas de la invención, el contenido de CO y/o el contenido de H₂ de la corriente de sustrato se puede enriquecer antes de enviar la corriente al biorreactor. Por ejemplo, el hidrógeno se puede enriquecer con tecnologías bien conocidas en la técnica, tales como la adsorción por oscilación de la presión, la separación criogena y la separación con membrana. De igual forma, el CO también se puede enriquecer con tecnologías bien conocidas en la técnica, tales como la depuración con cobre-amonio, separación criogena, tecnología COSORBTM (absorción en dicloruro de aluminio cuproso en tolueno), adsorción por oscilación del vacío y separación con membrana. Otros procedimientos utilizados en la separación de los gases y su enriquecimiento se detallan en el documento PCT/NZ2008/000275.

Además, o como alternativa, uno o varios componentes concretos de la corriente que sale del biorreactor también se pueden separar y/o enriquecer con tales tecnologías. Al menos una porción del componente o componentes enriquecidos, tal como CH₄ y/o CO₂, se puede desviar de vuelta al gasificador para mejorar la eficacia global del proceso completo. Además, o como alternativa, el componente o componentes enriquecidos, tales como CO y/o CO y/o H₂, se pueden desviar de vuelta al gasificador para mejorar la eficacia de la etapa de fermentación.

Típicamente, se añadirá monóxido de carbono a la reacción de fermentación en un estado gaseoso. Sin embargo, los procedimientos de la invención no se limitan a la adición del sustrato en este estado. Por ejemplo, el monóxido de carbono se puede aportar en un líquido. Por ejemplo, un líquido puede estar saturado con un gas que contiene monóxido de carbono y ese líquido se añade al biorreactor. Esto se puede conseguir con la metodología estándar. A modo de ejemplo, se puede utilizar para este fin un generador de dispersión de microburbujas (Hensirisak et al. «Scale-up of microbubble dispersion generator for aerobic fermentation»; *Applied Biochemistry and Biotechnology*, volumen 101, número 3, octubre de 2002).

Se apreciará que para que se produzca el crecimiento de las bacterias y la fermentación de CO a alcohol, además del gas de sustrato que contiene CO, habrá que alimentar el biorreactor con un medio líquido de nutrientes idóneo. Un medio de nutrientes contendrá vitaminas y minerales suficientes para permitir el crecimiento del microorganismo utilizado. Se conocen en la técnica los medios anaerobios idóneos para la fermentación del etanol con CO como única fuente de carbono. Por ejemplo, los medios idóneos se describen en las patentes de los EE. UU. n.ºs 5.173.429 y 5.593.886 y las solicitudes de patente internacional n.ºs WO 02/08438, WO 2007/117157, WO 2008/115080, WO 2009/022925, WO 2009/058028, WO 2009/064200, WO 2009/064201, WO 2009/113878 y WO 2009/151342 citadas más arriba. La presente invención da a conocer un nuevo medio más eficaz a la hora de sostener el crecimiento de los microorganismos y/o la producción del alcohol en el proceso de fermentación. Este medio se describirá con más detalle más adelante en la presente invención.

La fermentación se debe realizar deseablemente en las condiciones adecuadas para que tenga lugar la fermentación deseada (p. ej., CO a etanol). Las condiciones de la reacción que se deben considerar incluyen presión, temperatura, velocidad de flujo del gas, velocidad de flujo del líquido, pH de los medios, potencial de oxidorreducción de los medios, velocidad de agitación (si se utiliza un tanque reactor con agitación continua), cantidad de inóculo, concentraciones máximas del sustrato de gas para asegurar que el CO de la fase líquida no se vuelva limitante, y las concentraciones máximas del producto para evitar la inhibición por producto. Las condiciones idóneas se describen en las solicitudes de patente internacional n.ºs WO 02/08438, WO 2007/117157, WO 2008/115080, WO 2009/022925, WO 2009/058028, WO 2009/064200, WO 2009/064201, WO 2009/113878 y WO 2009/151342.

Las condiciones óptimas de la reacción dependerán parcialmente del microorganismo concreto que se utilice. Sin embargo, en general, se prefiere que la fermentación se realice a una presión más alta que la presión ambiental. El funcionamiento a presiones elevadas incrementa significativamente la velocidad de transferencia del CO desde la fase gaseosa a la fase líquida, en donde puede ser tomado por el microorganismo como fuente de carbono para la producción del etanol. Esto a su vez significa que el tiempo de retención (definido como el volumen de líquido en el biorreactor dividido por la velocidad de flujo del gas de entrada) se puede reducir cuando los biorreactores se mantienen a una presión elevada en vez de a la presión atmosférica.

Los beneficios de realizar una fermentación de gas a etanol a presiones elevadas también se ha descrito en otra

parte. Por ejemplo, la solicitud de patente internacional WO 02/08438 describe fermentaciones de gas a etanol realizadas a presiones de 30 psig y 75 psig, lo que da una productividad de etanol de 150 g/l al día y de 369 g/l al día, respectivamente. Sin embargo, las fermentaciones de ejemplo realizadas a la presión atmosférica con medios similares y composiciones de gas de entrada similares se encontró que se producían entre 10 y 20 veces menos etanol por litro al día.

También es deseable que la velocidad de introducción del sustrato gaseoso que contiene el CO sea tal que asegure que la concentración del CO en la fase líquida no se vuelve limitante. Esto es así porque una consecuencia de las condiciones de CO limitante puede ser que el etanol producido sea consumido por el cultivo.

