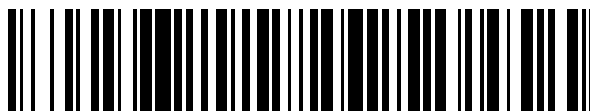


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 427 134**

51 Int. Cl.:

**B01D 53/62** (2006.01)

**B01D 53/84** (2006.01)

**C02F 3/28** (2006.01)

**C02F 11/04** (2006.01)

**C12P 5/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.01.2010 E 10706694 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.06.2013 EP 2389235**

54 Título: **Procedimiento de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos por acoplamiento de un sistema de digestión anaerobia y de un sistema de producción de microorganismos fitoplanctónicos**

30 Prioridad:

**20.01.2009 FR 0950334**

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

**29.10.2013**

73 Titular/es:

**INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE  
AGRONOMIQUE (INRA) (33.3%)  
147, rue de l'Université**

**75007 Paris, FR;  
INRIA INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN  
INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE (33.3%) y  
INSTITUT FRANCAIS DE LA RECHERCHE POUR  
L'EXPLOITATION DE LA MER (IFREMER) (33.3%)**

72 Inventor/es:

**BERNARD, OLIVIER;  
BOUGARAN, GAEL;  
CADORET, JEAN-PAUL;  
KAAS, RAYMOND;  
LATRILLE, ERIC;  
SIALVE, BRUNO y  
STEYER, JEAN-PHILIPPE**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

**ES 2 427 134 T3**

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

## DESCRIPCIÓN

Procedimiento de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos por acoplamiento de un sistema de digestión anaerobia y de un sistema de producción de microorganismos fitoplanctónicos.

### Campo de la invención

5 La invención se refiere a un procedimiento combinado de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos que permite tratar diversos residuos orgánicos y, simultáneamente, captar grandes cantidades de CO<sub>2</sub>, perjudiciales para el medio ambiente, que provienen, entre otros, de efluentes gaseosos industriales, todo ello para producir un biogas purificado rico en metano. Más precisamente, la invención se refiere a un procedimiento que permite, gracias al  
10 reciclaje del nitrógeno y de otros nutrientes provenientes de la digestión anaerobia de residuos orgánicos, tratar los flujos importantes de CO<sub>2</sub> adicionales, mediante microorganismos fitoplanctónicos, tales como microalgas y/o bacterias fotosintéticas. Por lo tanto, el procedimiento de acuerdo con la invención, permite fijar el CO<sub>2</sub> que normalmente es expulsado a la atmósfera, participando entre otros en el efecto invernadero, y valorizarlo en bioenergía.

15 La invención encuentra aplicación en toda industria que genere residuos orgánicos, y concretamente las industrias agroalimentarias, y las actividades antrópicas emisoras de CO<sub>2</sub>. La invención encuentra aplicación igualmente en el campo de la producción de biocarburantes, estando los biogases purificados resultantes del procedimiento de acuerdo con la invención enriquecidos en metano, y utilizándose la biomasa concretamente algal para la purificación de los biogases que son una fuente muy importante de lípidos igualmente utilizables como biocarburantes.

### Estado de la técnica

20 La metanización se utiliza desde hace mucho tiempo para la transformación de los residuos orgánicos, solubles o sólidos, en biogas. Esta técnica se aplica a la descontaminación de cargas contaminantes, tales como las aguas residuales urbanas o industriales cargadas con materia orgánica biodegradable, o los productos orgánicos se presentan en forma sólida, tales como los lodos de purificación, los residuos domésticos, los bioresiduos, los  
25 residuos de las industrias agro-alimentarias, los residuos resultantes de diferentes actividades agrícolas o silvícolas, los cultivos energéticos. La conversión de la materia orgánica en metano por vía biológica ofrece la ventaja de proporcionar una energía que puede utilizarse directamente como carburante en vehículos, o aún convertirse en calor y/o electricidad.

30 En un procedimiento de la técnica anterior representado por el documento EP-A2-0890388, los residuos orgánicos se tratan por fermentación que implica una hidrólisis seguida de una metanización anaerobia, el metano producido se envía entonces a un primer reactor catalítico para formar hidrógeno, que se pondrá en contacto en un segundo reactor catalítico con el CO<sub>2</sub> de un efluente gaseoso que lo contenga, para formar carbono y agua.

35 El tratamiento de las cargas sólidas por metanización requiere, ya que se realiza en una sola etapa, un tiempo particularmente largo. Por este motivo se sabe cómo Esto es lo que se conoce como proceder en un tratamiento en dos etapas: por un lado, la hidrólisis durante el transcurso de la cual las macromoléculas se transforman en moléculas de bajo peso molecular y solubles, y la acidogénesis, durante el transcurso de la cual las moléculas de bajo peso molecular se transforman en ácidos orgánicos de cadena corta, en alcoholes, en hidrógeno y otros  
40 compuestos simples y, por otro lado, la acetogénesis durante el transcurso de la cual los alcoholes y ácidos orgánicos se transforman en ácido acético, y la metanogénesis, durante el transcurso de la cual se forma el metano, ya sea a partir de hidrógeno o a partir de ácido acético.

45 El biogas producido durante el transcurso de la metanización está compuesto esencialmente por una mezcla del 50 al 70 % de metano y del 30 al 50 % de dióxido de carbono. Sin embargo, en función de las condiciones operativas del reactor, pero también de la naturaleza del o los sustratos, pueden estar presentes otros compuestos (sulfuro de hidrógeno, amoníaco, siloxanos...) a concentraciones más o menos importantes. Incluso a nivel de trazas en el biogas, estos últimos pueden resultar perjudiciales para los procesos de valorización energética aguas abajo (corrosión de las piezas mecánicas, ensuciamiento de motores/turbinas...).

Por lo tanto, la conversión en energía mecánica o eléctrica necesita en la mayor parte de los casos una etapa previa de filtración/purificación para una explotación sostenible.

50 Actualmente, numerosas investigaciones se centran en la producción en masa de microalgas con fines energéticos. En efecto, como las plantas superiores, las microalgas necesitan para su crecimiento una fuente de carbono (inorgánico - CO<sub>2</sub> o HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> u orgánico - acetato, glucosa...), aportes de elementos nutritivos (nitrógeno, fósforo, etc. pero también oligo-elementos, en ocasiones vitaminas, etc.) y energía luminosa. En condiciones de estrés en elementos nutritivos, ciertas especies de microalgas son capaces de acumular una gran cantidad de carbono en forma de lípidos. La capacidad de producción lipídica de ciertas especies es bastante superior a la observada para las especies oleaginosas terrestres, haciendo a las microalgas particularmente interesantes para el sector de los  
55 biocarburantes.

Sin embargo, la producción de estos microorganismos a gran escala necesita movilizar una cantidad muy importante de elementos nutritivos. En efecto, considerando la relación de Redfield (C/N/P: 106/16/1) para una tonelada de CO<sub>2</sub> fijada (que corresponde a 600 kg de biomasa seca producida), hace falta movilizar aproximadamente 50 kg de nitrógeno y 3,1 kg de fósforo. Sabiendo que para un estanque abierto de una hectárea de superficie, es posible fijar una tonelada de CO<sub>2</sub> por día, los aportes requeridos de nitrógeno y fósforo son consecuentes y sobrepasan las necesidades de los cultivos de oleaginosas terrestres.

