

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 625 174**

51 Int. Cl.:

B01D 53/14 (2006.01)

B01D 53/18 (2006.01)

B01D 53/78 (2006.01)

C10L 3/10 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.02.2015 E 15382087 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.03.2017 EP 3061515**

54 Título: **Dispositivo y método para retirada simultánea de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono del biogás**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
18.07.2017

73 Titular/es:

**FCC AQUALIA, S.A. (100.0%)
Avenida Camino de Santiago 40. Edificio 3- 4ª
planta
28050 MADRID, ES**

72 Inventor/es:

**DE GODOS CRESPO, IGNACIO;
CANO HERRANZ, RAÚL;
SANTIAGO COSTA, JOSÉ RAMÓN;
LARA CORONA, ENRIQUE y
LLAMAS MOYA, BERNARDO**

74 Agente/Representante:

Ungría López, Javier

ES 2 625 174 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

Dispositivo y método para retirada simultánea de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono del biogás

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a limpiar impurezas, principalmente sulfuro de hidrógeno, y a mejorar el biogás, principalmente retirando dióxido de carbono, que viene de un proceso industrial, por ejemplo y preferentemente el biogás producido en plantas de tratamiento de aguas residuales durante la digestión anaeróbica de lodos de depuradora y biosólidos, para usarse como combustible.

Antecedentes de la invención

Los digestores anaerobios ayudan a estabilizar los lodos de depuradora y los biosólidos en plantas de tratamiento de aguas residuales antes de que se usen bien en tierras agrícolas o se sequen, se incineren o se depositen en vertederos.

El producto de la digestión anaerobia, que se llama comúnmente biogás, es una mezcla principalmente compuesta por metano y dióxido de carbono, y habitualmente sustancias no deseadas tales como agua, sulfuro de hidrógeno, amoníaco, oxígeno, siloxanos y particulados.

La pre-limpieza de sulfuro de hidrógeno del biogás es necesaria para usarse como combustible para las unidades combinadas de calor y potencia (CHP, por sus siglas en inglés) o calderas y se requiere limpieza y mejora adicionales para su uso como combustible en vehículos o inyección en la red de distribución de gas.

Mejora del biogás se refiere a la retirada de dióxido de carbono del biogás. El contenido energético del biogás es directamente proporcional a la concentración de metano, de tal manera que el contenido energético del gas aumenta retirando la cantidad de dióxido de carbono en el proceso de mejora, volviéndose comparable al gas natural.

Hay cuatro técnicas para mejorar el biogás para la calidad de combustible para vehículos, entre otros: Absorción por depuración con agua (que se considera ser la técnica anterior más cercana), PSA (Absorción por oscilación de presión, por sus siglas en inglés), depuración física orgánica y absorción con reacción química o con separación por membranas.

Limpieza del biogás se refiere a la retirada de las sustancias no deseadas citadas del biogás, aparte del dióxido de carbono. Las sustancias no deseadas pueden retirarse antes, durante o después de la fase de mejora.

Pre-limpieza debe entenderse como la retirada de la sustancia no deseada, principalmente sulfuro de hidrógeno, antes de la etapa de para prevenir la corrosión y el desgaste metálico del propio equipo de mejora. Además, el sulfuro de hidrógeno puede provocar problemas durante la retirada del dióxido de carbono e implica problemas de malos olores.

Existen muchos métodos químicos, físicos y biológicos actualmente disponibles para la retirada de sulfuro de hidrógeno del biogás. Los procesos químicos basados en seco se han aplicado tradicionalmente para aplicaciones de biogás, por ejemplo la esponja férrica y los sistemas de carbón activo impregnados con hidróxido de potasio son los más deseables. Estos procesos son sencillos y eficaces, pero también implican elevados costes de operación para gestionar y eliminar los materiales. Otros inconvenientes significativos incluyen una corriente continuamente producida de residuos sólidos y una preocupación medioambiental creciente acerca de los métodos de eliminación apropiados.

La adición de aire por inyección (2-6 %) al lecho digestor o al espacio de cabeza, o los compuestos de hierro introducidos directamente al digestor, han mostrado resultados prometedores como el método de retirada parcial de H₂S. Sin embargo, estos métodos muestran rendimientos de funcionamiento limitados e inconsistentes. Adicionalmente, el oxígeno está limitado para el biogás como combustible de vehículos (<1 % v/v de acuerdo con la normativa sueca) y debe evitarse. Los procesos de membranas y basados en líquidos requieren significativamente mayores costes de capital, de energía y de medios y no parecen tan económicamente competitivos como la retirada selectiva del H₂S. Están disponibles procesos biológicos comerciales para la retirada de H₂S con costes de funcionamiento, químicos y de energía reducidos, pero requieren mayores los costes de capital que los procesos basados en seco. Por lo tanto, existe una necesidad de bajo coste de capital y de funcionamiento para la retirada de H₂S para dirigirse a la mejora del biogás dentro de las tecnologías actualmente disponibles.

- Proceso de mejora en sí mismo: En tecnologías de mejora donde el dióxido de carbono se separa del biogás, algunos de los distintos compuestos no deseados también se separan durante el proceso de mejora en sí mismo.
- Etapa de pulido final: El biogás debe secarse y purificarse del sulfuro de hidrógeno y los siloxanos para obtener la calidad de combustible para vehículos, por ejemplo < 20 mg/Nm³ de azufre total y punto de rocío a -10 °C a presión de 20 MPa (200 bar), de acuerdo con la normativa ISO 6327. El secado y la purificación pueden

obtenerse mediante enfriamiento y absorción usando SiO₂, carbón activo o tamices moleculares como en la patente US 8747522. Estos materiales se regeneran habitualmente calentando o por una disminución de presión. Otras tecnologías de secado serían la absorción en soluciones de glicol o el uso de sales higroscópicas.

- 5 La limpieza y la mejora llevan implícitos un considerable coste en el proceso de producción de biometano. Por ello es importante tener un proceso de limpieza y mejora optimizados en términos de consumo energético, de agua y reactivos químicos y alta pureza de metano como un producto final.

10 **Tecnologías de mejora del biogás a gran escala**

10 Cuando el biogás se usa como combustible para vehículos o inyección en red debe mejorarse, limpiarse, secarse y comprimirse. Se ha desarrollado un número de tecnologías para este fin: los métodos de absorción y desorción (PSA):

15 1. Absorción

En una planta de mejora de biogás que usa la técnica de absorción el biogás sin tratar se encuentra con una corriente fluida de líquido en una columna que está cargada con un empaquetado de plástico (para aumentar el área de contacto entre el gas y la fase líquida). El principio detrás de la técnica de absorción es que el dióxido de carbono es más soluble que el metano, de tal manera que el líquido que sale de la columna tendrá por lo tanto una concentración aumentada de dióxido de carbono, mientras que el gas que abandona la columna tendrá una concentración aumentada de metano. Tres ejemplos de la tecnología de absorción que usan diferentes tipos de absorbentes son depuración con agua, depuración física orgánica y depuración química. La depuración con agua es la técnica de mejora más común y las plantas están disponibles en el mercado de varios proveedores en un amplio intervalo de capacidades.

20 1.1. Depuración con agua

Se considera el estado de la técnica más cercano a la presente patente.

30 1.1.1. Antecedentes Teóricos

Para entender la presente patente es necesario explicar los principios básicos del proceso. La depuración con agua se usa para retirar el dióxido de carbono. También puede usarse para la retirada de sulfuro de hidrógeno, pero solo si H₂S < 500 mg/m³ debido a la corrosión del equipo y los problemas de obstrucción del envase. La retirada de amoníaco también se da ya que estos gases son más solubles en agua que el metano. El proceso de absorción es puramente físico.

La velocidad de transferencia de masa de gas, por ejemplo desde el dióxido de carbono a la fase líquida (agua) se somete a los términos descritos en la fórmula (1):

$$\frac{dC}{dt} = K_{LA} \times \text{fuerza impulsora} = K_{LA}(C_{sat} - C) \quad (1)$$

donde:

45 C= Concentración de gas disuelto (es decir dióxido de carbono) en líquido (masa o moles/volumen).

C_{sat}= Gas disuelto (es decir dióxido de carbono) en saturación en líquido (masa o moles/volumen).

K_{LA}= Coeficiente de transferencia de masa global (es decir dióxido de carbono) a la temperatura de absorción (1/tiempo).

50 (C_{sat}-C) = fuerza impulsora del proceso. C_{sat}, la concentración en saturación del gas, se calcula usando la ley de Henry y varía en función de la temperatura (efecto en K_H) y de P_{gas}, la presión parcial del gas, de acuerdo con (2):

$$C_{sat} = K_H \times P_{gas} \quad (2)$$

55 La constante de ley de Henry a 25 °C (K_H) para el sulfuro hidrógeno es 1,0x10⁻¹ M/atm, para el dióxido de carbono 3,4x10⁻² M/atm, y para el metano 1,3x10⁻³ M/atm (Stumm & Morgan 1996), resultando en una solubilidad para el sulfuro de hidrógeno que es aproximadamente 3 veces mayor que para el dióxido de carbono, y para el dióxido de carbono que es aproximadamente 26 veces mayor que para el metano. Si el biogás sin tratar consiste en un 50 % de metano y de dióxido de carbono respectivamente, las presiones parciales de los gases serían iguales en el fondo de la columna de absorción. Adicionalmente, si el 100 % del dióxido de carbono está disuelto en el agua, al menos un 4 % del metano también se disolverá en el agua en un sistema ideal.

De las fórmulas (1) y (2) puede concluirse que la solubilización de un gas en agua de depuración aumenta con las siguientes estrategias:

- *Estrategia 1:* Aumentando K_{LA} , eficiencia del contacto gas-líquido. En la práctica mediante el número de platos (altura de columna) y optimizando el tipo de envase.
- *Estrategia 2:* Aumentando la fuerza impulsora, $(C_{sat}-C)$, que puede realizarse por:
 - *Estrategia 2.1.* Aumentando C_{sat} cuando se reduce la temperatura (efecto en K_H) y aumentando P_{gas} .
 - *Estrategia 2.2.* Disminuyendo C que es posible usando un gran volumen de agua para absorción, o dicho de otra forma, aumentado la relación líquido influente a gas (L_i/G).

Los sistemas actuales de depuración con agua usan la menor relación influente L_i/G posible para minimizar el consumo de agua, como en la patente WO 2008/116878, con valores de L_i/G de 0,1 a 0,3 m³ de agua a 20 °C/Nm³ de biogás por hora. El mínimo L_i/G se expresa como L_{min}/G , donde L_{min} es el equivalente de caudal de agua para disolver el dióxido de carbono hasta alcanzar la saturación en equilibrio y $C=C_{sat}$ que resulta a la salida de la columna de absorción. En estos sistemas la C promedio en la columna de absorción es alta, y es la razón por que la estrategia descrita como 2.2 no se usa. En su lugar se usan las estrategias 1 y/o 2.1.

1.1.2. Descripción del proceso

El biogás se pone en contacto con el agua de lavado a alta presión; los componentes del biogás, principalmente el CO₂, se absorben en el agua hasta que se alcanza el equilibrio de saturación. Después, la absorción del gas termina ya que se ha alcanzado el equilibrio L_i/G .

El biogás saliente del digestor está a una presión justo por encima de la atmosférica y el agua está saturada. La humedad y las partículas se retiran en un separador interno, después el gas se comprime hasta 700-1400 kPa (7-14 bares) la temperatura de toma del biogás puede ser de 15 a 38 °C (por ejemplo 30 °C) y la temperatura de salida después de la compresión puede ser de 70 °C para una descarga de 900 kPa (9 bares). El biogás bruto entró en el recipiente de absorción en el fondo de donde el líquido se suministra a la parte superior y de esta manera el proceso se hace funcionar a contracorriente. El recipiente de absorción se proporciona con un empaquetado aleatorio para obtener una transferencia de masa máxima. En este tipo de recipiente, el dióxido de carbono se absorbe por el agua y el biogás que deja el recipiente se enriquece con metano. El gas saliente del recipiente de absorción tiene una concentración de metano del 70 al 98 % en volumen, dependiendo de la composición inicial del biogás y de la calidad requerida. Antes de que el gas mejorado se transporte al tanque de almacenamiento, pasa una etapa de pulido final, como se describe anteriormente para retirar el agua para controlar el punto de rocío por debajo de -80 °C y pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno, como en el documento WO 2009/116868.