Recuperación del producto

10 Los productos de la reacción de fermentación se pueden recuperar con los procedimientos conocidos. Los procedimientos de ejemplo incluyen los descritos en las solicitudes de patente internacional n.^{os} WO 2007/117157, WO 2008/115080, WO 2009/022925 y las patentes de los EE. UU. n.^{os} US 6.340.581, US 6.136.577, US 5.593.886, US 5.807.722 y US 5.821.111. No obstante, brevemente y a modo de ejemplo, el etanol solo se puede recuperar del caldo de fermentación mediante procedimientos tales como la destilación o la evaporación fraccionadas, y la
15 fermentación extractiva.

La destilación del etanol a partir de un caldo de fermentación produce una mezcla azeotrópica de etanol y agua (a saber, etanol al 95% y agua al 5%). Posteriormente se puede obtener etanol anhidro mediante el uso de la tecnología de deshidratación de etanol con criba molecular, que también se conoce bien en la técnica.

Los procedimientos de fermentación extractiva implican el uso de un solvente hidrosoluble que presente poco riesgo de toxicidad para el organismo fermentador, para recuperar el etanol desde el caldo de fermentación diluido. Por ejemplo, el alcohol de oleílo es un solvente que se puede utilizar en este tipo de proceso de extracción. El alcohol de oleílo se introduce continuamente en un fermentador, después de lo cual este disolvente se eleva y forma una capa en la parte superior del fermentador que se extrae continuamente y con la que se alimenta una centrífuga. A continuación, el agua y las células se separan fácilmente del alcohol de oleílo y se devuelven al fermentador,
20 mientras que con el solvente cargado de etanol se alimenta el interior de una unidad de vaporización rápida. La mayoría del etanol se vaporiza y se condensa, mientras que el alcohol de oleílo no es volátil y se recupera para reutilizarlo en la fermentación.

El acetato, que se produce como subproducto en la reacción de fermentación, también se puede recuperar del caldo de fermentación con los procedimientos conocidos en la técnica.

30 Por ejemplo, se puede utilizar un sistema de adsorción que implica un filtro de carbón activado. En este caso, se prefiere que las células microbianas se retiren primero del caldo de fermentación con una unidad de separación adecuada. Se conocen en la técnica numerosos procedimientos basados en la filtración para generar un caldo de fermentación libre de células para la recuperación del producto. A continuación, el filtrado sin células que contiene etanol y acetato se hace pasar por una columna que contiene carbón activado para adsorber el acetato. El carbón
35 activado adsorbe con más facilidad el acetato en la forma ácida (ácido acético) que en la forma de sal (acetato). Por lo tanto, se prefiere que el pH del caldo de fermentación se haya bajado a menos de aproximadamente 3 antes de hacerlo pasar por la columna de carbón activado para convertir la mayoría del acetato en la forma de ácido acético.

El ácido acético adsorbido al carbón activado se puede recuperar mediante elución con los procedimientos conocidos en la técnica. Por ejemplo, se puede utilizar etanol para eluir el acetato unido. En algunas realizaciones, el etanol producido por el propio proceso de fermentación se puede utilizar para eluir el acetato. Ya que el punto de ebullición del etanol es de 78,8 °C y que el del ácido acético es de 107 °C, el etanol y el acetato se pueden separar fácilmente el uno del otro con un procedimiento basado en la volatilidad, tal como la destilación.

Otros procedimientos para recuperar el acetato desde un caldo de fermentación se conocen también en la técnica y se pueden utilizar en los procesos de la presente invención. Por ejemplo, las patentes de los EE. UU. n.^{os} 6.368.819 y 6.753.170 describen un solvente y un sistema de cosolvente que se puede utilizar para la extracción del ácido acético de los caldos de fermentación. Al igual que con el ejemplo del sistema basado en el alcohol de oleílo descrito para la fermentación extractiva del etanol, los sistemas descritos en las patentes de los EE. UU. n.^{os} 6.368.819 y 6.753.170 describen un solvente/cosolvente hidrófobo que se puede mezclar con el caldo de fermentación en presencia o ausencia de los microorganismos fermentadores para extraer el producto de ácido acético. El
45 solvente/cosolvente que contiene el producto de ácido acético se separa luego del caldo mediante destilación. A continuación, se puede utilizar una segunda etapa de destilación para purificar la forma del ácido acético desde el sistema de solvente/cosolvente.

Los productos de la reacción de fermentación (por ejemplo, etanol y acetato) se pueden recuperar del caldo de fermentación mediante la retirada continua de una porción del caldo del biorreactor de fermentación, la separación de las células microbianas del caldo (cómodamente por filtración), y la recuperación simultánea o secuencial de uno o varios productos del caldo. En el caso del etanol, se puede recuperar cómodamente por destilación, y el acetato se puede recuperar mediante adsorción al carbón activado, con los procedimientos descritos más arriba. Las células microbianas separadas se devuelven preferiblemente al biorreactor de fermentación. El filtrado libre de células que
55

queda después de haber retirado el etanol y el acetato también se devuelve preferiblemente al biorreactor de fermentación. Se pueden añadir otros nutrientes (tales como vitaminas B) al filtrado libre de células para reponer el medio de nutrientes antes de devolverlo al biorreactor. De igual forma, si el pH del caldo se ajusta como se describe más arriba para mejorar la adsorción del ácido acético al carbón activado, se debe reajustar el pH a un pH similar al del caldo del biorreactor de fermentación antes de devolverlo al biorreactor.