Por otro lado, los recursos de carbono - en forma de CO<sub>2</sub> - son el factor limitante del crecimiento de las microalgas. Un aporte continuo de CO<sub>2</sub> durante el transcurso de la fase luminosa de la fotosíntesis permite conseguir niveles de productividad elevados en términos de biomasa y favorece también (en ciertas condiciones) una acumulación más grande de lípidos. Sin embargo, la adición de CO<sub>2</sub> en el medio de cultivo supone una caída del pH que puede ser perjudicial para ciertas especies. Esta toxicidad por una acidez demasiado fuerte necesita el control preciso del flujo de CO<sub>2</sub> en función del pH del medio. Por lo tanto, conviene someter la inyección en el medio del gas rico en CO<sub>2</sub> al pH de manera que se mantenga el pH a un valor de consigna.

El cultivo en sistemas cerrados (fotobiorreactores) permite conseguir niveles de productividad muy elevados en términos de fijación de CO<sub>2</sub> y de producción de biomasa. En cambio, los costes asociados a tal tecnología (construcción, funcionamiento, mantenimiento) hacen por el momento a esta tecnología difícilmente compatible con una producción en masa. Por el contrario, los sistemas abiertos, bastante más interesantes desde el punto de vista económico, son extremadamente sensibles a las contaminaciones de diversas naturalezas (microalgas indígenas, bacterias, depredadores).

Además, las operaciones de cosecha de microalgas (separación de las células del medio de cultivo) además de la extracción de los lípidos de la célula resultan ser costosas energéticamente y afectan considerablemente al balance energético de la producción de la biomasa. Esto puede suponer, en efecto, el 50% de los costes de producción.

La valorización energética de esta biomasa supone una utilización del conjunto de la célula (extracción de los lípidos, conversión termoquímica, licuefacción, combustión, metanización). La extracción de los ácidos grasos genera, por otro lado, un residuo rico en elementos nutritivos (concretamente nitrógeno y fósforo) que es necesario reciclar.

### Descripción de la invención

La presente invención propone proporcionar un procedimiento de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de los residuos orgánicos que permite la producción de bioenergía en forma de metano, por asociación de la técnica de tratamiento de residuos por metanización a la técnica de purificación gaseosa por los microorganismos fitoplanctónicos, tales como las microalgas y las bacterias fotosintéticas (tales como cianobacterias), de manera que se optimizan sus ventajas técnicas respectivas a la vez que se suprimen todos o parte de los inconvenientes de cada una de estas técnicas en solitario.

Un objetivo de la invención es proporcionar un sistema que permita el tratamiento de grandes cantidades de efluentes gaseosos, concretamente industriales, por fijación del CO<sub>2</sub> que contienen.

Por ello, la invención propone asociar una etapa de metanización de residuos orgánicos sólidos a una etapa de filtración de biogas producido por los microorganismos fotosintéticos, siendo alimentados simultáneamente dichos microorganismos con carbono inorgánico proveniente de un efluente gaseoso que contiene CO<sub>2</sub>. Para evitar, o al menos reducir, los riesgos asociados de inhibición del sistema de acuerdo con la invención por acumulación de amonio, concretamente en la etapa de metanización, la invención propone mantener en el digestor de la etapa de metanización y/o en el medio de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos una relación carbono/nitrógeno (C/N) elevada, si posible entre 10 y 35, aunque tal relación normalmente está comprendida entre 6 y 9, lo que conduce entonces a una gran producción de amonio y una gran inhibición de la etapa de metanización. En efecto, se actúa directamente sobre la relación C/N en el digestor, cuya fase líquida debe alimentar el metanizador de la etapa de metanización, o se actúa sobre la unidad de cultivo de microorganismos, cuya fracción debe reintroducirse en el digestor y, por lo tanto, indirectamente en el metanizador.

En efecto, como los microorganismos tienen vocación de crecer, la invención propone utilizar una parte de dichos microorganismos fitoplanctónicos para alimentar el digestor utilizado para la etapa de metanización. Según las puestas en práctica del procedimiento de la invención, será posible modular el aporte de microorganismos y/o de residuos orgánicos adicionales, que pueden formar un co-sustrato, en el digestor. Así, la asociación de un tratamiento por metanización con una filtración por microorganismos permite crear una fuente complementaria de residuos orgánicos para la metanización utilizando el excedente de biomasa. Por excedente, se entiende una parte de la biomasa presente en la cuba de cultivo de los microorganismos que puede retirarse de dicha cuba, sin que esto perjudique al buen desarrollo de la etapa de purificación del biogas de acuerdo con el procedimiento de la invención. En la medida en que, a la inversa, el crecimiento de la biomasa puede ser rápidamente perjudicial para el buen funcionamiento de la cuba de cultivo de microorganismos, el experto en la materia encuentra fácilmente el buen equilibrio entre la cantidad de biomasa a mantener en la cuba de cultivo de microorganismos y la cantidad de biomasa excedentaria a retirar de manera que quede una productividad óptima, por ejemplo para mantener la

turbidez de manera que el 95% de la luz sea atenuada en un espesor entre el 50% y el 90% de la profundidad del estanque.

5 El procedimiento de acuerdo con la invención puede utilizar, por lo tanto, los residuos de naturaleza orgánica y en cantidades variables en función de los microorganismos fitoplanctónicos presentes en el digestor, para asegurar una fijación óptima del CO<sub>2</sub> en la unidad de cultivo de los microorganismos fitoplanctónicos. Asimismo, el procedimiento de acuerdo con la invención puede permitir tener en cuenta la naturaleza de los residuos orgánicos a tratar y la composición de los microorganismos para adaptar el procedimiento de tratamiento a la naturaleza de dichos residuos orgánicos a tratar. Esto permite tratar de manera homogénea toda clase de residuos orgánicos.

10 La conversión de la materia orgánica durante la metanización da lugar a la producción de un biogas que comprende una mezcla de metano y de CO<sub>2</sub>, así como un digerido cuya fracción líquida contiene ácidos orgánicos y elementos mineralizados (tales como nitrógeno, fósforo etc.). Tanto el biogas como el digerido van a alimentar la unidad de cultivo de microorganismos.

15 La unidad de cultivo de microorganismos puede ser un estanque abierto que permite solubilizar una gran cantidad de CO<sub>2</sub>. Con el fin de limitar las contaminaciones por los microorganismos exteriores al cultivo inicial, es posible utilizar las especies de microorganismos extremófilos, es decir, que soportan pH muy elevados o, al contrario, muy bajos. Concretamente, es posible utilizar microorganismos tales como Chlorella, Chloridella, Chlamydomonas, Viridiella, Euglena y Euchromonoas, para los medios ácidos y Arthrospira, Nannochloropsis, Synecococcus y Tetraselmis para los medios alcalinos, o una población mixta tal como la que se encuentra en las lagunas de descontaminación.

20 La unidad de cultivo, ventajosamente, consta de dos sistemas independientes de aporte de CO<sub>2</sub>. Uno de ellos destinado al CO<sub>2</sub> contenido en el efluente gaseoso de origen industrial y el otro el CO<sub>2</sub> en el biogas que se va a purificar. En el segundo sistema, la fijación del CO<sub>2</sub> contenido en el biogas permite obtener en la salida de los procesos un gas de concentración elevada en metano y poder energético aumentado.

25 La invención, por lo tanto, tiene por objeto un procedimiento de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos por acoplamiento de un sistema de digestión anaerobia y de un sistema de producción de microorganismos fitoplanctónicos, que comprende las siguientes etapas:

(a') tratar los microorganismos (105) resultantes de un cultivo fitoplanctónico y los residuos orgánicos (104) en un reactor de hidrólisis (101);

30 (a'') tratar al menos una parte de un efluente líquido (109) que sale de la etapa (a') en un reactor de metanización (102);

(b) tratar una fase líquida (127) y el biogas que se va a purificar (110) que sale de la etapa (a'') en una unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos (103);

(c) inyectar un efluente gaseoso (113) que contiene CO<sub>2</sub> en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos;

35 (d) mantener una concentración de NH<sub>3</sub> inferior a 0,5 g/l en el reactor de metanización;

(e) recuperar un biogas enriquecido en metano al salir de la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos.