Finalmente, el gas mejorado se odoriza para ser capaces de detectar fugas de gas, que puedan ocurrir.

Como el metano es parcialmente soluble en agua, el agua del recipiente de absorción se dirige a un recipiente intermitente para minimizar las pérdidas de metano. El agua se despresuriza en el recipiente intermitente a 200 kPa (2 bares) y el gas sale. El gas disuelto, que contiene algo de metano pero principalmente dióxido de carbono, se libera y se transfiere de nuevo a la entrada de gas bruto.

45 - Depuración con agua con regeneración

El agua que tiene el dióxido de carbono y/o el sulfuro de hidrógeno que está contenida en y abandona el recipiente de volatilización puede regenerarse y recircularse de vuelta a la columna de absorción. La regeneración se lleva a cabo mediante inyección de aire en un recipiente de desorción, que es similar a las columnas de absorción empaquetadas para obtener una gran eficiencia de transferencia de masa. El agua regenerada se calienta principalmente por medio de la entrada de energía de la bomba de reciclado: por lo tanto, debe enfriarse antes de que se devuelva a los recipientes de absorción. Se obtiene alta eficiencia a menos de 7 °C mediante el proceso de enfriado del agua. Una temperatura menor del proceso da como resultado costes reducidos del sistema de bombeo, por lo que el consumo de energía total de una planta con enfriamiento de agua es menor.

El aire de volatilización contiene gases CO₂ y H₂S y necesitan tratarse usando un proceso de tratamiento de olores para impedir las molestias antes de descargar aire a la atmósfera. Además, los gases contienen una concentración de metano del 1-2 %. Es importante minimizar estas pérdidas para tener una planta de mejora económicamente viable. También es importante minimizar el deslizamiento de metano ya que el metano es un fuerte gas de efecto invernadero. El metano puede estar presente en el gas de escape que deja una columna de PSA o una depuración con agua sin recirculación de agua. De esta manera, la liberación de metano a la atmósfera debe minimizarse tratando el gas de escape y las corrientes de agua que salen de la planta incluso aunque el metano no pueda usarse.

El gas de escape de una planta de mejora es extremadamente difícil de tratar porque no contiene una concentración lo suficientemente grande de metano para mantener una llama sin la adición de gas natural o biogás (consumo de

energía). Una opción para limitar la salida de metano es mezclar el gas de escape con el aire que se usa para la combustión. Alternativamente el metano puede oxidarse por oxidación térmica o catalítica si el contenido de metano es superior al 3 %.

5 El tratamiento del gas de escape que contiene incluso menos metano es aún más complicado. Debido a que no se proporciona energía suficiente durante la combustión de este gas y del biogás bruto, el biometano debe añadirse para alcanzar una oxidación estable, reduciendo por lo tanto el balance energético y la economía globales del sistema. En la opción de regeneración, se usa agua del grifo. A pesar de esto, pueden ocurrir atascos de los empaquetados. Esto es debido a las bacterias y otros materiales biológicos que entran a la planta a través del aire
10 que se añade a la columna de desorción para sacar el dióxido de carbono del agua. Esto significa que los empaquetados deben retirarse y lavarse a mano.

Además, cuando el biogás tiene un contenido de sulfuro de hidrógeno, el agua reciclada se contaminará rápidamente con azufre elemental que provoca problemas de funcionamiento.

15 Por lo tanto, la regeneración de agua disminuye el uso de agua pero aumenta el consumo energético y de mantenimiento.

20 Varias patentes se dirigen a esta tecnología: documento US 2010/0107872 A1, documento WO 2009/116878 A1, documento US 2008/01344754 A1 y documento WO 2012/128648 A1.

- Depuración con agua sin regeneración

25 En el otro tipo de absorción, el agua no se regenera en una columna de desorción. En vez de esto, el agua se vierte desde la planta después del tanque de lavado. Esto es más económico que regenerar el agua si puede usarse un agua sin coste, como el agua residual tratada. Ya que el agua no se regenera ahí, no hay problemas de precipitación de azufre elemental en los sistemas de envasado del recipiente de separación. El metano que se disuelve en agua y no se separa en el tanque rápido abandona la planta con el efluente líquido, por lo que la liberación de metano y los olores de sulfuro pueden ser un problema en la descarga final de agua.

30 Los atascos o el crecimiento de microorganismos en la columna de absorción es un problema que existe en los sistemas de lavado sin regeneración de agua, cuando se usa agua residual tratada como la fuente de agua. En estos casos hay algunos materiales biológicos que se quedan atascados en los empaquetamientos o provocan el crecimiento.

35 1.2. Depuración química

Los intercambiadores químicos usan soluciones de aminas. El dióxido de carbono no solo se absorbe en el líquido, sino que reacciona químicamente con las aminas en el líquido. Debido a que la absorción química es altamente selectiva, las pérdidas de metano pueden ser tan bajas como <0,1 % y, de esta manera, no es necesario un tratamiento adicional del gas de escape para reducir las emisiones de metano (documento US 8500864 B2, 2013; y documento WO2011/136733 A1).

45 La aplicación de esta tecnología es ventajosa si se desea la alta recuperación de metano. Un inconveniente es la alta demanda de calor durante la etapa de regeneración a 160 °C. Además, la capacidad de planta proyectada es media a grande. No es factible para pequeñas plantas.

1.3. Depuración física orgánica

50 La depuración física orgánica es muy similar al lavado con agua, con la importante diferencia de que el dióxido de carbono se absorbe en un disolvente orgánico tal como el polietilenglicol. El dióxido de carbono es más soluble en polietilenglicol que en agua. Por lo tanto, hay menos demanda de recirculación del disolvente y los costes de bombeo son menores. Sin embargo, la solución de polietilenglicol debe regenerarse mediante calentamiento y/o despresurización y de esta manera los costes energéticos son mayores que en otras tecnologías. El sulfuro de hidrógeno, el agua, el oxígeno y el nitrógeno pueden retirarse junto con el dióxido de carbono. Sin embargo, se requiere más a menudo una etapa previa de limpieza de H₂S.

2. Absorción por inversión de presión (PSA)

60 Con esta técnica, el dióxido de carbono se separa del biogás por absorción en una superficie en alta presión. El material absorbente, normalmente carbón activado o zeolita, se regenera mediante una disminución secuencial de presión antes de que la columna se cargue de nuevo, de ahí el nombre de la técnica. Una planta de mejora, que usa esta técnica, tiene cuatro, seis o nueve recipientes funcionando en paralelo. Cuando el material absorbente en un recipiente se satura de biogás, el flujo de gas bruto se cambia a otro recipiente donde el material de absorción se haya regenerado (método de cambio de presión). Durante la regeneración la presión se disminuye en varias etapas.
65 El gas se desorbe durante la primera y finalmente la segunda caída de presión puede devolverse a la entrada del

gas bruto, ya que contendrá algo del metano que se absorbió junto con el dióxido de carbono. El gas desorbido en la siguiente etapa de reducción de presión bien pasa a la siguiente columna, o bien se libera a la atmósfera si está casi completamente libre de metano.

- 5 Si el sulfuro de hidrógeno está presente el gas bruto, se adsorberá irreversiblemente por el material adsorbente. Además, el agua presente en el gas bruto puede destruir la estructura del material. Por lo tanto el sulfuro de hidrógeno y el agua necesitan retirarse antes de entrar en la columna de PSA.

Varias patentes se han dirigido a esta tecnología:

- 10
- Adsorción con zeolitas (documento WO09/5876 o documento WO2008/072215)
 - PSA con regeneración al vacío (documento US 5797979).

Los principales inconvenientes de esta tecnología son:

- 15
- La saturación irreversible del medio poroso con un contaminante tal como el sulfuro de hidrógeno, previniendo la regeneración del mismo.
 - La eliminación de los medios al final de la vida útil
 - El metano puede estar presente en el gas de escape que sale de la columna de PSA. El metano enviado a la atmósfera es mayor que aquellos producidos por la depuración con agua.
- 20
- Diseño complejo con 4 a 9 recipientes paralelos, múltiples compresores, tuberías y válvulas.
 - Altos costes de funcionamiento, ya que es un método intensivo de energía para la absorción y regeneración.

Problemas a superarse por la presente invención

25 La depuración con agua es la técnica de mejora más común y las plantas están disponibles en el mercado de varios proveedores en un amplio intervalo de capacidades. Pero se enfrentan a un número de inconvenientes:

- 30
- Las tecnologías de mejora disponibles actuales son intensivas en energía con consumos de energía de 0,3 a 0,6 kWh/Nm³ de biogás bruto mejorado. Esto es principalmente porque son compresores de alta presión y las bombas y el agua se enfrían a 5-7 °C.
 - Requieren una limpieza previa del sulfuro para impedir la corrosión y los problemas de atascos en los empaquetados; la retirada del sulfuro es un proceso económicamente costoso.
- 35
- La concentración de oxígeno en el biometano debe minimizarse. Los recipientes de intercambio introducen estos componentes en el agua regenerada, con una liberación adicional en el biometano durante la absorción. El agua residual tratada usada en la depuración de agua sin regeneración también puede liberar oxígeno.
 - Problemas de olores por sulfuro de hidrógeno: El sulfuro de hidrógeno puede estar presente en el gas de escape que sale de la columna de intercambio en una depuración de agua con recirculación o también puede estar presente en el agua de lavado en una depuración de agua sin recirculación de agua.
- 40
- Liberación de metano. Es importante también minimizar las pérdidas de metano ya que el metano es un gas de efecto invernadero fuerte. El metano puede estar presente del 1-2 % (del metano total) en el gas de escape que deja una columna de intercambio en un depurador de agua con regeneración o en el agua de lavado en un depurador de agua sin recirculación.
- 45
- Consumo de agua. Aunque es pequeño en las plantas modernas, puede alcanzar los 0,05 m³ de agua/Nm³ de biogás tratado en un sistema de lavado con agua con regeneración y de 0,1 a 0,3 m³/Nm³ en sistemas sin regeneración. Es este último caso, se produce además contaminación con H₂S y metano.
 - Demanda de consumibles: Los agentes antiespumantes son necesarios para evitar el crecimiento biológico en el envasado del depurador.
- 50
- Atascos por crecimiento bacteriano y/o precipitación de azufre elemental debido al empaquetamiento en el sistema de depuración.
 - Son sistemas complejos, con múltiples compresores y bombas de alta presión, válvulas, sistemas de enfriamiento, tanques de presurización, empaquetado, etc... que los hacen factibles solamente para producciones en el intervalo de 60-70 Nm³/h.
- 55
- La mejora del biogás en una pequeña escala (<100 Nm³/h) es normalmente muy cara ya que debe invertirse una cantidad muy alta.

Objeto de la invención

60 El objeto de la patente es un sistema y un método para la limpieza y la mejora del biogás, de cualquier fuente industrial pero preferentemente producido en estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) para cualquier uso donde solo sea necesaria la retirada del sulfuro de hidrógeno (por ejemplo para suministrar una planta de combinación de calor y potencia (CHP) o calderas) y preferentemente para obtener biometano como un combustible de vehículos (es decir, de calidad de combustible de vehículos) o inyección en la red de gas donde se requiere una limpieza y una mejora adicionales, gracias a un nuevo dispositivo de limpieza por agua que incluye medios de regeneración, superando los problemas mencionados en sistemas actualmente disponibles.

65

Sumario de la invención

La invención se refiere a un sistema y un método para limpieza y mejora de biogás (bruto) que tiene una concentración de sulfuro de hidrógeno de hasta el 2 % (20.000 ppmv), preferentemente biogás producido en estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), hasta biometano por medio de absorción física en agua.