Reciclaje de los componentes de la corriente

De acuerdo con la invención, se da a conocer un procedimiento para incrementar la captura de carbono en un proceso de fermentación, en donde el procedimiento incluye la gasificación de una materia prima para producir un sustrato de gas de síntesis en un gasificador y poner en contacto al menos una porción del sustrato de gas de síntesis con uno o varios microorganismos en un biorreactor para producir uno o varios productos, en donde los productos son uno o varios ácidos y/o alcoholes, en donde una corriente saliente sale del biorreactor, y en donde al menos una porción de la corriente saliente se envía al gasificador.

En realizaciones concretas, un sustrato de gas de síntesis se produce en un gasificador y al menos una porción se envía a un biorreactor. El sustrato de gas de síntesis se pone en contacto con uno o varios microorganismos y se fermenta en uno o varios productos tal y como están definidos en la presente memoria, tales como alcoholes. Durante la fermentación, los subproductos de la fermentación, tales como el CO₂ y/o los componentes de la corriente de gas de síntesis sin metabolizar por uno o varios microorganismos, salen del biorreactor en una corriente saliente. De acuerdo con la invención, al menos una porción de la corriente saliente se envía al gasificador. Además, o como alternativa, la corriente saliente comprende un primer componente y uno o varios segundos componentes, en donde al menos una porción del primer componente se separa del uno o varios segundos componentes, y se envía al gasificador.

En realizaciones concretas, los componentes del gas de síntesis, tales como CO, H₂ y, facultativamente, CO₂, se convierten en productos, que son uno o varios ácidos y/o alcoholes. En algunas realizaciones, un cultivo microbiano convierte el CO y, facultativamente, el H₂ en productos, que incluyen etanol. Los productos se pueden recuperar típicamente del biorreactor en una corriente de producto. En realizaciones concretas de la invención, el cultivo microbiano está suspendido en un medio de nutrientes líquido. Por consiguiente, los productos producidos en la reacción de fermentación se pueden recuperar de una porción del medio de nutrientes líquido retirado del biorreactor en una corriente de producto.

En algunas realizaciones, la corriente del sustrato de gas de síntesis se proporcionará típicamente a una velocidad de flujo elevada y/o a una presión elevada al rociar la corriente en el interior del biorreactor. Como tales, pequeñas cantidades del producto y/o agua se pueden despegar de los medios de nutrientes líquidos del biorreactor y se pueden llevar a la corriente saliente. En realizaciones concretas, los productos despegados del biorreactor se pueden separar de la corriente saliente por los medios bien conocidos en la técnica. Por ejemplo, el etanol se puede separar de la corriente saliente con el uso de las tecnologías de membrana existentes. El producto o productos separados se pueden combinar con el producto o productos recuperados del caldo de fermentación mediante los medios convencionales.

De acuerdo con procedimientos concretos de la invención, la corriente de gas de síntesis suministrada al proceso de fermentación contiene componentes que contienen carbono, tales como CO₂ y/o CH₄ y/o BTEX y/o alquitranses. Tales componentes no se convertirán en productos en el cultivo microbiano y, así pues, saldrán del biorreactor en una corriente saliente típicamente gaseosa. Además, al menos una porción de los componentes CO y/o H₂ de la corriente de gas de síntesis con que se alimenta el interior del biorreactor no se pueden convertir en productos mediante el cultivo microbiano. En su lugar, al menos una porción del CO y/o del H₂ puede salir del biorreactor en la corriente saliente. Además, en realizaciones concretas, el CO se puede convertir al menos parcialmente en CO₂ mediante el cultivo microbiano, en particular cuando el H₂ se suministra en concentraciones limitantes. Por consiguiente, el CO₂ producido por el cultivo microbiano puede salir del biorreactor en la corriente saliente.

Así pues, de acuerdo con la invención, al menos una porción de uno o varios componentes de la corriente saliente que contienen carbono se puede devolver al gasificador para la conversión en el gas de síntesis. En realizaciones concretas, los componentes que contienen carbono de la corriente saliente se seleccionan de CO₂, CH₄ y/o otros compuestos orgánicos volátiles, alquitranses, CO, BTEX, ácidos y alcoholes. Además, o como alternativa, al menos una porción de uno o varios de los componentes de la corriente saliente que contienen hidrógeno se devuelve al gasificador para la conversión en gas de síntesis. En realizaciones concretas, los componentes que contienen hidrógeno se seleccionan de H₂ y H₂O.

La devolución al gasificador de uno o varios componentes que contienen carbono de la corriente saliente reduce la cantidad necesaria de carbono en la materia prima para producir el gas de síntesis de una composición deseada concreta. Además, la devolución al gasificador de los componentes que contienen hidrógeno de la corriente saliente reduce la cantidad de agua/vapor requerida para producir el gas de síntesis de una composición deseada concreta. Por consiguiente, habrá una mejora de la eficacia global del proceso integrado y, en realizaciones concretas en donde el gas de síntesis se convierte en productos, tales como ácidos y/o alcoholes, se incrementará la captura global de carbono del proceso.

En realizaciones concretas de la invención, toda la corriente saliente se desvía al gasificador para la conversión en el gas de síntesis. En otras realizaciones, una porción de la corriente saliente se desvía al gasificador para la conversión en el gas de síntesis. En realizaciones concretas, uno o varios componentes de la corriente saliente se separan de la corriente saliente y se desvían al gasificador. Por ejemplo, el CO₂ y/o el CH₄ se pueden separar de la corriente saliente mediante los procedimientos de separación bien conocidos en la técnica y se pueden devolver al gasificador para la conversión en el gas de síntesis. Otros componentes se pueden separar de igual forma con las técnicas bien conocidas por los expertos en la técnica. Los procedimientos bien conocidos para la separación de gases y/o la captura de CO₂ se detallan en el documento PCT/NZ2008/000275.