40 El biogas que se va a purificar recuperado al salir de la etapa (a'') se trata de un gas producido por la fermentación de materias orgánicas, de origen animal y/o vegetal, en ausencia de oxígeno. El biogas está compuesto esencialmente de metano y de gas carbónico, eventualmente con pequeñas cantidades de agua, de sulfuro de hidrógeno, etc.

45 El biogas purificado, enriquecido en metano, recuperado al salir de la etapa (e) consiste esencialmente de metano y un contenido limitado de oxígeno. Es igualmente posible que haya otros gases, tales como: CO<sub>2</sub> y/o N<sub>2</sub> pero a nivel de trazas. De una manera general, el biogas purificado enriquecido en metano recuperado al salir de la etapa (e) consiste en al menos un 90% de metano.

50 La metanización en dos etapas (a') y (a'') permite colocar las poblaciones hidrolíticas/acidógenas y metanógenas en sus condiciones óptimas respectivas, conseguir rendimientos de conversión de la materia orgánica más elevados, y poder tratar un intervalo más grande de residuos orgánicos de hecho por el efecto tampón del reactor de hidrólisis. Por otro lado, el biogas producido al nivel de la etapa de metanización a una concentración de metano particularmente elevada, y el CO<sub>2</sub> producido durante la etapa de hidrólisis (a') pueden inyectarse ventajosamente en el cultivo de microalgas, a la misma titulación que el biogas producido al nivel de la etapa de metanización propiamente dicha (a'').

Bien entendido, es posible, por razones de volumen u otras, realizar de manera continua la metanización en una única etapa (a), recuperándose el biogas que se va a purificar al salir del reactor único.

La etapa de metanización, después de consumidos los ácidos orgánicos, tiende a aumentar el pH en el metanizador, o reactor de metanización, lo que supone un aumento de la relación  $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$  en dicho metanizador. O, una concentración de  $\text{NH}_3$  demasiado fuerte en el metanizador requiere a corto plazo inhibir el procedimiento de acuerdo con la invención.

- 5 También, de acuerdo con la invención, para mantener en el metanizador una concentración inferior a 0,5 g/l de  $\text{NH}_3$  se propone mantener una relación Carbono/Nitrógeno (C/N) media entre 10 y 35 en el reactor de hidrólisis y/o en la unidad de cultivo de microorganismos y/o inyectar directamente en el metanizador el  $\text{CO}_2$  con el fin de limitar la subida del pH.

10 Por relación media C/N se entiende la mediana de las proporciones C/N en los residuos, las células y en el medio de cultivo, pudiendo excretar los microorganismos una gran cantidad de carbono en forma de polímeros orgánicos. El mantenimiento de una relación C/N comprende entre 10 y 35, que es la consecuencia de un fuerte aporte de  $\text{CO}_2$  en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos, permite evitar la inhibición del procedimiento de acuerdo con la invención por acumulación de amonio.

15 Por ello, de acuerdo con la invención, por ejemplo se puede modular en calidad y/o en cantidad la fracción de residuos orgánicos introducida en el reactor de hidrólisis en la etapa (a'). Concretamente, se puede prever utilizar los residuos orgánicos que presentan una relación C/N superior a 25.

20 De otro modo, es posible modular la cantidad de efluente líquido que sale de la etapa (a'') introducido en la etapa (b), de manera que induce una limitación nutritiva apropiada para modificar la composición de los microorganismos de la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos para favorecer la acumulación de lípidos y glúcidos en dichos microorganismos y, por lo tanto, el aumento de la relación C/N en dicha unidad.

También es posible modular el caudal entrante del biogas que sale de la etapa (a'') en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos, de manera que se controla el pH de dicha unidad de cultivo, y crear las condiciones apropiadas para aumentar la relación C/N.

25 En efecto, la calidad del contenido intracelular de las microalgas es, en una cierta medida, dependiente de sus condiciones de cultivo. Así, actuando sobre las condiciones operativas aplicadas durante el cultivo de los microorganismos, es posible modificar notablemente la repartición de los constituyentes proteínico, lipídico y glucídico de la materia orgánica. Estas modificaciones tienen una influencia sobre la biodegradabilidad de las células y su conversión en ácidos orgánicos y en metano. Las variaciones entre las fracciones nitrogenadas (proteínas) y carbonadas (glúcidos y lípidos) de la materia orgánica afectan a la relación carbono/nitrógeno global (C/N) aportada en el reactor de hidrólisis y, por lo tanto, por consecuencia igualmente en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos.

35 De acuerdo con la invención, el control de las condiciones de cultivo de los microorganismos se puede realizar así por modulación del aporte de  $\text{CO}_2$  y/o por modulación del aporte de los elementos nutritivos contenidos en la fase líquida recuperada al salir de las etapas (a') y/o (a''). El  $\text{CO}_2$  proviene en todos los casos de un efluente gaseoso, que contiene un fuerte contenido en  $\text{CO}_2$  (entre el 5 y el 25%) pero que puede provenir igualmente del reactor de hidrólisis donde ha tenido lugar la primera etapa de tratamiento de los residuos orgánicos. Más precisamente, de acuerdo con la invención, es posible prever una etapa durante la cual se module la cantidad de efluente líquido que sale de la etapa (a'') introducida en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos, y/o la cantidad de  $\text{CO}_2$  orgánico y/o inorgánico introducida en dicha unidad de cultivo de microorganismos, de manera que se modifica la composición de la biomasa de la unidad de cultivo de microorganismos y se mantiene una relación C/N entre 10 y 35.

El control de estos dos parámetros (nutrientes y  $\text{CO}_2$ ) permite modificar la composición de las células, y así la relación C/N. El rápido crecimiento de los microorganismos (aproximadamente la población se duplica por día) permite contemplar una respuesta rápida de las células.

45 En otras condiciones, las calidades y cantidades de co-residuos pueden ajustarse para adaptarlas a la calidad de los microorganismos para permanecer en las condiciones óptimas de degradabilidad.

50 Esta etapa permite, al aumentar el flujo de entrada de la fase líquida en la unidad de cultivo de microorganismos, favorece el crecimiento de la biomasa, aumentando los aportes de nutrientes y nitrógeno. En efecto, esta fase líquida contiene además ácidos orgánicos, esencialmente nitrógeno y fósforo en forma mineral (amonio y fosfato). Estos últimos elementos son necesarios para el metabolismo de los microorganismos fitoplanctónicos tales como las microalgas. Ciertos ácidos orgánicos son asimilables por ciertas especies de microalgas (crecimiento heterótrofo o mixótrofo) y permiten aumentar significativamente el crecimiento.

55 A la inversa, al disminuir el flujo de entrada de la fase líquida en la unidad de cultivo de microorganismos, se aumenta la relación C/N en dicha unidad de cultivo. En efecto, las carencias en elementos nutritivos tienen un impacto sobre la fisiología de las células de las microalgas. La limitación o la carencia de nitrógeno favorecen la acumulación de carbono en la célula en forma de glúcidos, de almidón o de lípidos. Sin embargo, este fenómeno va acompañado de una ralentización del crecimiento, a falta del precursor de nitrógeno necesario para la elaboración

de las proteínas. Por lo tanto, es necesario controlar el flujo de entrada de efluente líquido de manera que no suponga una parada total perjudicial del crecimiento de los microorganismos.