La limpieza de impurezas, principalmente sulfuro de hidrógeno, y la mejora del biogás (preferentemente a biometano) retirando el CO₂, conectable a una instalación para el tratamiento de aguas residuales primarias de una EDAR existente, comprende:

- a) una primera tubería o canal de entrada que proporciona agua de lavado al sistema por gravedad y en ausencia de medios de bombeo, siendo el agua fresca agua residual primaria tratada que viene de la instalación de tratamiento primario de aguas residuales. Una de las principales ventajas es el bajo coste de grandes caudales de agua que pueden usarse, de hasta 10.000 m³/día sin necesidad de consumo de energía de bombeo;
- b) una segunda tubería o canal que proporciona el biogás sin tratar al sistema;
- c) una columna de burbujeo de absorción física no presurizada a contracorriente para lograr una retirada simultánea de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono y que tiene una alta relación de entrada líquido a gas (L/G mayor de 1, pero preferentemente igual a o mayor de 3, más preferentemente de 3 a 10 y aún más preferentemente de 4 a 6), para alcanzar una alta eficacia de absorción física, comprendiendo la columna de burbujeo cuatro zonas:

- una primera zona *de contacto* en la parte superior de la columna, donde el agua de lavado entra por gravedad hacia abajo a través de la primera tubería de entrada a una velocidad V que varía de 0,01 m/s a 0,05 m/s y el biogás se inyecta a través de la segunda tubería de entrada en condiciones de contracorriente por medio de uno o más difusores de burbuja fina colocados a una altura de 1,5 a 3 metros por debajo del nivel de la primera tubería de entrada y estando conectados a una o más bombas de soplado de baja presión a una presión suficiente para superar: la caída de presión de los difusores, el nivel del agua por encima de los difusores y la pequeña presión de 2-5 kPa (20-50 mbar) sobre el nivel de agua requerida para procesos de mejora de biogás aguas abajo, siendo dicha presión preferentemente igual o menor de 170 kPa (1,7 bar) y más preferentemente de 130 a 160 kPa (1,3 a 1,6 bar). Por tanto, la adición de compresores de alta presión de 600 a 1000 kPa (6 a 10 bar) se previene, a diferencia de la técnica anterior.
- una segunda zona *de retención de pequeñas burbujas*, situada debajo y adyacente a la primera zona, con una altura de 1 a 2 metros y más preferentemente de 1 a 1,5 metros, con la finalidad de prevenir la escapada de las pequeñas burbujas fuera del sistema con el flujo descendente de agua, que tiene la misma velocidad de flujo descendente descrito en la primera área;
- una tercera zona *de salida (agua)*, localizada a lo largo de la columna desde la parte inferior a la superior y adyacente a la primera y la segunda zonas, donde el flujo de agua es ascendente después de la absorción física a una velocidad de 0,3 a 1 m/s y más preferentemente que varía de 0,4 a 0,5 m/s, que tiene un deflector vertical para separar el flujo de agua de lavado utilizado de la primera y segunda zonas, y una salida del agua de lavado que abandona el sistema por la parte superior de la misma, y;
- una cuarta zona *de sedimentación (sólidos)* en el fondo de la columna de burbujeo debajo de la segunda zona, donde los sólidos del agua de lavado, si los hubiera, se recogen y se drenan periódicamente;

la columna de burbujeo también comprende una zona *de retención* del biogás mejorado en la parte superior de la columna, por encima de la primera zona y por encima de la primera tubería de entrada, para recolectar el biogás mejorado; y

d) medios para regenerar el agua de lavado usada (medios de regeneración), conectados a la salida del agua de lavado de la (tercera) zona de salida de la columna, siendo dichos medios un reactor biológico de la propia instalación de tratamiento de agua residual usado para tratamiento secundario.

Este sistema produce una absorción física, a diferencia de los sistemas conocidos de mejora de biogás. La relación L/G es siempre superior a 1, no como en la técnica anterior, y más preferentemente igual o mayor de 3. Para el objeto de la invención, es recomendable delimitar no solamente un valor mínimo de la relación L/G, sino también un valor máximo. El valor mínimo de la relación L/G define el valor por debajo del cual el CO₂ y el H₂S no se disuelven correctamente y su contenido en el gas que abandona la columna de burbujeo es mayor del esperado (dióxido de carbono < 5 % y sulfuro de hidrógeno > 150 ppmv), mientras que la relación de L/G máxima del intervalo define el valor por encima del cual las pérdidas de metano son demasiado altas (por encima del 7 %), entonces la concentración final de CH₄ disminuye por esta intrusión. Además, el funcionamiento con relaciones L/G superiores a 10 implica un tamaño excesivo de la columna de burbujeo con dimensiones no apropiadas, haciendo al sistema ineficiente. Desde este punto de vista, la relación L/G es preferentemente igual a o menor de 10. Por lo tanto está preferentemente comprendida entre 3 y 10, siendo más preferentemente de 4 a 6. Esta relación L/G alta de la presente columna implica la absorción con un alto caudal L de agua. Este caudal de agua L reduce la concentración de dióxido de carbono en el agua, C y por lo tanto aumenta la fuerza de conducción de transferencia de masa en la columna de agua (C_{sat}-C) y la eficacia del proceso sin de alta presión, absorción química, depuradores de empaquetado o enfriamiento, a diferencia de la técnica anterior que usa comúnmente estos tipos de elementos/dispositivos.

Gracias al diseño desvelado, la columna de burbujeo permite la retirada simultánea de CO₂ y H₂S del biogás bruto sin pre-limpieza del biogás, de una forma sostenible, ya que se minimizan los problemas de corrosión retirando compresores de alta presión, bombas de agua, recipientes presurizados o válvulas. Para añadir más, es posible mejorar cualquier biogás sin limitación en su concentración de sulfuro, que puede ser incluso de hasta 20.000 ppmv (es decir el 2 % v/v de H₂S en el biogás a mejorar), a diferencia de la técnica anterior, donde dicho valor es normalmente de 350 ppmv. De hecho, debería considerarse que la presente invención cubre como caso preferido un dispositivo y un método para limpiar y mejorar biogás que tiene una concentración de sulfuro mayor de 350 ppmv, que no se consigue con ningún sistema definido en la técnica anterior.

A parte de esta ventaja principal, gracias al nuevo sistema no hay necesidad de dispositivo enfriador de agua porque la absorción física se lleva a cabo a la temperatura del agua de lavado, estando la temperatura del agua de tratamiento primario normalmente entre 5 °C y 30 °C y normalmente entre 15 °C y 25 °C en los países mediterráneos (pero puede variar de la temperatura del agua residual tratada primaria en otros países) y no hay entrada de energía de calentamiento en el proceso, es decir, no hay compresores de alta presión, suministro de agua presurizada o bomba de reciclado, a diferencia de la técnica anterior.

Los problemas de atascos también se minimizan e incluso eliminan debidos tanto a precipitación de azufre elemental como a crecimiento bacteriano, ya que no se usa depurador de empaquetado en la columna. Tampoco se necesitan agentes antiespumantes en este diseño.

Gracias al hecho de que el sistema comprende una columna no presurizada es posible usar difusores de burbuja fina y sopladores de baja presión, en comparación con compresores de alta presión (600-1000 kPa (6-10 bar)) de los sistemas de depurado con agua conocidos en la técnica que se usan comúnmente en este tipo de sistemas. Por sopladores de "baja" presión se entienden los sopladores conocidos en el campo que pueden inyectar un gas a una presión preferentemente igual a o menor de 170 kPa (1,7 bares) y más preferentemente que varía de 130 a 160 kPa (1,3 a 1,6 bares); esta presión es suficiente para superar las resistencias descritas anteriormente, evitando de esta manera las altas presiones. Dichos sopladores de baja presión se seleccionan normalmente de sopladores de canal lateral o sopladores de lóbulos.

Como resultado de este sistema, el biogás mejorado que sale de la columna de burbujeo tiene las siguientes características:

- Metano >85 %
- Dióxido de carbono <5 %
- Oxígeno < 0,1 %
- Nitrógeno < 9 %
- Sulfuro de hidrógeno < 150 ppmv
- Saturación con agua.

Es decir, el biogás se limpia y se mejora exitosamente. Dicho biogás mejorado también se limpia de sulfuro de hidrógeno hasta un nivel donde está listo para su uso, por ejemplo como combustible para suministros combinados de calor y potencia (CHP) o calderas. Este tipo de dispositivos se usan normalmente en plantas de tratamiento de aguas residuales para generación de calor y electricidad para el consumo (por ejemplo, para mantener la temperatura de digestores anaeróbicos).

Sin embargo, dado que el biogás enriquecido aún muestra una importante cantidad de sulfuro de hidrógeno y/o una importante cantidad de agua que pueden condicionar su uso final, debe limpiarse adicionalmente si se destina a combustible de vehículos o inyección en red de gas. Por lo tanto, en una realización preferida el sistema de limpieza y de mejora puede comprender además medios para limpiar adicionalmente el biogás mejorado después de salir de la columna de burbujeo y antes de transportarse al tanque de almacenamiento. Esta es una última etapa de pulido, como se describe comúnmente en la técnica anterior, requiere medios de refinado que preferentemente incluyen un dispositivo de enfriamiento del biogás enriquecido aproximadamente a 5 °C (preferentemente entre 4 y 6 °C) y filtros de absorción con capas de un material específico que pueda regenerarse por ejemplo calentando o con una disminución en la presión, seleccionándose dichos materiales del grupo que consiste en: gel de sílice, tamices moleculares (zeolitas) y/o carbón activado o una combinación de los mismos. Como se ha dicho, los medios de limpieza o refinado pueden incluirse en el sistema cuando biometano enriquecido es todavía inadecuado para la automoción o la inyección en red, es decir siempre y cuando el biogás todavía muestra por ejemplo un azufre total > 20 mg/Nm³ y el punto de rocío mayor de -10 °C a 20 MPa (200 bares), de acuerdo con la normativa ISO 6327 y/o pequeñas cantidades de siloxanos.

En un caso preferido, el sistema comprende además una bomba axial para el reciclaje de agua desde la zona de retención de pequeñas burbujas hacia la zona de contacto, para aumentar la eficiencia de transferencia de masa. El reciclado de agua por esta bomba produce un flujo de líquido reciclado adicional, L_R, resultando en una relación de líquido a gas L_R/G interna que varía de más de 0 a 15 y más preferentemente de 5 a 15 que aumenta el contacto agua-líquido dentro de la columna. La bomba axial comprende una tubería de succión de entrada colocada a una

altura de 100 a 500 mm por debajo de los difusores de burbuja fina y una tubería de impulsión de entrada a una altura de 500 a 1000 mm por encima de los difusores de burbuja fina.

Preferentemente, el sistema comprende un caudalímetro del agua de lavado que actúa por medio de un controlador Lógico Programable (PLC) sobre los sopladores de biogás con controladores de velocidad variables, para controlar y mantener automáticamente la relación L/G. De esta manera, cuando el caudal de agua de lavado inyectada por gravedad disminuye o aumenta, automáticamente el caudal de biogás varía proporcionalmente y el valor L/G se mantiene constante dentro de la columna de burbujeo. Preferentemente el caudalímetro debe ser del tipo canal ultrasónico abierto.

Por agua de lavado debe entenderse "agua residual tratada primaria". El tratamiento primario normalmente es un pre-tratamiento mecánico que incluye tamices para la retirada de escombros y otros sólidos, cribas para la separación de materiales minerales (piedras, grava y arena) y así como trampas de grasa para la eliminación de grasa y aceite y, en algunas plantas, una clarificación primaria para la retirada de sólidos en suspensión, a veces potenciada por la adición de químicos, que tiene una composición típica de COD (Demanda Química de Oxígeno, por sus siglas en inglés) de 100 a 1000 mg/l, TSS (Sólidos Suspendidos Totales, por sus siglas en inglés) de 50 a 500 mg/l, pH de 6,5 a 8 y temperatura de 5 °C a 30 °C. En este sentido, el agua de lavado es un caudal de agua residual tratada primaria (es decir agua pretratada o parcialmente) donde un porcentaje de sólidos, arena y grasas se retiran previamente antes de ser introducidos en la columna de burbujeo. El agua residual del tratamiento primario es una fuente de agua "gratis" disponible en las estaciones depuradoras de aguas residuales, con el beneficio añadido de tener una baja concentración de oxígeno, a diferencia del agua de lavado usada en la técnica anterior (agua regenerada por depuración o agua residual tratada) que provoca la presencia de este contaminante en el biogás mejorado. Los sistemas de depuración con agua bien conocidos usan el caudal tratado del agua efluente producida en la EDAR, después del tratamiento biológico completo y de la retirada de todas las impurezas.