Así pues, en realizaciones concretas de la invención, se da a conocer un procedimiento para mejorar la captura global de carbono en un proceso de gasificación-fermentación integrados, en donde al menos una porción del gas de síntesis producido en una etapa de gasificación se envía a un biorreactor, en donde uno o varios microorganismos convierten al menos una porción del gas de síntesis en productos tal y como se definen en la presente memoria, tales como alcoholes, en una etapa de fermentación. En realizaciones concretas, los subproductos producidos en la etapa de fermentación, tales como el CO₂, salen del biorreactor en una corriente saliente, en donde al menos una porción de la corriente saliente se envía a la etapa de gasificación.

En otra realización, los componentes, tales como el BTEX y/o los alquitranes, se pueden eliminar deseablemente de la corriente de gas de síntesis antes de que la corriente pase al biorreactor. En tales realizaciones, los componentes, tales como el BTEX y/o los alquitranes, se pueden separar con los procedimientos bien conocidos en la técnica y se pueden devolver al gasificador para la conversión en gas de síntesis.

A modo de ejemplo, los componentes tales como H₂S, CO₂, alquitranes y/o el BTEX se pueden eliminar de la corriente de sustrato de gas de síntesis antes de que pase al biorreactor. Tales componentes se pueden eliminar mediante la tecnología estándar de separación, tal como la separación del solvente. Ejemplos de tales procedimientos de separación se detallan en *Gas Purification*, 5.^a edición (Kohl, A., Nielsen, R., Gulf Publishing Company, 1997). Por ejemplo, los gases ácidos, tales como el H₂S y/o el CO₂, se pueden retirar de una corriente de gas con el uso del procedimiento Selexol™ (www.uop.com/objets/97%20selexol.pdf, al que se accedió el 23 de marzo de 2008). A continuación, los componentes separados se pueden recuperar y, facultativamente, devolver al gasificador.

General

Aunque la invención se describe ampliamente con referencia a cualquier tipo de corriente que se puede mover a través o alrededor de uno o varios sistemas mediante cualquier medio de transferencia conocido, en algunas realizaciones, las corrientes de sustrato y/o de escape son gaseosas. Los expertos en la técnica apreciarán que se pueden acoplar determinadas etapas mediante medios de canalización adecuados o similares, que se pueden configurar para recibir o enviar las corrientes por un sistema. Se puede proporcionar una bomba o compresor para facilitar la administración de las corrientes a etapas concretas. Además, se puede utilizar un compresor para incrementar la presión del gas proporcionado a una o varias etapas, por ejemplo, el biorreactor. Tal y como se debate más arriba en la presente memoria, la presión de los gases dentro de un biorreactor puede afectar a la eficacia de la reacción de fermentación realizada en éste. Así pues, la presión se puede ajustar para mejorar la eficacia de la fermentación. En la técnica se conocen las presiones idóneas para las reacciones habituales.

Además, los sistemas o procesos de la invención pueden incluir facultativamente medios para regular y/o controlar otros parámetros que mejoran la eficacia global del proceso. Por ejemplo, determinadas realizaciones pueden incluir medios de determinación para monitorizar la composición del sustrato y/o la corriente o corrientes de escape. Además, determinadas realizaciones pueden incluir un medio para controlar la administración de la corriente o corrientes de sustrato a determinadas etapas o elementos dentro de un sistema concreto si el medio de determinación determina que la corriente tiene una composición idónea para una etapa concreta. Por ejemplo, en los casos donde una corriente de sustrato gaseoso contiene poca cantidad de CO o mucha cantidad de O₂ que pueden ser perjudiciales para una reacción de fermentación, la corriente de sustrato se puede desviar para que no pase por el biorreactor. En realizaciones concretas de la invención, el sistema incluye el medio para monitorizar y controlar el destino de una corriente de sustrato y/o la velocidad del flujo, de tal manera que se puede administrar a una etapa concreta una corriente con una composición deseada o idónea.

Además, podría ser necesario calentar o enfriar determinados componentes del sistema o la corriente o corrientes de sustrato antes o durante una o varias etapas del proceso. En tales casos, se pueden utilizar los medios de enfriamiento o calentamiento conocidos.

La figura 1 es una representación esquemática de un sistema 101 de acuerdo con una realización de la invención. La materia prima carbonosa, tal como biomasa, se alimenta al interior del gasificador 1 a través del puerto de entrada 2. Una corriente de vapor y/o de oxígeno se suministra al gasificador 1 a través del puerto de entrada 3. En realizaciones concretas de la invención, el gasificador está configurado de tal manera que la corriente de materia prima y el vapor y/o oxígeno reaccionan para producir el gas de síntesis. En realizaciones concretas, el gas de síntesis producido de acuerdo con los procedimientos de la invención se produce con una composición en gran medida constante durante la operación en equilibrio estacionario.

El gas de síntesis sale al gasificador 1 a través del puerto de salida 4 y pasa a la etapa optativa 5 de acondicionamiento del gas de síntesis antes de pasar al biorreactor 7, a través de un tratamiento previo optativo 6. En realizaciones concretas, la etapa optativa 5 de acondicionamiento del gas de síntesis está configurada para retirar los componentes de la corriente de gas de síntesis que pueden ser perjudiciales para un cultivo microbiano, tal como el oxígeno, materia particulada, alquitranes, H₂S y/o BTEX. En realizaciones concretas, al menos una porción de los componentes eliminados se pueden devolver al gasificador 1.