5 Asimismo, para modular el caudal de biogas que sale de la etapa (a") inyectado en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos (pero igualmente su productividad) en función de las necesidades de carbono y nitrógeno. Al aumentar la cantidad de biogas en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos, se favorece la acumulación de almidón y de lípidos en las células, lo que permite aumentar la relación C/N en los microorganismos.

10 Asimismo, el caudal de entrada del efluente gaseoso que contiene CO<sub>2</sub> puede modularse, permitiendo el aporte de CO<sub>2</sub> modificar la composición de la biomasa de la unidad de cultivo de microorganismos. Si el cultivo es a un pH alcalino, el CO<sub>2</sub> se disolverá espontáneamente. Si el cultivo es de tipo ácido o alcalino, la adición de gas estará condicionada por el pH a través de un sistema de regulación. La inyección en el medio del gas rico en CO<sub>2</sub> se realiza ventajosamente a un pH de manera que se mantiene el pH a un valor de consigna. Pueden utilizarse reguladores tipo PID o MLI para realizar esta tarea. Si la alcalinidad es elevada (presencia de grandes cantidades de cationes), el pH puede mantenerse a valores elevados a pesar de los flujos de CO<sub>2</sub>.

15 Se puede modular igualmente el caudal de entrada de efluente gaseoso de manera que se mantenga un flujo de carbono fijado al menos 10 veces superior al flujo de nitrógeno entrante en la unidad de cultivo de microorganismos. Por ello, se puede imponer una tasa de dilución del cultivo de microorganismos fitoplanctónicos inferior a la tasa de crecimiento máxima de dichos microorganismos, de manera que se induce una limitación por un elemento nutritivo, estando el carbono inorgánico aportado en exceso.

20 Por otro lado, la adición de CO<sub>2</sub>, preferiblemente guiada por el valor del pH, en la unidad de cultivo de microorganismos, permite mantener el CO<sub>2</sub> disuelto en un campo no limitante para la fotosíntesis. Esto permite evitar un fenómeno clásico de subida del pH en los cultivos de alta densidad, asociado a una rarefacción del carbono inorgánico disuelto necesaria para el crecimiento. Por lo tanto, la inyección de CO<sub>2</sub> permite, en el caso de cultivos acidófilos y, en el caso de cultivos alcalinos, mantener tasas de crecimiento elevadas y comprende, para concentraciones de biomasa elevadas en el cultivo, mantener un pH ligeramente ácido (entre 4 y 7). Solo ciertas microalgas tienen la capacidad de desarrollarse en estos intervalos de pH, lo que limita la biodiversidad resultante, como la observada para los ecosistemas naturales, más simple en su composición.

Además, la adición de CO<sub>2</sub> aumenta de forma significativa la concentración de biomasa, lo que induce un aumento de los rendimientos purificadores del nitrógeno y del fósforo.

30 Es igualmente posible, para mantener una relación media C/N en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos entre 10 y 35, utilizar residuos orgánicos que presentan una relación C/N superior a 25.

Asimismo, es posible utilizar como microorganismos para la etapa (b) especies autótrofas, que no consumen carbono inorgánico, que tienen una relación C/N superior a 10 (por ejemplo, *Staurastrum* sp.).

35 Todo o parte de estas soluciones para mantener una relación media C/N entre 10 y 35 tanto en el reactor de hidrólisis como en la unidad de cultivo de microorganismos pueden acumularse para permitir el mantenimiento de dicha relación en las proporciones deseadas y así una concentración de NH<sub>3</sub> inferior a 0,5 g/l en el metanizador.

40 De otro modo, como se ha mencionado anteriormente, para mantener una concentración de NH<sub>3</sub> inferior a 0,5 g/l en el metanizador, se prevé una etapa adicional (f) durante la cual un efluente gaseoso que contiene CO<sub>2</sub> se introduce en el reactor de metanización de la etapa (a"), con el fin de mantener un pH de aproximadamente 7,5, y más generalmente comprendido entre 7 y 8, para evitar una inhibición de la metanogénesis por acumulación de amoníaco. En efecto, el efecto principal de la producción de amonio es una alcalinización del medio que conduce a un aumento del pH que favorece entonces la forma NH<sub>3</sub> (tóxica) en detrimento de la forma NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. La inyección de CO<sub>2</sub> en el digestor, gracias a una bomba ad hoc, se somete al pH del reactor de metanización, de manera que se mantiene el pH de aproximadamente 7,5. Debe observarse que este efecto «natural» de producción de la alcalinidad evita recurrir a productos químicos alcalinos tales como sosa o bicarbonato potásico que aumentan los costes de los dispositivos de descontaminación.

45 Además, es posible, ya que el pH en la salida de la etapa a' es naturalmente alcalino, de acuerdo con una etapa adicional (g), filtrar el biogas resultante de la etapa (a") en una columna de intercambio en la cual el biogas se inyecta por la parte inferior. Después de la subida de las burbujas, el CO<sub>2</sub> se disuelve y pasa en forma de bicarbonato, después de que el metano de baja solubilidad se recupera en la superficie del reactor antes de la etapa (b), de manera que se aprovecha la alcalinidad inducida por el amonio para disolver el CO<sub>2</sub> y recuperar el metano purificado. La consecuencia es igualmente limitar la basificación del medio en el reactor de metanización y, por lo tanto, reducir la toxicidad del amonio. El biogas purificado durante esta etapa intermedia (f) contiene aún el CO<sub>2</sub> y, por lo tanto, se inyecta ventajosamente en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos para que se fije completamente.

55 Es igualmente posible, de acuerdo con el procedimiento de la invención, inyectar una fracción del efluente líquido que sale de la etapa (a') directamente en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos. Dicha inyección

se desarrolla preferiblemente durante la noche para no entrar en concurrencia con la fotosíntesis y asegurar la producción de la biomasa de microalgas y está comprendida durante la fase nocturna.

Ventajosamente, se utiliza en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos especies acidófilas o basófilas para limitar las contaminaciones en dicha unidad.

- 5 Ventajosamente, se almacena provisionalmente el biogas recuperado al salir de la etapa (a") en un depósito tampón antes de introducirlo en la unidad de cultivo de microorganismos. La utilización de tal depósito permite modular fácilmente el aporte de biogas en la cuba de cultivo de microorganismos en función de las necesidades y almacenar el biogas durante la fase nocturna.

- 10 El procedimiento de acuerdo con la invención, por otro lado, permite producir un biocarburante complementario, además del biogas purificado enriquecido en metano, por extracción y recuperación de compuestos valorizables, tales como los lípidos, de la biomasa de microorganismos, antes de inyectar el residuo, es decir, la biomasa sin compuesto valorizable, en el reactor de hidrólisis.

- 15 Preferiblemente, se concentra la biomasa proveniente de la unidad de cultivo de microorganismos, de manera que se separa el sobrenadante de dicha biomasa, antes de introducir el concentrado de biomasa en el reactor de hidrólisis, pudiendo reintroducirse la fase líquida en la unidad de cultivo de microorganismos.

La invención se refiere igualmente a un sistema acoplado de tratamiento de residuos orgánicos y de fijación de CO<sub>2</sub>, adecuado para puesta en marcha del procedimiento de acuerdo con la invención, que comprende al menos

- un reactor de hidrólisis/acidogénesis acoplado a un reactor de metanización,
- una unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos,
- 20 - un primer conducto de alimentación adecuado para dirigir un biogas que se va a purificar desde el reactor de metanización hasta la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos,
- un segundo conducto de alimentación adecuado para dirigir una fase líquida rica en nutrientes desde el reactor de hidrólisis y/o el reactor de metanización hasta la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos,
- un tercer conducto de alimentación adecuado para dirigir un efluente gaseoso exterior a dicho sistema y  
25 que contiene CO<sub>2</sub> hasta la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos y
- un conducto de evacuación y de recuperación de biogas purificado enriquecido en metano al salir de la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos.