De acuerdo con lo anterior, la columna de burbujeo descrita está diseñada de tal forma que el efluente pre-tratado puede utilizarse como agua de lavado en procesos de mejora de biogás, a diferencia de los sistemas de depurado con empaquetado que requieren un tratamiento del efluente de la planta para evitar problemas de atasco.

Debe tenerse en cuenta que el sistema desvelado usa una gran cantidad de agua residual primaria que de nuevo se contamina debido al proceso de absorción física. El agua de lavado usada que sale de la columna de burbujeo después del proceso de absorción física puede contener H₂S, CO₂ y pequeñas cantidades de metano disueltos, que representan un problema potencial de olores y escapes de metano a la atmósfera. Esa es la razón por la cual el sistema también proporciona medios de regeneración del agua de lavado como parte del sistema completo. Los medios de regeneración del agua de lavado son específicamente los reactores biológicos para tratamiento secundario del agua residual de la instalación de tratamiento de aguas residuales, de tal modo que el agua de lavado de salida de la columna se conecta a una tubería que conduce el agua de lavado usada a la instalación de tratamiento secundario de la planta, continuando de esta manera con la línea común de agua del tratamiento de aguas residuales. De este modo, puede entenderse que el sistema desvelado de limpieza y mejora de biogás está específicamente conectado a la EDAR entre las instalaciones de tratamiento primario y secundario. Esta característica mejora adicionalmente las ventajas del sistema completo, debido a que los costes energéticos y estructurales se reducen totalmente: en este caso el sistema de mejora comprende medios de regeneración del agua residual tratada primaria usada en la absorción física, ya que dichos medios de regeneración son en este caso el reactor biológico de la propia planta utilizado para el tratamiento secundario, que está conectado a la salida de agua de lavado del tercer área de salida de la columna. De esta manera, la regeneración de agua se proporciona por el ya existente proceso biológico situado bajo la invención (lodos activos en la mayoría de los casos). El agua de lavado usada abandona la columna y entra al reactor biológico (tratamiento secundario) por gravedad, donde las bacterias oxidan el sulfuro de hidrógeno a sulfato y el metano a dióxido de carbono y agua, con muy bajos consumos energéticos. De esta manera, el sistema minimiza los escapes de metano a la atmósfera a menos del 1 % y los problemas de olores del sulfuro de hidrógeno, mientras se evita el consumo de agua en el sistema.

En un caso todavía más preferido, la segunda línea de tubería o canal es una tubería que transporta el biogás producido en el digestor anaeróbico de la planta EDAR a la columna de burbujeo. En esta realización, la EDAR existente es la fuente tanto del agua de lavado como del biogás a mejorar, sin la necesidad de fuentes externas de biogás.

Derivado de estas realizaciones, un segundo objeto de la presente invención es una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) que comprende una instalación de tratamiento primario de agua, un reactor biológico como instalación de tratamiento secundario y un digestor anaeróbico para el tratamiento de sólidos, que comprende además el sistema de limpieza y enriquecimiento de biogás (preferentemente a biometano) previamente desvelado, localizado entre las instalaciones de tratamiento primario y secundario, donde la primera tubería de entrada del sistema está conectada a la salida de agua residual del tratamiento primario de la instalación de tratamiento primario y la salida del agua de lavado de la columna de burbujeo está conectada a una tubería que conduce el agua de lavado utilizada para la mejora de biogás al equipo de tratamiento secundario de la planta para su regeneración.

En una realización preferida el biogás a mejorarse se produce en el digestor anaeróbico de la propia planta, de tal modo que la segunda tubería de alimentación transporta el biogás desde el digestor anaeróbico a la columna de burbujeo del sistema. Para resumir, en este objeto de la invención el sistema de mejora de biogás desvelado se introduce en la línea de aguas de una planta de tratamiento de aguas residuales existente sin la necesidad de cambios significativos en la estructura o configuración, acoplándose específicamente entre dos instalaciones de la planta: los equipos de tratamiento primario y secundario. De este modo, el agua residual utilizada como agua de lavado en la columna también se regenera sin necesidad de medios adicionales, ya que dicha corriente de agua se regenera en el reactor biológico del tratamiento secundario, que la línea natural de agua de la planta.

En un caso preferido, la estación depuradora de aguas residuales puede comprender más de un sistema de limpieza y enriquecimiento como el descrito previamente entre los servicios de tratamiento primario y secundario de la planta. Gracias a esta configuración de la planta mejorada, el sistema permite una disposición en paralelo de columnas de burbujeo, que comparten la primera y segunda tubería y poseen compuertas. Así, una de las columnas podría aislarse para trabajos de mantenimiento mientras el resto de las columnas continúan funcionando.

Otro objeto de la presente divulgación es un método para limpiar y mejorar el biogás (bruto), de cualquier origen industrial pero preferentemente el producido en estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), para cualquier uso donde sólo sea necesaria la retirada de sulfuro de hidrógeno (por ejemplo para alimentar las plantas de cogeneración (CHP) o calderas) y preferentemente para obtener biometano como combustible para vehículos o inyección a red de gas usando el sistema descrito anteriormente donde se requiere una limpieza y mejora adicionales del biogás, comprendiendo el método:

a) inyectar una corriente de agua de lavado, que es agua residual tratada primaria procedente de la instalación de tratamiento primario de la EDAR, por gravedad a través de la primera tubería de entrada a una velocidad descendiente V que varía de 0,01 a 0,05 m/s a la primera zona de contacto de la columna de burbujeo no presurizada comprendida en el sistema;

b) inyectar un flujo de biogás bruto por la parte inferior de la primera zona de contacto de la columna a través de la segunda tubería de entrada en condiciones de contracorriente por medio de uno o más difusores de burbuja fina situados a una altura de 1,5 a 3 m debajo de la primera tubería de entrada y estando conectada a uno o más sopladores de baja presión a una presión suficiente para vencer: la caída de presión de los difusores, el nivel de agua por encima de los difusores y la pequeña presión de 2-5 kPa (20-50 mbar) sobre el nivel de agua requerida para procesos de enriquecimiento de biogás aguas abajo, dicha presión siendo preferentemente igual o menor a 170 kPa (1,7 bar) y más preferentemente que varían de 130 a 160 kPa (1,3 y 1,6 bar);

c) poner las corrientes en contacto para producir una absorción física dentro del primer área de la columna de burbujeo, a la temperatura del agua residual tratada primaria (con un amplio intervalo de funcionamiento que varía preferentemente de 5 °C a 30 °C) y a una alta relación líquido-gas de entrada L/G (mayor de 1, pero preferentemente igual a o mayor de 3, más preferentemente de 3 a 10, e incluso más preferentemente de 4 a 6) sin una entrada de energía (el tiempo hidráulico de residencia variando de 30 a 320 segundos);

d) retener burbujas finas en el segundo área de la columna después de la etapa de absorción física, y finalmente extraer el agua de tratamiento primario usada en el proceso por la parte superior de la columna a través de la tercera zona de salida;

e) recoger el biogás enriquecido por absorción física en la zona de retención situada en la parte superior de la columna, por encima del primer área y del nivel de la primera tubería de entrada; y

f) regenerar el agua de lavado utilizada en el proceso de enriquecimiento dentro de la columna, dicha agua de lavado utilizada saliendo de la columna de burbujeo tras el proceso de absorción y siendo conducida a los medios de regeneración que son el reactor biológico del propio sistema de tratamiento secundario de aguas residuales utilizado para un tratamiento secundario.

Básicamente, la retirada simultánea de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno del biogás se lleva a cabo en la etapa de absorción física, sin la necesidad de pre-limpieza de sulfuro y sin límite respecto a la concentración de sulfuro de hidrógeno en el biogás bruto, a diferencia de la técnica anterior donde una pre-limpieza del sulfuro de hidrógeno $< 500 \text{ mg/m}^3$ es necesaria para evitar la corrosión y obstrucción de problemas de empaquetado. Aparte, se alcanza un muy bajo consumo energético, igual o menor de $0,05 \text{ kWh/m}^3$, ya que no se necesita presión para llevar a cabo la etapa de absorción física, el flujo de agua de lavado se inyecta por gravedad, sin ningún requerimiento de bombeo incluso para altos caudales de agua, incluso de $10.000 \text{ m}^3/\text{día}$. De hecho, el caudal de agua de lavado puede variar de pequeños flujos de $1 \text{ m}^3/\text{h}$ a incluso $10.000 \text{ m}^3/\text{día}$, sin requerimientos de bombeo.

Para regenerar el agua de lavado utilizada en el proceso de absorción, dicha agua de lavado abandona la columna de burbujeo tras el proceso de absorción y se conduce a los medios de regeneración para retirar el H_2S , CO_2 disueltos y pequeñas cantidades de metano contenido en el agua de lavado, que representan un problema potencial de olores y escapes de metano a la atmósfera. La etapa de regeneración sería preferentemente una etapa de regeneración biológica.

El método podría comprender adicionalmente la etapa de drenaje periódico de sólidos del agua de lavado recogida en la cuarta zona de sedimentación al fondo de la columna.

El método puede comprender la etapa adicional de recirculación de agua desde la zona de retención de burbujas pequeñas a la zona de contacto a un flujo de líquido recirculado L_R , por medio de una bomba axial descrita anteriormente, resultando en una relación de flujos líquido de recirculación-gas (L_R/G) que varía de 0 a 15, y más preferentemente de 5 a 15 para aumentar el contacto agua-gas. La bomba axial, como se define anteriormente,

5 comprende una tubería de entrada de succión situada a una altura de 100-500 mm por debajo de los difusores de burbuja fina, y una tubería de salida de impulsión a una altura entre 500 y 1000 mm sobre los difusores de burbuja fina.

Ya que el biogás mejorado aún muestra una cierta cantidad de sulfuro de hidrógeno y/o una cierta cantidad de agua que podría condicionar su uso final, el método puede comprender además una etapa final de limpieza/refinado del biogás mejorado después de abandonar la columna, en el caso de que sea destinado para combustible para vehículos o para inyección en red de gas. El método puede comprender además una etapa de pulido, donde el biogás mejorado por absorción física sale de la columna en ascenso por su parte superior de la misma y es conducido al medio de enfriamiento para bajar su temperatura a aproximadamente 5 °C (4 °C-6 °C), y

15 posteriormente a medios filtrantes que comprenden filtros de adsorción con capas seleccionadas del grupo que consiste en gel de sílice, tamices moleculares, tales como zeolitas, carbón activado y cualquier combinación de los mismos, antes de conducir el biogás mejorado al tanque de almacenamiento. Dichos materiales filtrantes pueden regenerarse también, por lo tanto, el método puede comprender además una etapa de calentamiento o etapa de disminución de presión para regenerar los medios filtrantes. Por lo tanto, esta realización preferida comprende:

- enfriar el biogás enriquecido a aproximadamente 5 °C (preferentemente entre 4 °C y 6 °C) y filtrar con filtros de adsorción que comprenden capas de un material que puede regenerarse como por ejemplo por calentamiento o descenso de presión, seleccionándose dichos materiales del grupo que consiste en: gel de sílice, tamices moleculares (zeolitas) y/o carbón activado, o cualquier combinación de los mismos.

El método no sólo comprende limpieza y mejora del biogás, sino además regeneración del agua residual primaria tratada utilizada para la mejora de biogás, que muestra una mayor contaminación debido a la limpieza y el proceso de mejora tras la absorción física. Dicha etapa de regeneración es por lo tanto una etapa de regeneración biológica, ya que el sistema de limpieza y mejora del biogás está específicamente conectado a la EDAR entre las instalaciones de tratamiento primario y secundario y el agua residual que abandona la columna tras la absorción física se conduce al reactor biológico de la planta. La etapa de regeneración del agua residual primaria tratada utilizada en la absorción física en la propia planta preferentemente consiste en:

- extraer dicha agua residual de la columna después de la absorción física, y
- conducirla por gravedad a la entrada del reactor biológico de la propia planta utilizado para el tratamiento secundario, que está conectado a la salida de agua de lavado de la tercera zona de salida de la columna.