El tratamiento previo 6 se puede utilizar para controlar diferentes aspectos de la corriente, entre ellos la temperatura y la cantidad de contaminantes u otros componentes o constituyentes indeseados. También se puede utilizar para añadir componentes a la corriente. Esto dependerá de la composición concreta de la corriente de gas de síntesis y/o de la reacción de fermentación concreta y/o los microorganismos seleccionados para esto.

El tratamiento previo 6 se puede colocar en cualquier lugar dentro del sistema 101 o se puede omitir, o se pueden proporcionar varios tratamientos previos 6 en diferentes puntos del sistema 101. Esto dependerá de la fuente concreta de la corriente de gas de síntesis y/o de la reacción de fermentación concreta y/o de los microorganismos seleccionados para esto.

Después del tratamiento previo optativo, la corriente del sustrato de gas de síntesis se puede enviar al biorreactor 7 mediante cualquier medio de transferencia conocido. El biorreactor 7 está configurado para realizar la reacción de fermentación deseada para producir los productos. De acuerdo con determinadas realizaciones, el biorreactor 7 está configurado para procesar un sustrato que contiene CO y H₂ para producir uno o varios ácidos y/o uno o varios alcoholes por fermentación microbiana. En una realización concreta, el biorreactor 7 se utiliza para producir etanol y/o butanol. El biorreactor 7 puede comprender más de un tanque, en donde cada tanque está configurado para realizar la misma reacción y/o diferentes etapas dentro de un proceso de fermentación concreto y/o diferentes reacciones, entre ellas diferentes reacciones para diferentes procesos de fermentación que pueden incluir una o varias etapas comunes.

El biorreactor 7 se puede suministrar con medios de enfriamiento para controlar la temperatura en éste dentro de los límites aceptables para los microorganismos utilizados en la reacción de fermentación concreta a realizar.

Corriente arriba del biorreactor 7 se puede suministrar una bomba o compresor (no se muestra), de tal manera que incremente la presión del gas dentro del biorreactor 7. Tal y como se debatió más arriba, la presión de los gases dentro de un biorreactor puede afectar a la eficacia de la reacción de fermentación realizada en éste. Así pues, la presión se puede ajustar para mejorar la eficacia de la fermentación. En la técnica se conocen las presiones adecuadas para las reacciones habituales.

Los productos producidos en el biorreactor 7 se pueden recuperar mediante cualquier procedimiento de recuperación conocido en la técnica. Una corriente saliente que comprende componentes, tales como CO y/o H₂ sin convertir, CO₂, CH₄, BTEX, alquitranes y/o productos despegados del biorreactor, sale del biorreactor 7 a través del puerto de salida 8. La válvula 9 está configurada para enviar al menos una porción de la corriente saliente de vuelta al gasificador 1, a través del puerto de entrada 10. Antes de regresar al gasificador 1, la corriente saliente se puede acondicionar, o se puede enriquecer en determinados componentes, en una etapa optativa 11 de tratamiento del gas. En realizaciones concretas, la etapa optativa 11 del tratamiento del gas se configura para eliminar los componentes indeseables. Además, o como alternativa, la etapa optativa 11 del tratamiento del gas está configurada para enriquecer determinados componentes, tales como el CO₂, y enviar la corriente enriquecida al gasificador 1. Los componentes indeseables se pueden devolver al puerto 12 para su eliminación.

Los medios para determinar la composición de la corriente se pueden incluir facultativamente en cualquier etapa del sistema. Tales medios se pueden asociar a medios de desvío, de tal manera que las corrientes con composiciones concretas se pueden desviar hacia etapas concretas, o alejarlas de ellas, si es necesario o se desea. Los expertos en la técnica conocerán los medios para desviar y/o transferir las corrientes por las diferentes etapas del sistema.

45 Ejemplos

Ejemplo 1:

Solución A			
NH ₄ Ac	3,083 g	CaCl ₂ ·2H ₂ O	0,294 g
MgCl ₂ ·6H ₂ O	0,61 g	KCl	0,15 g
Agua destilada		Hasta 1 l	
Solución B			
Componente/solución a 0,1 M (aq)	Cantidad/ml en 1 l de medio	Componente/solución a 0,1 M (aq)	Cantidad/ml en 1 l de medio
FeCl ₃	10 ml	Na ₂ SeO ₃	1 ml

CoCl ₂	5 ml	Na ₂ MoO ₄	1 ml
NiCl ₂	5 ml	ZnCl ₂	1 ml
H ₃ BO ₃	1 ml	MnCl ₂	1 ml
Solución C			
Biotina	20,0 mg	Ácido nicotínico	50,0 mg
Ácido fólico	20,0 mg	D-(*)-Pantotenato de calcio	50,0 mg
Piridoxina, HCl	10,0 mg	Vitamina B12	50,0 mg
Tiamina. HCl	50,0 mg	Ácidos p-aminobenzoicos	50,0 mg
Riboflavina	50,0 mg	Ácido tióctico	50,0 mg
Agua destilada	Hasta 1 l		

Preparación de la solución de Cr (II)

- A un matraz de 1 l con tres cuellos se le ajustó una entrada y una salida herméticas de gases para que todo ocurra en un gas inerte y la posterior transferencia del producto deseado a un matraz de almacenamiento idóneo. El matraz se cargó con CrCl₃·6H₂O (40 g, 0,15 mol), gránulos de cinc [malla 20] (18,3 g, 0,28 mol), mercurio (13,55 g, 1 ml, 0,0676 mol) y 500 ml de agua destilada. Después de irrigar con N₂ durante una hora, la mezcla se calentó a aproximadamente 80 °C para iniciar la reacción. Después de dos horas de agitación en un flujo de N₂ constante, la mezcla se enfrió a temperatura ambiente y se agitó continuamente durante otras 48 horas, después de las cuales la mezcla de reacción se había convertido en una solución azul oscuro. La solución se transfirió a botellas de suero purgadas con N₂ y se almacenó en el refrigerador para su uso futuro.