### Descripción detallada de las figuras y de la invención

- 30 La invención se comprenderá mejor tras la lectura de la descripción que sigue y del examen de las figuras que la acompañan. Estas se presentan a título indicativo y no son en absoluto limitantes de la invención. Las figuras representan:

Figura 1: una representación esquemática de una instalación de acuerdo con un modo de realización, adecuada para la puesta en marcha del procedimiento de acuerdo con la invención;

- 35 Figura 2: una ampliación del dispositivo de purificación del biogas contenido en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos de la figura 1.

En el ejemplo representado a la figura 1, un sistema de tratamiento de residuos orgánicos y de fijación de CO<sub>2</sub> 100 para la puesta en marcha del procedimiento de acuerdo con la invención consta de tres unidades principales, respectivamente, un reactor de hidrólisis/acidogénesis 101, un reactor de metanización 102 y una unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos 103.

- 40 La unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos 103 es, por ejemplo, un estanque abierto de baja profundidad (20 a 50 cm). La agitación se asegura de manera continua por dos ruedas de paletas 117 que permiten una recirculación y una mezcla del medio de cultivo y los microorganismos.

- 45 La materia orgánica proveniente de los residuos orgánicos 104, por un lado y, de los cultivos de microorganismos y/o de residuos de microorganismos 105, después de la extracción o compuestos que no son de interés, por otro lado, se inyecta gracias a los conductos de alimentación en el reactor de hidrólisis/acidogénesis 101 dentro del cual los organismos hidrolíticos y acidógenos (*Clostridium*, *Bacillus*, *Escherichia*, *Staphylococcus*, etc.) la convierten en ácidos orgánicos y moléculas hidrolizadas.

Los elementos contenidos en la materia orgánica, tales como nitrógeno y fósforo, se mineralizan igualmente.

El gas 106 producido está compuesto esencialmente por dióxido de carbono y, en una menor medida, hidrógeno.

- 5 Una fracción 108 de la salida líquida 107 del reactor de hidrólisis/acidogénesis 101, cuyo pH es generalmente ácido (alrededor de 5 o 6), se introduce por un conducto de alimentación específico en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos 103. Esto permite aumentar la producción de biomasa, favorecer el crecimiento de la biomasa en ausencia de luz (por lo tanto, durante la noche), y permite la acumulación de lípidos en carencia nitrogenada.
- 10 El resto 109 de la salida líquida 107 se introduce en un reactor de filtración del biogas 124, antes introducirla en el reactor de metanización 102. Este reactor de filtración 124 se utiliza en el caso de que la relación C/N baja (entre 5 y 20) en la entrada del reactor de hidrólisis/acidogénesis 101 conduzca a una fuerte liberación de amonio y, por lo tanto, a pH superiores a 8. La alcalinidad de la salida líquida 107 se utiliza entonces para disolver el CO<sub>2</sub>, después que el metano, poco soluble, se evacue por el calor del metanizador.
- 15 La población metanógena (metanosarcina, metanococos, metanobacterias, etc.) del reactor anaerobio de metanización 102 convierte estos ácidos en un biogas 110 esencialmente compuesto de metano y de dióxido de carbono.
- 20 Ventajosamente, el biogas 110 transita igualmente por el reactor de filtración 124 antes de ser inyectado por un conducto de alimentación en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos 103. Se realiza así una primera filtración del biogas. En efecto, la alcalinidad inducida por el amonio permite disolver una parte del CO<sub>2</sub> contenido en el biogas que se va a purificar y recuperar el metano parcialmente purificado. Esto permite, por otro lado, limitar la basificación del medio en el reactor de metanización 102 y, por lo tanto, reducir la toxicidad del amonio.
- 25 Una parte del digerido 126, o fase líquida, resultante de los procesos de metanización puede destinarse igualmente a una valorización agronómica al salir del reactor de metanización 102. El resto 127 se introduce en la unidad de cultivo de microorganismos 103, con la fracción de efluente líquido 108 proveniente del reactor de hidrólisis 101.
- 30 Los microorganismos presentes en la unidad de cultivo 103 utilizan para sus necesidades nutritivas elementos tales como NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> resultantes del reactor de hidrólisis/acidogénesis 101 y, como fuente de carbono, el CO<sub>2</sub> presente en los gases 106, 110 recuperados al salir de los reactores de hidrólisis/acidogénesis 101 y de metanización 102 y enviados mediante los conductos de alimentación hasta la unidad de cultivo de microorganismos 103. Estos gases 106, 110 se almacenan ventajosamente en un depósito 112 antes de inyectarlos en la unidad de cultivo de microorganismos 103. Los gases 106, 110 provenientes de los reactores de hidrólisis 101 y de metanización 102 consisten en, además de metano, CO<sub>2</sub>, pero pueden contener igualmente azufre y/o otros componentes perjudiciales para una utilización directa del biogas y, por lo tanto, deben ser purificados.
- 35 Más precisamente, los gases 106, 110 resultantes de los reactores de hidrólisis/acidogénesis 101 y de metanización 102 se inyectan en el estanque 121 de la unidad de cultivo de microorganismos 103, gracias a un dispositivo de purificación 118 (véase la ampliación de la figura 2) bien conocido por el experto en la materia, que favorece a la vez la transferencia del flujo gaseoso 119 y la recuperación del gas en una campana de recuperación 120 después de pasar por la unidad de cultivo 103.
- 40 El dispositivo de purificación 118 consta de un estanque 121 equipado con varios pozos de 100 a 150 cm de profundidad, en el fondo de los cuales se encuentran los difusores. La transferencia se realiza por medio de estos pozos que generan de burbujas finas de gas, para asegurar un transferencia óptima hacia la fase líquida, y esta columna de burbujas es atravesada por el medio de cultivo. Cuando el cultivo de microorganismos llega al nivel de los difusores, se han consumido esencialmente las existencias de carbono inorgánico disuelto y, de esta manera, el pH sube a valores más elevados. El CO<sub>2</sub> contenido en el gas se transfiere así rápidamente al medio de cultivo donde se almacena principalmente en forma de bicarbonato. El CO<sub>2</sub> no fijado, así como los compuestos gaseosos, es decir, el metano y el hidrógeno, que no se transfieren hacia la fase líquida, se recuperan en la superficie del estanque 121, garantizando, en caso necesario, una ligera despresurización.
- 45 El aporte permanente de CO<sub>2</sub> permite mantener en ciertos puntos del estanque 121, durante el día, un pH regulado a un valor ácido (por debajo de 6,5) o básico (por encima de 8,5), limitando así el desarrollo de microorganismos no deseados.
- 50 En efecto, la solubilización del CO<sub>2</sub> (en forma de bicarbonato y de CO<sub>2</sub>), implica un control del pH en los puntos de inyección 122 del gas con el fin de vigilar que los microorganismos nunca estén limitados en carbono inorgánico (pH inferior a 8,5 para les especies no alcalinófilas), que el medio en el punto de inyección 122 del gas tenga una concentración baja en carbono inorgánico para una transferencia rápida del CO<sub>2</sub> hacia la fase líquida, después de que el metano permanezca principalmente en forma gaseosa teniendo este una solubilidad muy inferior, y manteniendo las condiciones ácidas locales.
- 55 Por otro lado, en el punto de inyección 122 del gas que está situado cerca de las ruedas de paletas 117, el oxígeno disuelto se desgasifica masivamente, lo que limita en gran medida su presencia en el biogas recuperado y purificado de su CO<sub>2</sub>. Así pues, en el punto de inyección 122, el valor de pH del medio es superior, el CO<sub>2</sub> se ha consumido, y la concentración de oxígeno disuelto es muy baja.