De este modo, la regeneración de agua se proporciona por el ya existente proceso biológico que actúa como tratamiento secundario de agua en la planta, donde las bacterias oxidan el sulfuro de hidrógeno a sulfato y el metano a dióxido de carbono y agua, con muy bajos consumos energéticos, y así siguiendo la línea común de agua del tratamiento de aguas residuales. Con estos medios, el sistema minimiza los escapes de metano a la atmósfera a menos del 1 % y los problemas de olores del sulfuro de hidrógeno, a la vez que se evita el consumo de agua en el sistema.

Aparte, en una realización preferida, la corriente de biogás se inyecta desde el digestor anaeróbico de la planta de tratamiento de aguas residuales existente a través de la segunda tubería que conecta tanto el digestor anaeróbico como la columna de burbujeo del sistema, sin necesidad de aporte externo de biogás. De acuerdo con esta afirmación, otra realización más preferible del método de limpieza y enriquecimiento comprende:

a) inyectar la corriente de agua residual primaria tratada procedente del sistema de tratamiento primario de agua residual de la EDAR, por gravedad a través de la primera tubería de entrada a una velocidad descendente V que varía de 0,01 a 0,05 m/s a la primera zona de contacto de la columna de burbujeo no presurizada comprendida en el sistema;

b) inyectar la corriente de biogás bruto procedente del digestor anaeróbico de la planta por la parte inferior de la primera zona de contacto de la columna de burbujeo por la segunda tubería de entrada en condiciones de contracorriente por medio de uno o más difusores de burbuja fina situados a una altura de 1,5 a 3 m por debajo de la primera tubería de entrada y estando conectado al uno o más sopladores de baja presión a una presión suficiente para vencer: la caída de presión de los difusores, el nivel de agua sobre los difusores and la pequeña presión de 2-5 kPa (20-50 mbar) sobre el nivel de agua requerida para procesos de mejora de biogás aguas abajo, dicha presión siendo preferentemente igual o menor de 170 kPa (1,7 bar), y más preferentemente que varía de 130 a 160 kPa (1,3 y 1,6 bar);

c) poner las corrientes en contacto para producir la absorción física dentro de la primera zona de la columna de burbujeo, a la temperatura del agua tratada de primario (que preferentemente varía de 5 °C a 30 °C) y a una alta relación líquido-gas de entrada L/G (mayor de 1, pero preferentemente igual o mayor de 3, más preferentemente de 3 a 10, e incluso más preferentemente de 4 a 5) sin aplicación de energía (el tiempo hidráulico de residencia varía de 30 a 320 segundos);

d) retener burbujas finas en la segunda zona de la columna después de la etapa de absorción física, y finalmente extraer el agua residual de tratamiento primario utilizada por la parte superior de la columna a través de la tercera zona de salida y conduciéndola al reactor biológico del tratamiento secundario de la planta a través de una tubería que conecta los equipos de tratamiento primario y secundario, para la regeneración de los mismos;

5 e) recoger el biogás enriquecido por absorción física en la zona de retención situada en la parte superior de la columna, por encima de la primera zona y del nivel de la primera tubería de entrada; y

f) extraer de la columna el agua residual utilizada después del proceso de enriquecimiento y conducirla por gravedad a la entrada del reactor biológico de la propia planta utilizado para el tratamiento secundario, que está conectado a la salida de agua de lavado de la tercera zona de salida de la columna.

10 Este método preferido puede comprender también la etapa de recirculación de agua desde la zona de retención de burbujas pequeñas a la zona de contacto por medio de una bomba axial a una relación de flujos líquido de recirculación a gas (llamado " L_R/G ") de más de 0 a 15 y más preferentemente de 5 a 15 para aumentar el contacto agua-gas. La bomba axial comprende una tubería de entrada de succión situada a una altura de 100-500 mm por
15 debajo de los difusores de burbuja fina, y una tubería de salida de impulsión a una altura entre 500 y 1000 mm sobre los difusores de burbuja fina.

20 Preferentemente, el método de acuerdo con cualquiera de las alternativas comentadas en esta sección comprende además controlar automáticamente y mantener constante la relación L/G de la absorción física dentro de la columna por medio de un caudalímetro de agua residual que actúa por medio de un PLC sobre los sopladores de biogás.

Resumiendo, las ventajas de la presente invención, tanto del sistema como del método, son las siguientes:

- 25 - Fácil instalación en EDAR existentes, aprovechando el agua residual disponible con la relación L/G como se requiere en la presente invención y el tratamiento biológico para la regeneración de agua.
- Un (muy bajo) consumo energético igual o menor de $0,05 \text{ kWh/Nm}^3$, ya que es un sistema no presurizado, la absorción de agua tiene lugar por gravedad, no se requiere enfriamiento de agua, no se necesita demanda de calor para regeneración y se usan sopladores de biogás de baja presión.
- 30 - No se requiere pre-limpieza de sulfuro de hidrógeno ya que se evitan los problemas de corrosión del equipo mecánico y la retirada simultánea de H_2S y CO_2 se lleva a cabo en la columna de absorción.
- La contaminación por oxígeno en el biogás mejorado se minimiza ya que el agua residual tratada primaria no tiene oxígeno disuelto y por tanto no hay despojamiento de este gas durante la absorción.
- El sistema minimiza problemas de olores de sulfuro de hidrógeno al tratar el agua de lavado en el reactor biológico de la propia planta, es decir sin medios adicionales.
- 35 - El sistema minimiza el escape de metano a la atmósfera al tratar el agua de lavado en el reactor biológico de la propia planta.
- No se necesita consumo de agua, porque el sistema está insertado en una planta de tratamiento de aguas residuales, utilizando el agua residual tratada de primario y está además regenerada en el reactor biológico de la EDAR.
- 40 - No hay demanda de consumibles: no se requieren agentes anti-incrustación ya que no se usa material de relleno para la absorción.
- No hay atascos por crecimiento bacteriano ni por precipitación de azufre elemental ya que no se usa material de relleno.
- No requiere calor para regeneración ya que es solo un proceso de absorción (por gravedad).
- 45 - Bajo coste capital incluso para bajos caudales desde $1 \text{ m}^3/\text{h}$ hasta altos caudales de hasta $2000 \text{ m}^3/\text{h}$, debido a un sistema y proceso bastante simples con muy poco equipo (sopladores de baja presión, difusores de burbuja fina y etapa final de secado), lo que hace un sistema viable para instalaciones de pequeña escala ($< 100 \text{ Nm}^3/\text{h}$ biogás).

Tabla 2. Comparación de tecnologías de mejora en la técnica anterior y en la presente invención. Las características principales

	PSA	Depuración con agua y con regeneración	Depuración con agua sin regeneración	Depuración en fase orgánica	Depuración con reactivos químicos	Presente Invención
Sistema de mejora	Material adsorbente (zeolitas, carbón activado) a elevada presión	-Columna de relleno a contracorriente de agua - Tanque flash, columna de desorción, enfriador y recirculación de agua	- Columna de relleno a contracorriente - Tanque flash	-Columna de relleno a contracorriente con polietilenglicol - Columna de regeneración	-Columna química de relleno a contracorriente con amina - Columna de regeneración	-Columna de absorción de burbujeo a contracorriente por gravedad y regeneración de agua en reactor biológico
Líquido/Gas (m³ a 20°C/Nm³ gas)	Sin líquido	0,1-0,3	0,1-0,3	<0,1	<0,1	3-10 Alto flujo de agua no presurizado
Presión de trabajo kPa (bar)	400-700 (4-7)	600-1000 (6-10)	600-1000 (6-10)	400-700 (4-7)	0 (0)	130-160 (1,3-1,6)
Compresores de alta presión	Sí. También compresores de vacío con VPSA	Sí	Sí	Sí	No	No. Sopladores de biogás de baja presión para inyección en difusores de burbuja fina
Bombas de agua	NO	Sí	Sí	Sí	Sí	No, por gravedad
Pérdidas de metano	<10 %	1-5 %	1-5 %	2-10 %	<0,1 %	<6 %
Contenido de metano en el gas enriquecido	>96 %	>71-98	>71-98	>96 %	>99 %	85-94 %

Tabla 3. Comparación de tecnologías de enriquecimiento en la técnica anterior y en la presente invención. Las desventajas principales

Desventajas	PSA	Depuración con agua y con regeneración	Depuración con agua sin regeneración	Depuración en fase orgánica	Depuración con reactivos químicos	Presente Invención
Consumo eléctrico (kWh/Nm³)	0,25-0,5	0,3-0,6	0,3-0,6	0,24-0,33	<0,15	<0,05
Pre-limpieza necesaria para H₂S > 500 mg/m³	Sí: retirada de agua residual y H ₂ S antes de recipientes No	Sí: para evitar la corrosión y obstrucción del medio Sí, para H ₂ S < 500 mg/m ³	Sí: para evitar la corrosión	Sí: para evitar altas temperaturas para regeneración Sí, para H ₂ S < 500 mg/m ³	Sí: para evitar altas temperaturas para regeneración Sí, para H ₂ S < 500 mg/m ³	No. Retirada simultánea de CO ₂ y H ₂ S Sí. Hasta 20.000 ppmv de H ₂ S
Retirada simultánea de CO₂ y H₂S	No	Sí, para H ₂ S < 500 mg/m ³	Sí, para H ₂ S < 500 mg/m ³	Sí, para H ₂ S < 500 mg/m ³	Sí, para H ₂ S < 500 mg/m ³	Sí. Hasta 20.000 ppmv de H ₂ S
Contaminantes de biometano	-	Biometano con O ₂ y N ₂ de separación	Biometano con O ₂ y N ₂ del agua residual tratada	Biometano con O ₂ y N ₂ de separación	-	Sin oxígeno. N ₂ del agua de lavado
Problemas de olores de H₂S	NO, si limpieza previa	Gas de escape con H ₂ S requiere post-tratamiento	Gas de escape con H ₂ S	NO, si anteriormente se limpia H ₂ S	NO, si limpieza previa	NO. Agua residual tratada en reactor de agua residual
Tratamiento de los escapes de metano	Gas de escape que sale de la columna PSA. 3 %	Gas de escape del recipiente de separación 1-2 % Tratamiento del gas de escape necesario	Sin solución Agua sale del tanque flash a descarga 1-2 %	Gas de escape del recipiente de separación 2-4 % Tratamiento del gas de escape necesario	No necesario	Tratamiento biológico
Consumo de agua	NO	<0,05 m ³ agua/Nm ³	0,1-0,3 m ³ agua residual tratada /Nm ³	NO	NO	NO 4-6 m ³ agua residual primaria/Nm ³ Regenerada en EDAR
Necesidades de enfriamiento	Enfriar biogás después de columna PSA	Enfriar agua antes de reciclado a menos de 7 °C	Biogás antes de columna absorción	Enfriar gas y agua	Recirculación líquida y separación de CO	Secado del biogás como etapa final de pulido
Demanda de calor para regeneración (°C)	NO	NO	NO	55-80 °C	160 °C	NO
Demanda de consumibles	Carbón activado, zeolitas	Agente anti atasques, agente de secado	Agente anti incrustación, agente secante	Disolvente orgánico (no peligroso)	Solución de aminas (peligrosa, corrosiva)	Agente de secado

Desventajas	PSA	Depuración con agua y con regeneración	Depuración con agua sin regeneración	Depuración en fase orgánica	Depuración con reactivos químicos	Presente Invencción
Atasques/ Problemas mecánicos	Problemas de válvulas	- Atasques en material de relleno - Crecimiento bacteriano -Azufre elemental en columna de desorción de aire	- Atasques en material de relleno - Crecimiento bacteriano	- Atasques en material de relleno - Equipo mecánico	- Atasques en material de relleno - Equipo mecánico	NO
Complejidad de diseño y coste capital	- 6-9 tanques en paralelo. -Múltiples válvulas y bombas	- Bombas, compresores de alta presión, múltiples válvulas y tanques	- Bombas, compresores de alta presión, múltiples válvulas y tanques	- Bombas, compresores de alta presión, múltiples válvulas y tanques	- Bombas, compresores de alta presión, múltiples válvulas y tanques	Diseño sencillo en un solo tanque sin bombeo
Tamaño	No viable económicamente para flujos de biogás bruto <60-70 Nm ³ /h Capacidad medio-baja	Tamaño medio-grande No viable económicamente para flujos de biogás bruto <60-70 Nm ³ /h	No viable económicamente para flujos de biogás bruto <60-70 Nm ³ /h	No viable económicamente para flujos de biogás bruto <150 Nm ³ /h	Tamaño medio-grande No viable económicamente para flujos de biogás bruto <250 Nm ³ /h	Viable económicamente para flujos de biogás bruto de 1 a 2500 Nm ³ /h

Breve descripción de los dibujos

La **Figura 1 (técnica anterior)** ilustra una representación esquemática bien conocida del sistema de mejora de biogás por depuración con agua sin regeneración.