Bacterias: la *Clostridium autoethanogenum* utilizada es la depositada en el Centro Alemán de Recursos para Material Biológico (DSMZ) cuyo número de acceso es DSMZ 19630.

Toma de muestras y procedimientos analíticos

- Se tomaron muestras del medio del reactor CSTR a intervalos durante periodos de hasta 20 días. Cada vez que se tomaba la muestra del medio, se tuvo cuidado para asegurar que no se dejaba entrar ni escapar gas del reactor.

HPLC:

Sistema de HPLC de Agilent serie 1100. Fase móvil: ácido sulfúrico a 0,0025 N. Flujo y presión: 0,800 ml/min. Columna: Alltech IOA; catálogo n.º 9648, 150 × 6,5 mm, tamaño de las partículas, 5 µm. Temperatura de la columna: 60 °C. Detector: índice de refracción. Temperatura del detector: 45 °C.

- 20 Método para la preparación de muestras:

En un tubo Eppendorf se cargaron 400 µl de la muestra y 50 µl de ZnSO₄ a 0,15 M y 50 µl de Ba(OH)₂ a 0,15 M. Los tubos se centrifugaron durante 10 min a 12.000 rpm y 4 °C. Se transfirieron 200 µl del sobrenadante a un vial de HPLC y se inyectaron 5 µl en el instrumento de HPLC.

Análisis del espacio de cabeza:

- 25 Se realizaron mediciones en un Varian CP-4900 micro GC con dos canales instalados. El canal 1 era una columna Mol-sieve de 10 m que funcionaba a 70 °C, argón a 200 kPa y un tiempo de flujo inverso de 4,2 s, mientras que el canal 2 era una columna PPQ de 10 m que funcionaba a 90 °C, helio a 150 kPa y sin flujo inverso. La temperatura del inyector para ambos canales era de 70 °C. Los tiempos de funcionamiento se establecieron en 120 s, pero todos los picos de interés solían eluirse antes de los 100 s.

- 30 Sustrato

Se obtuvo gas de síntesis embotellado de una instalación de demostraciones de dos toneladas/día secas Range Fuels en Denver, Colorado (EE. UU.). La materia prima eran astillas de pino de Colorado y el gas de síntesis obtenido se secó y se despojó en su mayor parte de residuos aromáticos y del exceso de CO₂ antes de embotellarlo.

Ejemplo 1: Fermentación por lotes en CSTR

- 35 Se transfirieron aseptica y anaeróbicamente 800 ml de medio líquido que contiene la solución A a una cubeta de CSTR de 1 l y se roció continuamente con N₂. Una vez transferido, el estado de reducción y el pH del medio se pudo medir directamente con sondas. El medio se calentó a 37 °C y se agitó a 400 rpm. A continuación se le añadieron ácido fosfórico (30 nM), tungstato de sodio (10 µM), solución B y solución C. A la cubeta de fermentación se le

añadió la solución de sulfuro de sodio (0,5 mM), y el medio entonces se redujo a 200 mV mediante la adición de una solución de cloruro de cromo(II).

5 Antes de la inoculación, el gas de N₂ se cambió por una mezcla de gases de CO al 30%, H₂ al 50%, CO₂ al 5% y CH₄ al 15% (gas de síntesis de Range Fuels), que se roció continuamente en el caldo de fermentación durante todo el experimento. Un cultivo de *Clostridium autoethanogenum* en crecimiento activo se inoculó en el CSTR a un volumen de aproximadamente el 10% (v/v). El sustrato y la agitación se incrementaron con el tiempo de acuerdo con el crecimiento del cultivo microbiano.

Resultados:

10 La producción de metabolitos y el crecimiento microbiano se puede observar en la figura 2. Desde el día 1 comenzó la producción de biomasa y etanol, al principio siguiendo una tendencia exponencial, antes de ajustarse a una tasa de producción más lineal. La biomasa alcanzó un máximo de 4,9 g/l el día 3 y la concentración de etanol se incrementó a un máximo de 64 g/l el día 3,7. El acetato se acumuló a 5,9 g/l antes de caer a 2 g/l hacia el final de la fermentación.

15 Las tendencias del consumo y de la producción de gases se pueden observar en la figura 3. A medida que el cultivo comenzó a crecer después de la inoculación, al caldo de fermentación se le proporcionó una agitación y un flujo de gases cada vez mayores. Esto dio lugar a un consumo estable de CO de más de 2,0 mol/l al día entre los días 1,8 y 3,0, durante los cuales se observó la tasa más alta de producción de etanol. El consumo de H₂ alcanzó un máximo de 1,4 mol/l al día a día 2 de esta ronda de fermentación, con una tasa máxima de consumo de gas combinado (CO y H₂) de 3,6 g/l al día. A medida que el cultivo microbiano consumió el CO, se produjo CO₂ hasta alcanzar un
20 máximo de aproximadamente 1,0 mol/l al día entre los días 1,8 y 3,0.