Los valores de consigna del pH en los puntos de inyección 122 se calculan de manera que se asegura que el medio de cultivo llegue al punto de inyección 122 a una capacidad de almacenamiento de CO<sub>2</sub> suficiente. De este modo, la gran mayoría del CO<sub>2</sub> es absorbida, después de que el metano atraviese la fase líquida para recuperarlo mucho más concentrado en el gas (véase, por ejemplo, el cálculo de los pH más abajo).

- 5 La operación de filtración del biogas que se va a purificar 110 por los microorganismos fitoplanctónicos de la unidad de cultivo 103 permite producir en la salida 114 un biogas purificado, de gran contenido en metano, que puede valorizarse energéticamente o almacenarse para un uso posterior.

10 Un efluente gaseoso 113, proveniente por ejemplo de una actividad antrópica, se utiliza igualmente como fuente de carbono para alimentar la unidad de cultivo de microalgas 103. Este efluente gaseoso 113 se envía por un conducto de alimentación específico desde la fuente, un depósito por ejemplo, hasta la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos.

Se utiliza el mismo dispositivo de filtración 118 para la fijación del CO<sub>2</sub> contenido en el efluente gaseoso 113, con la diferencia de que este no dispone necesariamente de la campana de recuperación de gas 120.

15 La adición del efluente gaseoso fuente de CO<sub>2</sub> 113 está condicionada por el pH mediante un sistema de regulación. El caudal de gas rico en CO<sub>2</sub> se regula en función del pH aguas abajo del punto de inyección, de manera que se mantiene ese pH a un valor de consigna. Se utiliza ventajosamente un regulador de tipo PID, RST o MLI. La separación entre la sonda de pH y el punto de inyección del gas debe corresponder a la distancia recorrida por el fluido en movimiento entre dos instantes de inyección. Por ejemplo, si la velocidad del fluido es de 30 cm/s, y el cálculo de la inyección por el sistema de regulación se realiza cada 3 segundos, la sonda se debe situar a 90 cm del punto de inyección.

20 La biomasa algal y bacteriana 115 en exceso se retira de la unidad de cultivo de microalgas 103. Para una mayor eficacia del sistema, la exportación de biomasa se gestiona de manera que se asegura un funcionamiento próximo al óptimo de productividad del sistema (que es variable según la luz incidente), permitiendo un funcionamiento turbidostático someter la concentración en función de la luz incidente y asegurar que el cultivo es siempre limitante en nutriente. La biomasa 115 en exceso se dirige hacia un decantador 116 y el decantado 105, que ha experimentado eventualmente una extracción de los compuestos valorizados, es enviado por el conducto hacia el reactor de hidrólisis/acidogénesis 101.

25 De acuerdo con las utilidades del sistema de tratamiento 100, el decantado 105 puede utilizarse como el único sustrato en el reactor de hidrólisis/acidogénesis 101, o en una mezcla para co-digerirlo con los residuos orgánicos 104. El sobrenadante 123, en caso necesario, se reutiliza en la unidad de cultivo de las microalgas 103.

Una fuente de CO<sub>2</sub> exterior 125, en forma de un efluente gaseoso, por ejemplo industrial, que contiene CO<sub>2</sub> puede introducirse en el reactor de metanización 102, con el fin de mantener un pH de alrededor de 7,5. El gas 110 al salir del reactor de metanización 102 está entonces muy cargado en carbono inorgánico.

35 El control de la calidad de la biomasa de la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos 103 permite mejorar aumentando la concentración de lípido o de almidón intracelular en función de las necesidades, es decir, en función de la relación C/N a mantener entre 10 y 35, pero igualmente si se desea optimizar el tratamiento de los residuos orgánicos en función de la naturaleza de los residuos orgánicos 104 a tratar en el reactor de hidrólisis 101. Esto permite igualmente aumentar la cantidad de biogas purificado 114 producido por unidad de masa de microorganismos.

40 Antes de la inyección en el reactor de hidrólisis 101, los microorganismos 105 pueden someterse a un pretratamiento físico y/o químico (térmico, ácido-básico, ozonización...) con el fin de mejorar la digestibilidad y aumentar así la productividad.

La biomasa 105 reciclada puede asociarse a otro sustrato, con o sin pretratamiento.

## Ejemplos

### 45 1.1 Ejemplo de cálculo de los pH a aplicar en la unidad de cultivo de microorganismos

El ejemplo se realiza para un cultivo en estanque abierto de 150 m de longitud cuya tasa de fijación instantánea de CO<sub>2</sub> es de 2 mmol/l/h. Estos son los valores medios clásicos para este tipo de unidad de cultivo de microorganismos, correspondiente por ejemplo a una biomasa de 0,4 g/l y una tasa de crecimiento instantánea de 2,3 día<sup>-1</sup>.

50 Esto induce aumentos de pH, en función de la alcalinidad del medio, del orden de 0,1 a 0,5 unidades de pH por minuto.

Para un cultivo que circula a 30 cm.s<sup>-1</sup>, los 75 metros que separan los dos difusores se alcanzan en 4,2 minutos, lo que corresponde a un aumento del pH de 0,4 a 2,1 unidades de pH. Este aumento del pH se refuerza después del paso por las ruedas de paletas que permite la desgasificación de una parte del CO<sub>2</sub>.

Falta entonces fijar la consigna del pH en el punto de inyección del gas a un valor entre 5 y 6,5. Para un bucle de control lanzado cada 3 segundos, hay que poner la sonda de pH a 90 cm aguas abajo del punto de inyección.

### 1.2 Ejemplo de dimensionado

5 Como las tasas de dilución máximas respectivas del procedimiento de digestión anaerobia y del cultivo fotótrofo son del mismo orden de magnitud, la relación de los volúmenes entre el estanque donde se cultivan los microorganismos y el metanizador corresponderá al factor de concentración de los microorganismos después de la extracción. Por ejemplo, si los microorganismos tienen que concentrarse en un factor de 100, el caudal asociado a tratar será 100 veces más bajo, y el volumen del metanizador será por lo tanto 100 veces más bajo. Así se puede imaginar pasar de 0,5 g/l de materia seca en el estanque a 50 g/l en el metanizador con un caudal 100 veces más bajo. El valor de 50 g/l en la entrada del metanizador corresponde a un valor de 25 g/l de carbono, es decir, de 1 a 4 g/l de nitrógeno que es, por lo tanto, un máximo que no se debe sobrepasar.

Para una profundidad de estanque de 10 cm, esto corresponde a un digestor de 1000 m<sup>3</sup> por hectárea de estanque.

15 El estanque tendrá entonces una capacidad de tratamiento de 0,5 g/l/día, es decir de 0,25 gC/l/día, o aún 0,9 gCO<sub>2</sub>/l/día, es decir, 900 kg de CO<sub>2</sub> por hectárea. La producción asociada a los 500 kg de materia seca por hectárea y por día es de 600 kg de DCO por hectárea, que corresponden a 220 m<sup>3</sup> de metano (y 95 m<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub>, es decir, 185 kilos de CO<sub>2</sub>). Esto corresponde a un contenido energético de 1800 kWh. Por otro lado, el flujo de nitrógeno por día y por hectárea es de 10 a 40 kilogramos, que será necesario aportar por los abonos sin el reciclaje de nitrógeno por digestión anaerobia. El aporte de la etapa de la metanización será del orden de 370 kilogramos de carbono inorgánico.