- 5 1. Primera tubería de entrada para agua de lavado
- 2. Bombas de agua a alta presión
- 10 3. Filtros de retirada de sólidos
- 4. Columna de absorción
- 15 5. Segunda tubería de entrada para biogás bruto a mejorar
- 6. Separador de sulfuro de hidrógeno y humedad
- 7. Compresor de alta presión
- 20 8. Enfriador de gas
- 9. Separador de empaquetado
- 25 10. Separador de condensados
- 11. Dispositivo de secado y purificación de gas
- 12. Flujo de biogás mejorado con calidad para combustible de vehículos
- 30 13. Recipiente flash
- 14. Flujo/tubería de recirculación de gas
- 35 15. Flujo/tubería del efluente de agua de lavado

La **Figura 2 (presente invención)** ilustra una representación esquemática del sistema global de mejora y limpieza, insertado en una planta de tratamiento de aguas residuales que tiene un reactor biológico, de acuerdo con una realización particular de la presente invención.

- 40 16. Sistema de limpieza y mejora de biogás
- 17. Digestor anaeróbico
- 18. Medios de refinado final del biometano
- 19. Primera tubería de entrada para tubería de agua residual tratada primaria
- 45 20. Instalación de tratamiento primario de la planta
- 21. Columna de burbujeo no presurizada
- 22. Caudalímetro
- 23. Reactor biológico de la planta para el tratamiento secundario
- 24. PLC
- 50 25. Soplador de biogás
- 26. Difusores de burbuja fina
- 27. Flujo/tubería de biogás limpio y mejorado
- 28. Medios de enfriamiento de gas
- 29. Flujo de agua de lavado después de usarse dentro de la columna 21
- 55 30. Salida del reactor biológico 23 de la planta

La **Figura 3** ilustra una representación esquemática de la columna de burbujeo de acuerdo con una realización particular de la presente invención.

- 60 31. (Primera) Zona de contacto
- 32. (Segunda) Zona de retención de burbujas pequeñas
- 33. (Tercera) Zona de salida
- 34. (Cuarta) Zona de sedimentación
- 35. Nivel máximo de agua
- 36. Tolva de biogás
- 65 37. Primera placa deflectora vertical para prevenir que el biogás se escape a la atmósfera
- 38. Tubería de entrada inferior

39. Placa deflectora de entrada
 40. Segunda placa deflectora vertical para separar una primera y segunda zonas de la tercera zona
 41. Bomba de recirculación axial, que tiene una tubería de aspiración de entrada (41a) y una tubería de impulsión de salida (41b) que conecta la (segunda) zona de retención de burbujas finas con la (primera) zona de contacto de la columna de burbujeo (21)

Descripción detallada de la invención

La Figura 1 ilustra la técnica anterior y muestra un sistema de lavado con agua convencional y bien conocido para mejora de biogás, sin regeneración del agua de lavado utilizada.

El biogás bruto a mejorar es conducido por la segunda tubería de entrada (5) a la columna de absorción (4) donde se pone en contacto con el agua de entrada/agua de lavado conducida a dicha columna (4) a través de la primera tubería de entrada (1) a elevada presión; los componentes del biogás, principalmente CO₂, son absorbidos por el agua hasta que se alcanza el equilibrio de saturación.

El agua de lavado se presuriza con bombas de agua de alta presión (2) a 7-14 bar y, tras filtros de eliminación de sólidos (3), se introduce en la parte superior de la columna de absorción (4), antes de la entrada del agua de lavado. El biogás bruto está justo por encima de la presión atmosférica y saturado de agua. Una etapa de eliminación de sulfuro de hidrógeno es necesaria cuando la concentración de sulfuro de hidrógeno es mayor que 500 mg/m³, llevándose a cabo mediante un separador de sulfuro de hidrógeno y humedad (6). La humedad y las partículas deben ser también eliminadas antes de que el gas sea comprimido en un compresor de alta presión (7) hasta 7-14 bar. La temperatura del biogás de entrada puede variar desde 15 a 38 °C (preferentemente 30 °C) y la temperatura de salida tras compresión puede ser de 70 °C para una salida a 9 bar y se enfría con medios de enfriamiento o enfriador de gases (8) antes de la absorción. Ambos flujos, líquido y biogás, son forzados a entrar al tanque de la columna (4) en condiciones de contracorriente inyectando el gas por la parte inferior y el agua desde la superior en direcciones opuestas. La columna de absorción (4) está provista de un separador de relleno aleatorio (9) para obtener una máxima transferencia de masa. En esta columna (4), el dióxido de carbono se absorbe en el agua, y el biogás que sale de la columna (4) tiene una concentración de metano del 70 al 98 % en volumen. Para obtener biogás mejorado con calidad para combustible de automoción, pasa a una etapa final de afino con un separador de condensados (10) y a un sistema de secado y purificación del gas (11) para eliminar el agua para controlar el punto de rocío por debajo de -80 °C y eliminar pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno. Finalmente, el flujo de gas mejorado a calidad para combustible de automoción (12) se oloriza para poder detectar fugas de gas en caso de que ocurran.

Debido a que el metano es parcialmente soluble en agua, el agua del tanque de absorción, para reducir las pérdidas de metano, es conducida a un tanque flash (13). En el tanque de flash el agua se despresuriza hasta 2 bar y el gas disuelto se escapa. El gas disuelto, que contiene algo de metano pero principalmente dióxido de carbono, se recircula a través de una tubería de recirculación de gas (14) y devuelto a la segunda tubería de entrada de biogás bruto (5). El agua de lavado efluente se saca por una tubería (15) desde el tanque de flash (13) sin regeneración.

El metano que está disuelto en el agua de lavado efluente y no separado en el tanque de flash (13) abandona la planta, por lo que los escapes de metano y de olores de sulfuros pueden causar un problema en la descarga final de agua. Atasques o crecimiento de bacterias en los separadores de relleno (9) en la columna de absorción es otro problema existente en plantas sin regeneración de agua, al usar agua residual tratada. En esos casos, hay materia biológica que se queda pegada en el separador de relleno (9) o que causa crecimiento.

Por el contrario, la Figura 2 ilustra una descripción general de un sistema acorde con la presente invención para limpiar y mejorar biogás. Un sistema completo para limpiar y mejorar biogás (16) incluyendo una etapa final de afino con medios de afino final de biometano (18) se instala en una planta de tratamiento de aguas residuales para mejorar el biogás bruto generado en un digestor anaeróbico (17) de biosólidos producidos en la planta.

El sistema (16) posibilita llevar a cabo una absorción física de agua y un proceso de regeneración con agua residual primaria tratada como agua de lavado. El agua residual primaria tratada viene por una primera tubería o canal de entrada (19) desde un sistema de tratamiento primario de la planta (20), que normalmente consiste en tamizar sólidos, aceites y arenas y una clarificación primaria para retirar sólidos suspendidos.

Se alcanza una elevada eficacia de absorción en una columna de burbujeo no presurizada (21) con una relación de flujo de líquido de entrada/gas L/G alto de 4 a 6 introducido en la tubería o canal (19) que normalmente llega por gravedad desde el tratamiento primario de agua residual al reactor biológico (23) para el tratamiento secundario de la planta. Se pueden usar grandes caudales de agua tan altos como 10.000 m³/día, sin necesidad de bombeo. Aparte, no hay consumo de agua ya que el agua se regenera adicionalmente en el reactor biológico (23).

La relación L/G se controla y se mantiene automáticamente con un caudalímetro de agua residual (22) que actúa a través de un PLC (24) sobre los sopladores de biogás (25) con controladores de velocidad variable (tasa). Cuando el flujo de agua residual aumenta o disminuye, el flujo de biogás cambia automáticamente en proporción y el valor L/G

permanece constante.

El biogás bruto procedente del digester anaeróbico (17) de la estación depuradora de aguas residuales se inyecta a través de la tubería de entrada (19) por la parte inferior de la columna de burbujeo (21) por medio de difusores de burbuja fina (26).

La corriente de biogás limpio y enriquecido (27) se recoge en la parte superior de la columna de burbujeo (21). Puede estar enriquecido pero aún es inapropiado para usar como combustible de automoción. En este caso, para obtener calidad para combustible de automoción, una etapa final de afino es necesaria, enfriando hasta unos 5 °C por medios de enfriamiento (28). Un separador de condensados (10) y un dispositivo de secado y purificación (11), que es un filtro de adsorción con varias capas de gel de sílice, tamices moleculares (zeolitas) y/o carbón activado, son también necesarios para el secado y la purificación finales de pequeñas cantidades de contaminantes, principalmente sulfuro de hidrógeno y siloxanos. Estos materiales se regeneran normalmente por ejemplo por calentamiento o reduciendo la presión (no mostrado en el diagrama). Finalmente, se obtiene un biogás enriquecido con calidad de combustible para automoción (12).

Aparte, no se requieren medios de enfriamiento de agua ya que la absorción se lleva a cabo a temperatura del agua residual tratada primaria y no hay necesidad de energía calorífica en el proceso, es decir ni compresores de alta presión, ni agua presurizada de alimentación, ni bombeo de recirculación como en la técnica anterior.

La corriente de agua/agua residual de lavado (29), que sale de la columna de burbujeo (21), contiene H₂S, CO₂ y pequeñas cantidades de metano disueltos, que representan un problema potencial de olores y escapes de metano a la atmósfera. La presente invención también proporciona medios simples de regeneración del agua de lavado en el reactor biológico (23) de la propia estación depuradora de aguas residuales. El agua de lavado entra al reactor biológico (23) por gravedad donde las bacterias oxidan el sulfuro de hidrógeno a sulfato y el metano a dióxido de carbono y agua, a muy bajos consumos energéticos. La salida del reactor biológico (30) está, por lo tanto, libre de contaminación del biogás. Por este método, el sistema minimiza el escape de metano a la atmósfera y problemas de olores del sulfuro de hidrógeno.

La presente invención también proporciona un diseño innovador de la columna de burbujeo no presurizada (21), como se muestra en la Figura 3, que comprende cuatro zonas. El agua entra por abajo a una primera zona de contacto (31) a través de la primera tubería de entrada (19) por gravedad desde arriba, mientras que el biogás se inyecta a través de la segunda tubería de entrada (5) a contracorriente a una distancia $L_5 = 1,5$ a 3 m por debajo de la primera tubería de entrada (19) por medio de sopladores de baja presión (25) de 130 a 160 kPa (1,3 a 1,6 bar) y difusores de burbuja fina (26), dicha presión sólo requerida para vencer la caída de presión de los difusores, para mantener el nivel de agua por encima de los difusores y un pequeña presión de 2-5 kPa (20-50 mbar) sobre el nivel de agua requerida para procesos de enriquecimiento de biogás aguas abajo. La primera zona de contacto tiene una superficie $S = L_1 \times L_1$, donde L_1 es la anchura/longitud de la zona de contacto. L_1 se calcula a partir de un flujo de agua específico para obtener una velocidad descendente de agua V desde 0,01 m/s y 0,05 m/s.

Una segunda zona de retención de burbuja fina (32) con la misma velocidad descendente que el primer área, con una altura $L_4 = 1-1,5$ m, una altura que es importante para evitar que pequeñas burbujas salgan con el agua de salida.