La referencia a cualquier técnica anterior en esta especificación no es, y no se debe tomar como tal, ni un reconocimiento ni tan siquiera una forma de sugerir que la técnica anterior forma parte del conocimiento general común del campo de entrenamiento en ningún país.

25 A lo largo de esta especificación y cualquiera de las reivindicaciones que siguen, a menos que el contexto lo requiera de otra manera, las palabras «comprende», «que comprende» y similares se deben entender en un sentido inclusivo y no en un sentido exclusivo, es decir, en el sentido de “que incluye, pero no se limita a ello”.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para incrementar la captura de carbono en un proceso de fermentación, en donde el procedimiento incluye la gasificación de una materia prima para producir un sustrato de gas de síntesis en un gasificador y poner en contacto al menos una porción del sustrato de gas de síntesis con uno o varios microorganismos en un biorreactor para producir uno o varios productos, en donde los productos son uno o varios ácidos y/o alcoholes, en donde una corriente saliente sale del biorreactor, y en donde al menos una porción de la corriente saliente se envía al interior del gasificador.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, en donde la corriente saliente comprende uno o varios subproductos de fermentación.
3. Procedimiento según la reivindicación 2, en donde un subproducto de fermentación es el dióxido de carbono, y en donde al menos una porción del dióxido de carbono que sale del biorreactor se dirige al gasificador.
4. Procedimiento según la reivindicación 3, en donde el dióxido de carbono se separa en gran medida de uno o varios componentes más de la corriente saliente.
5. Procedimiento según la reivindicación 1, en donde la corriente saliente comprende un primer componente y facultativamente uno o varios segundos componentes de la corriente de gas de síntesis que no se han convertido en productos mediante la fermentación.
6. Procedimiento según la reivindicación 5, en donde el primer componente que no se ha convertido en productos es metano, y en donde al menos una porción del metano que sale del biorreactor se dirige al gasificador.
7. Procedimiento según la reivindicación 6, en donde el metano se separa en gran medida de uno o varios componentes de la corriente saliente.
8. Procedimiento para producir productos por fermentación de un sustrato de gas de síntesis mediante uno o varios microorganismos, en donde el gas de síntesis procede de la gasificación de una materia prima y se produce en un gasificador, en donde el procedimiento incluye dirigir al menos una porción de un subproducto del dióxido de carbono, producido en la fermentación, al interior del gasificador, en donde los productos son uno o varios ácidos y/ alcoholes.
9. Procedimiento según la reivindicación 8, en donde (a) uno o varios ácidos incluye acetato y/o (b) uno o varios alcoholes incluye etanol.
10. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en donde el uno o varios microorganismos es una bacteria carboxidótrofa anaerobia seleccionada del grupo que consiste en *Clostridium*, *Moorella*, *Pyrococcus*, *Eubacterium*, *Desulfobacterium*, *Carboxydotherrnus*, *Acetogenium*, *Acetobacterium*, *Acetoanaerobium*, *Butyribacterium* y *Peptostreptococcus*.
11. Procedimiento según la reivindicación 10, en donde la bacteria carboxidótrofa es *Clostridium autoethanogenum* que tiene las características identificativas de la cepa depositada en el Centro Alemán de Recursos para Material Biológico (DSMZ) con el número de depósito identificativo 19630.
12. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, 10 u 11, en donde dicho uno o varios ácidos y/o alcoholes se seleccionan del grupo que incluye acetato y etanol.
13. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, en donde la materia prima comprende material carbonoso seleccionado de: basura urbana sólida, material forestal, residuos de madera, material de construcción, material vegetal, carbón, petróleo, materiales de desecho de pasta y de papel, coproductos petroquímicos, neumáticos o combinaciones de los mismos.
14. Sistema para incrementar la eficacia de un procedimiento para producir productos que son alcohol(es) y facultativamente ácido(s) mediante la fermentación microbiana de sustratos de gas de síntesis, en donde el sistema comprende:
 - a. un gasificador configurado para producir un sustrato de gas de síntesis que comprende CO y H₂;
 - b. un biorreactor configurado para convertir al menos una porción de CO y, facultativamente, de H₂ del sustrato de gas de síntesis en productos;
 - c. medios para enviar de vuelta al gasificador al menos una porción de uno o varios componentes del sustrato de gas de síntesis que no se ha convertido en producto(s) y/o al menos una porción de al menos un subproducto de la fermentación de una corriente saliente que sale del biorreactor.
15. Sistema según la reivindicación 14, en donde el sistema está configurado para enviar al gasificador al menos una porción de un subproducto que comprende dióxido de carbono.

16. Sistema según las reivindicaciones 14 o 15, en donde el sistema incluye medios de separación configurados para separar el dióxido de carbono de la corriente saliente, de tal manera que se pueda enviar al gasificador.