### 20 1.3 Ejemplo de puesta en marcha del procedimiento

En base a los cálculos precedentes, para un estanque de una hectárea:

- naturaleza de los residuos orgánicos y cantidades: tipo vinazas; 1 m<sup>3</sup>/día a 50kg/m<sup>3</sup> (C/N=200).
- cantidades de efluente líquido 108 y 127 introducidas en la unidad de cultivo de microorganismos 103: respectivamente 0 m<sup>3</sup>/día y 9 m<sup>3</sup>/día
- 25 - naturaleza de los microorganismos utilizados: las microalgas acidófilas tipo chlamydomonas acidophila mantienen un pH 4 (C/N=6)
  - cantidad 105 de microorganismos retenida en la unidad de cultivo e introducida en el reactor de hidrólisis 101: 500 kg/día, es decir, 9 m<sup>3</sup> y 104 1 m<sup>3</sup>/día, es decir, 50 kg, siendo la relación media C/N entonces de 25.
  - pH en los puntos de inyección 122 en el estanque 118: pH 4
- 30 - cantidad de efluente industrial que contiene CO<sub>2</sub> 113 introducido en la unidad de cultivo de microorganismos 103: 715 kg de CO<sub>2</sub> fijado, que corresponden a una inyección (para una eficacia de transferencia del 20%) de 3,5 toneladas de CO<sub>2</sub> industrial.
  - cantidad de efluente industrial que contiene CO<sub>2</sub> 125 introducida en el reactor de metanización 102: 0 ya que C/N se mantiene entre 10 y 35 en la unidad de cultivo de microalgas.
- 35 - cantidad de biogas purificado enriquecido en metano recuperado al salir de la unidad de cultivo de microorganismos: 220 m<sup>3</sup>/día
  - tiempo de funcionamiento del sistema: Limpieza del sistema cada 6 meses.

**Bibliografía**

- Angelidaki I, Ahring BK. Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 1993;38:560-564.
- 5 Angelidaki I, Ellegaard L, Ahring BK. Applications of the anaerobic digestion process. En: Ahring BK, editor. *Biomethanation*, Springer Berlin / Heidelberg, 2003. pág. 1-33.
- Braun R, Huber P, Meyrath J. Ammonia toxicity in liquid piggery manure digestion. *Biotechnol. Lett.* 1981;3:159-164.
- Chen PH. Factors influencing méthane fermentation of micro-algae. PhD thesis, University of California, Berkeley, CA, USA, 1987.
- 10 Chen Y, Cheng JJ, Creamer KS. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresour. Technol.* 2008;99:4044-4064.
- Chisti Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnol. Adv.* 2007;25: 294-306.
- Cime DG, Paloumet X, Björnsson L, Alves MM, Mattiasson B. Anaerobic digestion of lipid-rich waste--Effects of lipid concentration. *Renew. Energy.* 2007 ;32 :965-975.
- 15 Doucha J, Straka F, Livansky K. Utilization of flue gas for cultivation of microalgae (*Chlorella sp.*) in an outdoor open thin-layer photobioreactor. *J. Appl. Phycol.* 2005;17:403-412.
- Golueke CG, Oswald WJ, Gotaas HB. Anaerobic digestion of algae. *Appl. Microbiol.* 1957;5:47-55.
- Grobbelaar JU. Algal Nutrition. En Richmond A, editor. *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*, Wiley-Blackwell, 1984.
- 20 Heubeck S, Craggs RJ, Shilton A. Influence of CO<sub>2</sub> scrubbing from biogas on the treatment performance of a high rate algal pond. *Water Sci. Technol.* 2007;55(11): 193-200.
- Koster IW, Lettinga G. The influence of ammonium-nitrogen on the specific activity of pelletized methanogenic sludge. *Agric. Wastes.* 1984;9:205-216.
- Koster IW, Lettinga G. Anaerobic digestion at extreme ammonia concentrations. *Biol. Wastes* 1988;25:51-59.
- 25 Maeda K, Owada M, Kimura N, Omata K, Karube I. CO<sub>2</sub> fixation from the flue gas on coal-fired thermal power plant by microalgae. *Energy Conv. Manag.* 1995.36:717-720.
- Mandeno G, Craggs R, Tanner C, Suskias J, Webster-Brown J. Potential biogas scrubbing using a high rate pond. *Water Sci. Technol.* 2005;51(12):253-256.
- Munoz R, Jacinto M, Guieysse B, Mattiasson B. Combined carbon and nitrogen removal from acetonitrile using algal-bacterial bioreactors. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2005;67:699-707.
- 30 Olaizola M. Commercial development of microalgal biotechnology: from the test tube to the marketplace. *Biomol. Eng.* 2003;20:459-466.
- Omil F, Mendez R, Lema JM. Anaerobic treatment of saline wastewaters under high sulfide and ammonia content. *Bioresour. Technol.* 1995;54:269-278.
- Oswald WJ, Golueke CG. Biological transformation of solar energy. *Adv. Appl. Microbiol.* 1960;2:223-262.
- 35 Samson R, LeDuy A. Biogas production from anaerobic digestion of *Spirulina maxima* algal biomass. *Biotechnol. Bioeng.* 1982;24:1919-1924.
- Samson R, LeDuy A. Detailed study of anaerobic digestion of *Spirulina maxima* algae biomass. *Biotechnol. Bioeng.* 1986;28:1014-1023.
- 40 Sanchez EP, Travieso L. Anaerobic digestion of *Chlorella vulgaris* for energy production." *Resour, Conserv. Recycl.* 1993;9:127-132.
- Travieso L, Sanchez EP, Benitez F, Conde JL. *Arthospira sp.* intensive cultures for food and biogas purification. *Biotechnol. Lett.* 1993;15:1091-1094.
- Yen HW, Brune DE. Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce méthane. *Bioresour. Technol.* 2007;98:130-134.