Una tercera zona de salida (33) donde el agua asciende y se separa de la primera (31) y la segunda zonas (32) por una placa deflectora vertical (40). Esta placa deflectora (40) tiene una apertura en la parte inferior de una altura L_3 con la misma dimensión que L_2 , que es la anchura de la zona de salida (33). L_2 se calcula para obtener una velocidad ascensional de 0,3 a 0,6 m/s.

Una cuarta zona de sedimentación (34) se sitúa en la parte inferior de la columna de burbujeo (21), donde se recogen y se drenan los sólidos del agua residual de primario tratada periódicamente. La corriente de biogás mejorado (27) se recoge en la cabeza de la columna por medio de una tolva (36) con una placa deflectora vertical (37), que se sitúa por encima del nivel máximo de agua (35) dentro de la columna (21), de 10 a 20 cm por debajo de la parte inferior de la tubería de entrada (38) para prevenir que el biogás se escape a la atmósfera cuando no haya entrada de influente. Otra placa deflectora (39) permite la entrada de influente en la primera zona de contacto (31) y a su vez previene que las burbujas finas se escapen a la atmósfera.

Para mejorar la eficacia de transferencia de masa, el agua se recicla desde la zona de retención de burbuja fina (32) a la zona de contacto (31) por medio de una bomba axial (41). La entrada de la tubería de succión (41 a) de dicha bomba axial está situada a una altura entre 100-500 mm por debajo de los difusores de burbuja fina (26) y la salida de la tubería de impulsión (41 b) de dicha bomba axial se sitúa a una altura desde 500 a 1000 mm sobre los difusores de burbuja fina (26).

Ejemplos

Ejemplo 1. Estudio experimental: Planta piloto pequeña para mejorar biogás: Flujo de biogás = 0,45 a 2,4 m³/h.

Con un diseño específico, el flujo de agua estequiométrico para obtener una concentración de saturación de CO₂ en agua (L_{min}), que es el flujo mínimo de agua necesario para disolver el dióxido de carbono, será determinado por la concentración de dióxido de carbono en el biogás, la presión y la temperatura del proceso y la solubilidad del dióxido de carbono en agua, considerando las condiciones menos favorables (sur de España, verano, máxima temperatura del agua residual).

$$\frac{L_{\min} \text{ (l/h)}}{G \text{ (l/h)}} = \frac{Q_{\text{CO}_2} \text{ (gas)} \frac{\text{mol}}{\text{l}}}{Q_{\text{CO}_2} \text{ (agua)} \text{ (M)}}$$

donde G es el flujo de biogás (l/h). $Q_{\text{CO}_2} \text{ (biogás)} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$ es la concentración molar del CO₂ en el biogás:

$$Q_{\text{CO}_2} \text{ (biogás)} \frac{\text{mol}}{\text{l}} = \frac{n \text{ mol}}{V} = \frac{P_{\text{CO}_2}}{R \times T}$$

Considerando una temperatura máxima del proceso (condiciones de verano) de T=25 °C, P_{abs} = 1 atm y 43 % de CO₂ en el biogás.

$$Q_{\text{CO}_2} \text{ (biogás)} = 0,014 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

Q_{CO₂} (agua) es la concentración de saturación del CO₂ en agua:

$$Q_{\text{CO}_2} \text{ (agua)} \frac{\text{mol}}{\text{l}} = X_{\text{sat}} \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol agua}} \times 56 \frac{\text{mol agua}}{\text{L agua}}$$

donde X_{sat} es la fracción molar de equilibrio del CO₂ en agua, a partir de la ley de Henry, P_{abs} = 1 atm y T=25 °C:

$$X_{\text{sat}} = \frac{P_{\text{CO}_2} \text{ (atm)}}{k_{\text{H,px}} \text{ (atm)}} = \frac{0,35}{1630} = 0,000215 \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol agua}}$$

y

$$Q_{\text{CO}_2} \text{ (agua)} = 0,012 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

entonces

$$\frac{L_{\min} \text{ (l/h)}}{G \text{ (l/h)}} = \frac{0,014}{0,012} = 1,19$$

Este último valor es la mínima relación L/G que debe usarse para evitar la saturación de CO₂ en agua. Sin embargo, valores considerablemente superiores se consideran en el presente documento para maximizar el rendimiento del sistema aumentando la fuerza impulsora de transferencia de masa en la columna (C_{sat}-C).

Se ensayó una unidad piloto con los siguientes parámetros de diseño y eficiencia:

BIOGÁS

- Flujo: 0,43 a 1,2 m³/h
- Metano: 55 %
- Dióxido de carbono: 43 %

Sulfuro de hidrógeno: 20.000 ppmv

AGUA RESIDUAL:

5 Temperatura: 17 °C
Flujo de agua residual: 2,9 m³/h
L/G= 2,3 a 6,2

COLUMNA DE ABSORCIÓN

10 Distancia de los difusores al nivel de tubería de entrada (L5) 1,5-2 m
Diámetro del difusor de burbuja fina: 270 mm
Número de difusores: 1
15 Diámetro interior de la columna: 292 mm
Área de la columna: 0,07 m²
Velocidad descendente de agua: 0,041 m/s
Distancia del difusor a la salida de la columna (L4) 1 a 1,5 m

EFICACIA DEL PROCESO

20 Pérdidas de metano: <7 %

COMPOSICIÓN DEL BIOMETANO

25 Metano: > 85 %
Dióxido de carbono 4-8 %
Sulfuro de hidrógeno 130-473 ppm
Oxígeno < 0 %
30 Agua saturada

COMPOSICIÓN DEL AGUA DE LAVADO

35 Metano disuelto ≈ 14 mg/l
Sulfuro de hidrógeno disuelto 1-5 mg/l
Dióxido de carbono disuelto: 260-850 mg/l

Usando un biogás diferente con una composición más cercana a la producida en instalaciones EDAR, se descubrió el siguiente rendimiento:

40 BIOGÁS

Flujo: 0,43 a 1,4 m³/h
Metano: 65 %
Dióxido de carbono: 35 %

45 AGUA RESIDUAL:

50 Temperatura: 17 °C
Flujo de agua residual: 2,9 m³/h
L/G= 2 a 6

COLUMNA DE ABSORCIÓN (mismas condiciones que las anteriormente mencionadas)

EFICIENCIA DEL PROCESO

55 Pérdidas de metano: <7 %

COMPOSICIÓN DEL BIOMETANO

60 Metano: > 86 %
Dióxido de carbono 3,6-5 %
Agua saturada
Oxígeno < 0 %

65

COMPOSICIÓN DEL AGUA DE LAVADO

Metano disuelto < 14 mg/l

Dióxido de carbono disuelto: 215-600 mg/l

5 **Ejemplo 2. Diseño de una planta a escala completa de mejora de biogás de acuerdo con la presente invención.**

10 Considerando una estación depuradora de aguas residuales para aguas municipales con un caudal de entrada diario de 60000 m³ y una tecnología convencional basada en procesos de fangos activos donde el fango generado en tratamiento primario (fango primario) y una parte de los biosólidos producidos durante el tratamiento secundario (fango secundario) se conducen a digestores anaeróbicos, en conjunto con otros sustratos biodegradables. Considerando valores promedios de carga orgánica y rendimiento de metano en la digestión anaerobia, esta
 15 instalación puede producir de 7000 a 11000 m³ de biogás bruto al día resultando en ratios L/G entre 5,4-8,5, que están dentro de los intervalos considerados en la invención aquí descrita. Habría que señalar que la producción diaria de biogás podría ser considerablemente más baja en muchos casos como: sobrecarga del digestor, mala operación del digestor o baja carga orgánica. Sin embargo, estos ratios permitirán producir un biogás enriquecido con calidad suficiente para producción térmica y eléctrica si se instala un sistema CHP. Por otro lado, si es necesario el biogás enriquecido puede ser convertido a biometano con uso potencial para vehículos o inyección en red tras
 20 una etapa de afino que consiste en un proceso de enriamiento y filtrado con absorbentes específicos para los compuestos sulfurados presentes en el biogás. Se debe tener en cuenta que los costes de operación de esta etapa son muy bajos ya que la mayor parte del H₂S (98 %) se retira dentro de la columna.

25 La invención puede instalarse fácilmente en las plantas utilizando una configuración de pozo integrado en la tubería o conducción del efluente de los sedimentadores. Dado que las necesidades mecánicas del proceso son escasas y la operación depende principalmente de los ratios de ambas fases, la invención resulta de alta adaptabilidad en instalaciones.

30 En cualquiera de los casos descritos, CHP o producción de biometano para uso externo, la invención puede generar beneficios económicos considerables debido a los siguientes hechos:

- Se generan flujos totales entre 4200 y 6000 m³ al día de biogás enriquecido o biometano con muy bajo consumo eléctrico, principalmente debidos al bombeo de biogás (168-240 kWh por día);
- La utilización de productos químicos en la desulfuración se reduce o incluso se evita;
- 35 - El consumo de energía se reduce comparándolo con los sistemas de limpieza y enriquecimiento descritos en la técnica anterior.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema (16) de limpieza y mejora de biogás que tiene una concentración de sulfuro de hidrógeno de hasta 20.000 ppmv por medio de absorción física de agua, **caracterizado por que** comprende:

a) una primera tubería o canal de entrada (19) que proporciona agua de lavado al sistema por gravedad y en ausencia de medios de bombeo, conectado a una instalación de tratamiento primario de agua residual (20) de una planta existente de tratamiento de aguas residuales (EDAR) que comprende al menos tamizado de sólidos gruesos y retirada de aceite, arena y sólidos suspendidos para proporcionar agua residual de tratamiento primario como agua de lavado al sistema;

b) una segunda tubería o canal de entrada (5) que proporciona el biogás al sistema;

c) una columna de burbujeo de absorción no presurizada a contracorriente (21) para la retirada simultánea de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono por absorción física, comprendiendo la columna de burbujeo (21) cuatro zonas:

- una primera zona (31) que es zona *de contacto* en la parte superior de la columna (21), donde el agua de lavado entra con flujo descendente a través de la primera tubería de entrada (19) por gravedad a una velocidad V que varía de 0,01 m/s y 0,05 m/s, y el biogás se inyecta a través de la segunda tubería de entrada (5) en condiciones de contracorriente por medio de uno o más difusores de burbuja fina (26) situados a una altura de 1,5 a 3 m por debajo de la primera tubería de entrada (19) y estando conectados a uno o más sopladores de tipo baja presión (25) a una presión igual a o menor de 170 kPa (1,7 bares), para producir una relación de entrada L/G dentro de la zona de contacto mayor de 1;

- una segunda zona (32) que es una zona *de retención de burbujas*, situada por debajo y adyacente a la primera zona (31) y que tiene una altura de 1 a 2 m para prevenir el escape de burbujas con el agua de salida, estando configurada dicha segunda zona (32) para la misma velocidad descendente de agua de lavado que la primera zona (31);

- una tercera zona (33) que es una zona *de salida* para el agua, situada a lo largo de la columna (21) desde el fondo hasta la parte superior y adyacente a la primera (31) y segunda (32) zonas, donde el agua de lavado asciende después de la absorción física a una velocidad de 0,3 a 1 m/s, que tiene una placa deflectora vertical (40) para separar el flujo de agua de lavado utilizada (29) de la primera y (31) y la segunda (32) zonas, y una salida del agua de lavado (29) en la parte superior; y

- una cuarta zona (34) que es una zona *de sedimentación* de sólidos en la parte inferior de la columna de burbujeo (21) debajo de la segunda zona (32), donde los sólidos del agua de lavado, si los hubiera, se recogen y se drenan periódicamente;

la columna de burbujeo (21) también comprende una zona de *retención* del gas mejorado en la parte superior de la columna (21), por encima de la primera zona (31) y del nivel de la primera tubería de entrada (19), para recoger el biogás enriquecido (27);

y

d) medios para regenerar el agua de lavado usada (29) conectados a la salida del agua de lavado de la tercera zona (33) de la columna (21), siendo dichos medios un reactor biológico (23) de la propia planta de tratamiento de aguas residuales usada para tratamiento secundario.