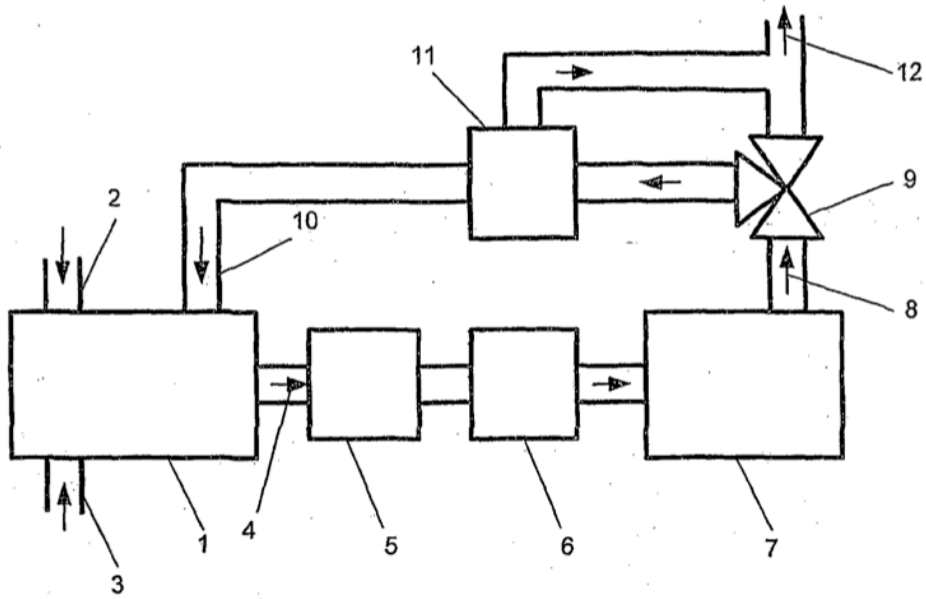


Figura 1

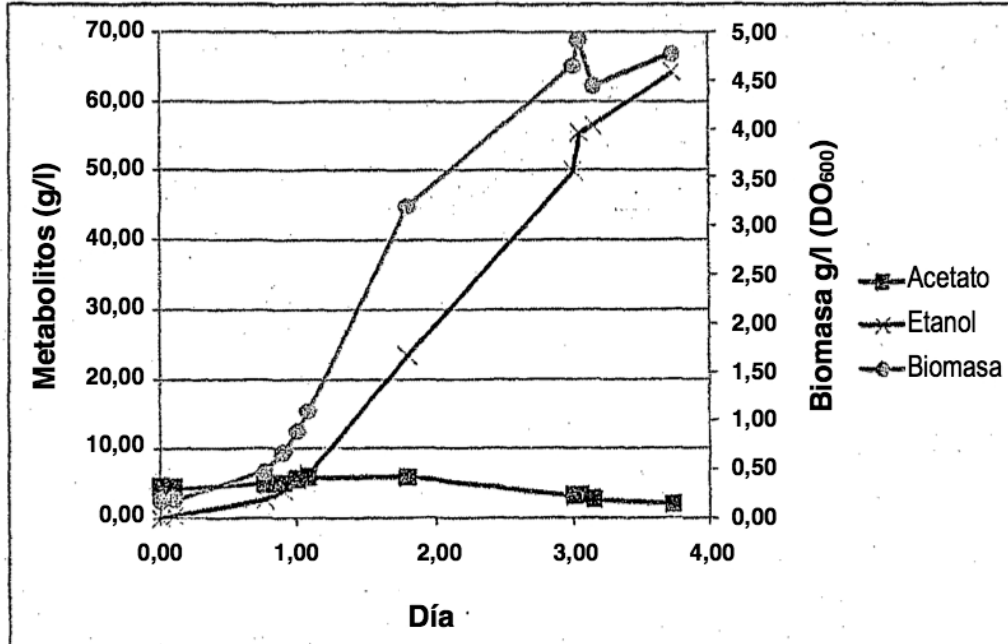


Figura 2

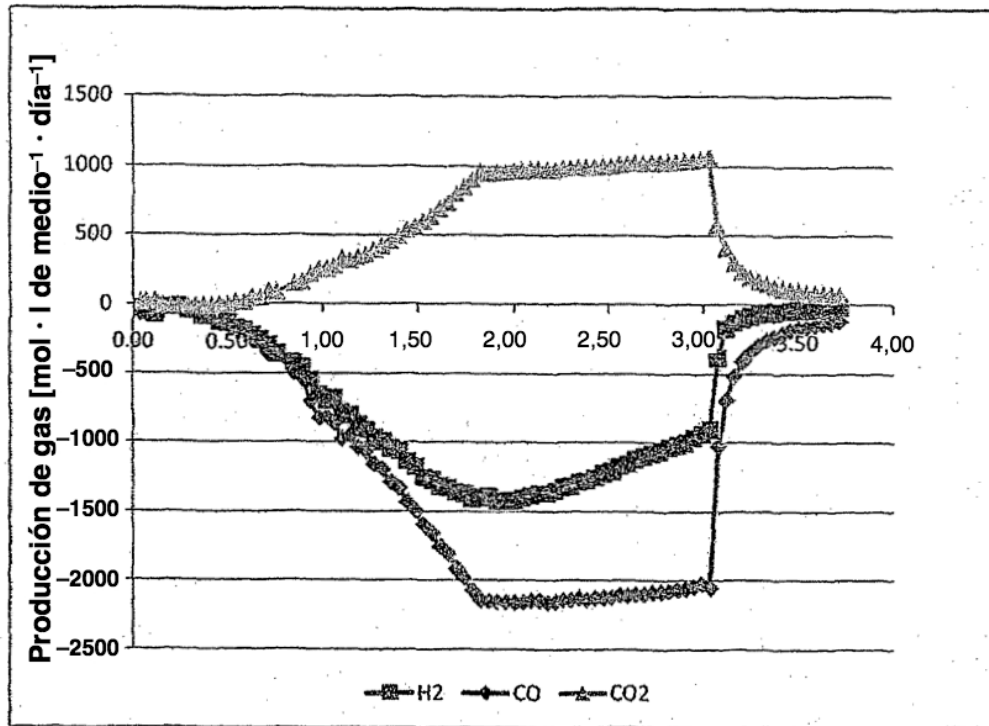


Figura 3