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos por acoplamiento de un sistema de digestión anaerobia y de un sistema de producción de microorganismos fitoplanctónicos, que comprende las siguientes etapas:
- 5 (a') tratar los microorganismos (105) resultantes de un cultivo fitoplanctónico y los residuos orgánicos (104) en un reactor de hidrólisis (101);
- (a'') tratar al menos una parte de un efluente líquido (109) que sale de la etapa (a') en un reactor de metanización (102);
- 10 (b) tratar una fase líquida (127) y el biogas que se va a purificar (110) que sale de la etapa (a'') en una unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos (103);
- (c) inyectar un efluente gaseoso (113) que contiene CO<sub>2</sub> en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos;
- (d) mantener una concentración de NH<sub>3</sub> inferior a 0,5 g/l en el reactor de metanización;
- 15 (e) recuperar un biogas enriquecido en metano al salir de la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos.
2. Procedimiento de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos según la reivindicación 1, en el que, para mantener una concentración de NH<sub>3</sub> inferior a 0,5 g/l en el reactor de metanización se procede según la siguiente etapa adicional:
- (f) inyectar un efluente gaseoso (125) que contiene CO<sub>2</sub> en el reactor de metanización.
- 20 3. Procedimiento de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos según la reivindicación 1, en el que, para mantener una concentración de NH<sub>3</sub> inferior a 0,5 g/l en el reactor de metanización, se mantiene una relación media carbono/nitrógeno (C/N) en el reactor de hidrólisis entre 10 y 35.
4. Procedimiento de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos según la reivindicación 3, en el que, para mantener una relación media C/N en el reactor de hidrólisis entre 10 y 35, se modula la fracción de residuos orgánicos introducida en dicho reactor de hidrólisis en la etapa (a').
- 25 5. Procedimiento de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos según una de las reivindicaciones 3 a 4, en el que, para mantener una relación media C/N en el reactor de hidrólisis entre 10 y 35, se utilizan en dicho reactor de hidrólisis residuos orgánicos que presentan una relación C/N superior a 25.
6. Procedimiento de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos según la reivindicación 1, en el que, para mantener una concentración de NH<sub>3</sub> inferior a 0,5 g/l en el reactor de metanización, se mantiene una relación media carbono/nitrógeno (C/N) en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos entre 10 y 35.
- 30 7. Procedimiento de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos según la reivindicación 6, en el que, para mantener una relación media C/N en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos entre 10 y 35, se utilizan como microorganismos para la etapa (b) especies autótrofas que tienen una relación C/N superior a 10.
- 35 8. Procedimiento de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos según una de las reivindicaciones 6 a 7, en el que, para mantener una relación media C/N en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos entre 10 y 35, se modula la cantidad de efluente líquido que sale de la etapa (a'') introducida en la etapa (b), de manera que se induce una limitación nutritiva apropiada para modificar la composición de los microorganismos de la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos para favorecer la acumulación de lípidos y glúcidos en dichos
- 40 microorganismos.
9. Procedimiento de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos según una de las reivindicaciones 6 a 8, en el que, para mantener una relación media C/N en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos entre 10 y 35, se modula el caudal entrante del biogas que sale de la etapa (a'') en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos, de manera que se controla el pH de dicha unidad de cultivo y se crean las
- 45 condiciones apropiadas para aumentar la relación C/N.
10. Procedimiento de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos según una de las reivindicaciones 6 a 9, en el que, para mantener una relación media C/N en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos entre 10 y 35, se modula el caudal entrante de efluente gaseoso que contiene CO<sub>2</sub> de la etapa (c) en la unidad de cultivo de microorganismos, de manera que se mantiene un flujo de carbono al menos 10 veces superior al flujo de
- 50 nitrógeno.
11. Procedimiento de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos según la reivindicación 10, en el que se

impone una tasa de dilución del cultivo de microorganismos fitoplanctónicos inferior a la tasa de crecimiento máxima de dichos microorganismos, de manera que se induce una limitación por un elemento nutritivo.

5 12. Procedimiento de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos según una de las reivindicaciones 1 a 11, en el que se utilizan en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos especies acidófilas o basófilas para limitar las contaminaciones en dicha unidad.

13. Procedimiento de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos según una de las reivindicaciones 1 a 12, que comprende la siguiente etapa adicional:

(g) filtrar el biogas enriquecido en metano resultante de la etapa (a") en una columna de intercambio (124) antes de la etapa (b).

10 14. Procedimiento de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos según una de las reivindicaciones 1 a 13, que comprende la siguiente etapa adicional:

(h) inyectar una fracción (108) del efluente líquido que sale de la etapa (a') directamente en la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos.

15 15. Sistema acoplado de fijación de CO<sub>2</sub> y de tratamiento de residuos orgánicos (100) que comprende un reactor de hidrólisis/acidogénesis (101) acoplado a un reactor de metanización (102), y una unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos (103), un primer conducto de alimentación adecuado para dirigir un biogas (110) que se va a purificar desde el reactor de metanización hasta la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos, un segundo conducto de alimentación adecuado para dirigir una fase líquida (108, 127) rica en nutrientes desde el reactor de hidrólisis y/o el reactor de metanización hasta la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos, un tercer conducto de alimentación adecuado para dirigir un efluente gaseoso (113) exterior al sistema y que contiene CO<sub>2</sub> hasta la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos y un conducto de evacuación y de recuperación de biogas (114) purificado enriquecido en metano al salir de la unidad de cultivo de microorganismos fitoplanctónicos.

20

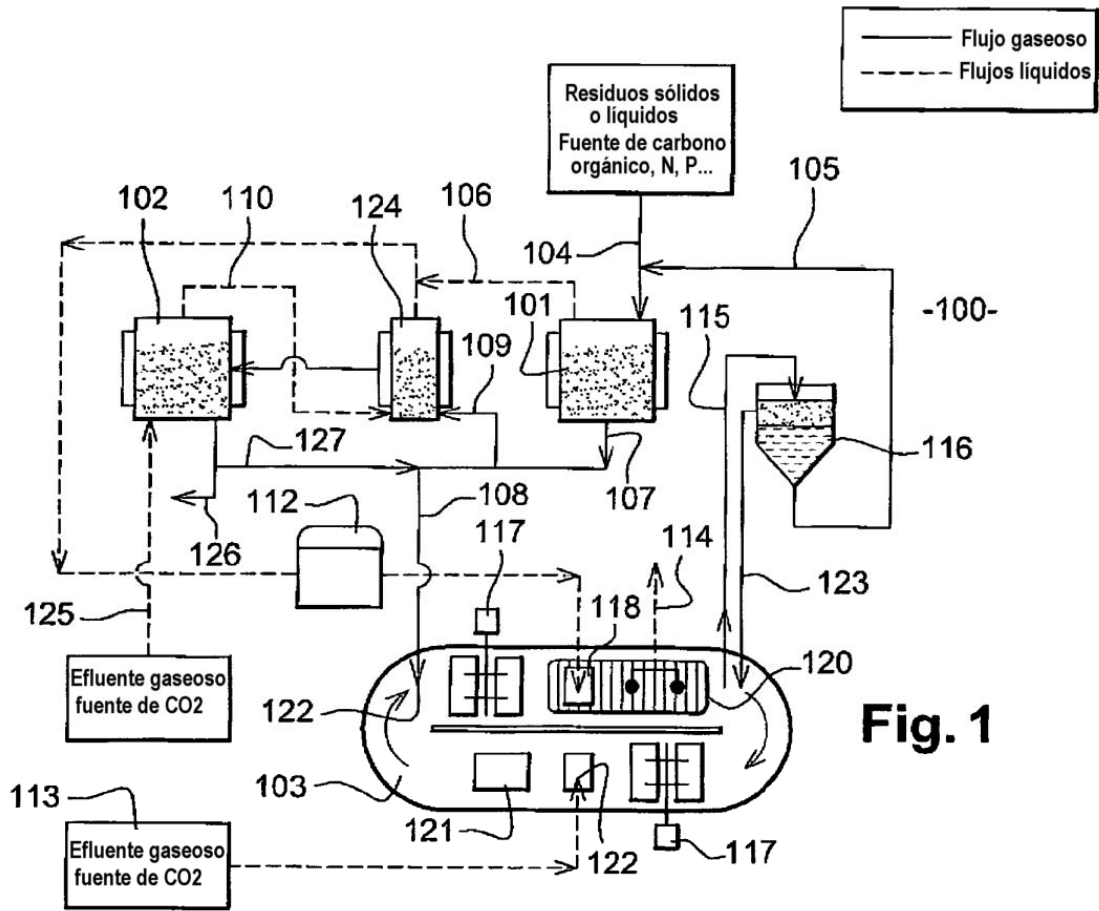


Fig. 1

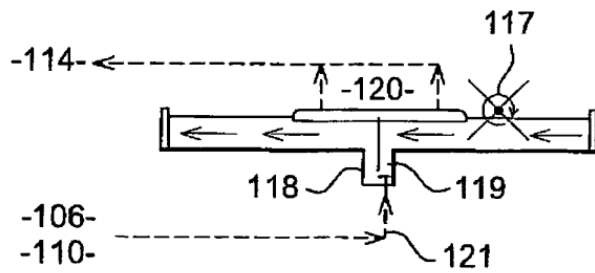


Fig. 2