2. El sistema de limpieza y mejora (16) de la reivindicación 1, donde la zona de retención de burbujas (32) tiene una altura que varía de 1 a 1,5 m.

3. El sistema de limpieza y mejora (16) de una cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2, donde el sistema (16) comprende una bomba axial de reciclaje de agua (41) para llevar agua desde la zona de retención de burbujas (32) a la zona de contacto (31) a una relación de flujo de líquido reciclado a gas L_R/G de más de 0 a 15, que tiene una tubería de entrada de succión (41 a) situada a una altura de 100-500 mm por debajo de los difusores de burbuja fina (26) y una tubería de salida de impulsión (41 b) a una altura de 500 a 1000 mm por encima de los difusores de burbuja fina (26).

4. El sistema de limpieza y mejora (16) de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, donde el sistema (16) comprende un caudalímetro de agua de lavado (22) que actúa por medio de un controlador Lógico Programable sobre los sopladores de presión (25) con controladores de velocidad variable, para controlar y mantener automáticamente la relación L/G .

5. El sistema de limpieza y mejora (16) de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, donde el sistema (16) comprende medios (18) para la limpieza y la mejora del biogás después de salir de la columna de burbujeo (21), incluyendo el medio (18) un equipo de enfriamiento (28) para enfriar el biogás mejorado (27) a 4 °C-6 °C, y filtros de adsorción con capas de un material seleccionado del grupo que consiste en: gel de sílice, tamices moleculares y/o carbón activado.

6. Una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) que comprende una instalación de tratamiento primario (20), un reactor biológico (23) como instalación de tratamiento secundario y un digestor anaeróbico (17) para el

tratamiento de sólidos, **caracterizado por que** comprende el sistema de limpieza y mejora (16) de biogás de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, estando conectado el sistema (16) a la estación entre la instalación de tratamiento primario (20), desde la que el agua residual se extrae y se conduce a la columna de burbujeo (21) y el reactor biológico (23) para el tratamiento secundario de la estación, al cual se conduce el agua residual usada como agua de lavado para la mejora del biogás, siendo el biogás a enriquecer el biogás producido en el digestor anaeróbico (17) de la estación y donde:

- la primera tubería de entrada (19) es una tubería procedente de la instalación de tratamiento primario de agua residual (20) a la columna (21),
- la segunda tubería de entrada (5) es una tubería que conduce el biogás producido en el digestor anaeróbico (17) de la planta a la columna de burbujeo (21);
- y la salida de agua de la columna (21) está conectada a la tubería que conduce por gravedad el agua residual tratada primaria utilizada para mejorar el biogás al reactor biológico (23) de la propia estación utilizado para el tratamiento secundario, para regenerar dicha agua residual.

7. Un método para limpiar y mejorar biogás usando el sistema de limpieza y mejora (16) descrito en una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizado por que** el método comprende:

- a) inyectar una corriente de agua de lavado, que es agua residual tratada de primario procedente de la entrada de la estación de depuración de aguas residuales (EDAR), por gravedad a través de la primera tubería de entrada (19) a una velocidad descendente V que varía de 0,01 a 0,05 m/s a la primera zona (31) de la columna de burbujeo no presurizada (21) comprendida en el sistema (16);
- b) inyectar una corriente de biogás en la parte inferior de la primera zona (31) de la columna (21) a través de la segunda tubería de entrada (5) en condiciones de contracorriente por medio de uno o más difusores de burbuja fina (26) situados a una altura de 1,5 a 3 m por debajo de la primera tubería de entrada (19) y estando conectada al uno o más sopladores de baja presión (25) a una presión igual a o menor de 170 kPa (1,7 bar);
- c) poner en contacto las corrientes para producir una absorción física dentro de la primera zona (31) de la columna de burbujeo (21), a la temperatura del agua residual tratada primaria y a una relación líquido de entrada a gas L/G mayor de 1, sin entrada de energía;
- d) retener las burbujas finas en la segunda zona (32) de la columna (21) después de la etapa de absorción física, y finalmente extraer el agua residual tratada primaria (29) de la columna (21) de modo ascendente a través de la tercera zona (33);
- e) recoger el biogás mejorado (27) por absorción física en la zona de retención situada en la parte superior de la columna (21), por encima de la primera zona (31) y del nivel de la primera tubería de entrada (19); y
- f) regenerar el agua de lavado usada (29) en el proceso de mejora dentro de la columna (21), saliendo dicha agua de lavado (29) de la columna de burbujeo (21) después del proceso de absorción y siendo conducida a los medios de regeneración que son el propio reactor biológico (23) de la instalación de tratamiento de aguas residuales usado para el tratamiento secundario.

8. El método de acuerdo con la reivindicación 7, donde la relación L/G está comprendida entre 3 y 10.

9. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 7 u 8, donde el agua de lavado entra de modo ascendente a la tercera zona (33) después de la absorción física a una velocidad que varía entre 0,4 y 0,5 m/s.

10. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 7 a 9, donde la corriente de biogás se inyecta a través de la segunda tubería de entrada (5) hacia el fondo de la primera zona (31) de la columna de burbujeo (21) desde un digestor anaeróbico (17) de la propia estación depuradora de aguas residuales desde la que se inyecta el agua de primario tratada dentro la columna (21).

11. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 7 a 10, donde el método comprende la etapa de reciclado de agua desde la zona de retención de burbujas (32) a la zona de contacto (31) por medio de una bomba axial de reciclado de agua que conecta ambas zonas (31, 32), a una relación líquido reciclado a gas L_R/G dentro de la zona de contacto (31) de la columna de burbujeo (21) de más de 1 a 15.

12. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 7 a 11, donde el método comprende controlar automáticamente y mantener constante la relación L/G de la absorción física dentro de la columna (21) por medio de un caudalímetro del agua de lavado (22) que actúa por medio de un PLC (24) sobre los sopladores de biogás (25).

13. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 7 a 12, donde el método comprende una etapa de pulido del biogás mejorado (27) después de abandonar la columna (21) para obtener combustible para vehículos o inyección de red de gas, comprendiendo el método:

- enfriar el biogás mejorado (27) a 4 °C-6 °C y filtrar con filtros adsorbentes que comprenden capas de un material seleccionado del grupo consistente en: gel de sílice, tamices moleculares, carbón activado y cualquier combinación de los mismos.

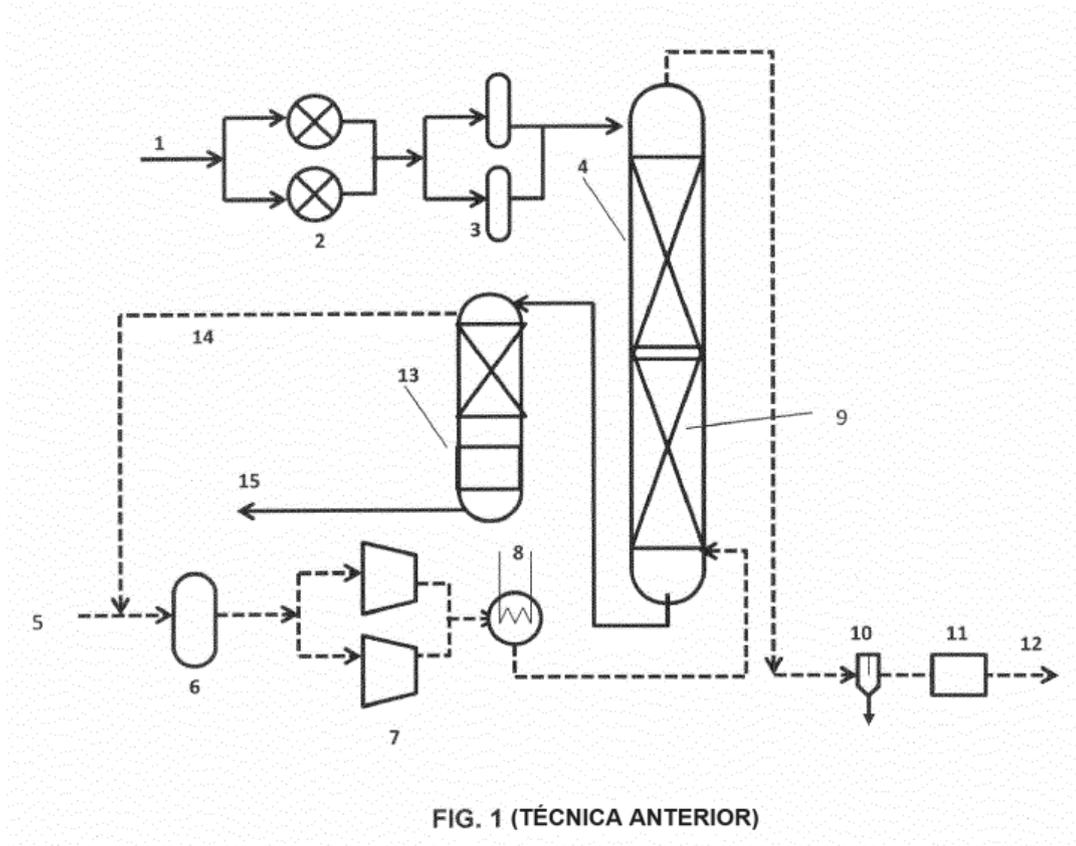


FIG. 1 (TÉCNICA ANTERIOR)

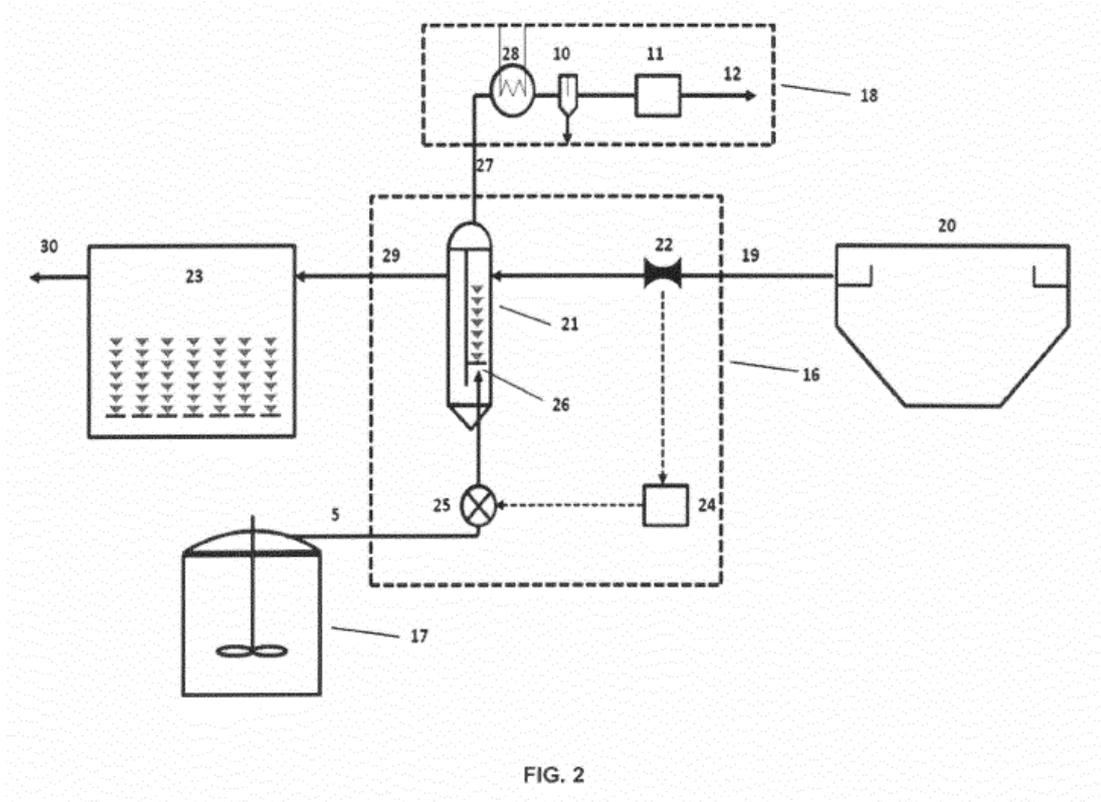


FIG. 2

