

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 439 567**

51 Int. Cl.:

C02F 1/00 (2006.01)
C02F 3/12 (2006.01)
C02F 3/34 (2006.01)
C02F 3/30 (2006.01)
B01J 8/18 (2006.01)
B01J 8/20 (2006.01)
B01J 8/24 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.10.2002 E 02801393 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.09.2013 EP 1444167**

54 Título: **Mejoras en y relativas a la expansión y la fluidización de lechos fluidizados**

30 Prioridad:

11.10.2001 GB 0124433

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

23.01.2014

73 Titular/es:

**ADVANCED BIOPROCESS DEVELOPMENT
LIMITED (100.0%)**

**All Saints Building, Legal Department,
Manchester Metropolitan University
All Saints, Manchester, M15 6BH, GB**

72 Inventor/es:

DEMPSEY, MICHAEL JOHN

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 439 567 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

Mejoras en y relativas a la expansión y la fluidización de lechos fluidizados

La presente invención versa acerca de mejoras en el diseño y la operación de lechos expandidos o fluidizados en los que se usa un fluido, particularmente un líquido, para transmitir la energía para la expansión del lecho. Un lecho expandido o fluidizado es aquel en el que las partículas están suspendidas en un flujo de fluido pero no se mueven sustancialmente con el flujo volumétrico de ese fluido. La definición clásica de lecho expandido en la ingeniería química es aquel que aumenta en volumen hasta el 50 o el 100% con respecto al del lecho cuando está estático, es decir, sin flujo de fluido; mientras que se define que un lecho fluidizado tiene un volumen más del 50 o el 100% mayor que el del lecho estático sin flujo de fluido. En particular, versa acerca de procesos biológicos como el tratamiento, la fermentación y la biocatálisis del agua y de aguas residuales. Para tales procesos, las áreas con necesidad de mejora incluyen la distribución del flujo de líquido; los costes energéticos para el bombeo y la aireación; el control del sobrecrecimiento de la biomasa; y materiales de soporte para la biomasa.

Las publicaciones recientes de la bibliografía científica han resaltado aspectos del diseño y la operación de los lechos fluidizados, que tienen necesidad de mejora. Por ejemplo, P. M. Sutton y P. N. Mishra ("Activated carbon based biological fluidised beds for contaminated water and wastewater treatment: a state of the art review", *Water Science and Technology*, Vol. 29 10-11: 309-317, 1994) señalan que "los componentes mecánicos y los subsistemas críticos para el diseño de realizaciones de sistemas comerciales de BFB (lecho fluidizado biológico) son los siguientes" y pasan a citar el distribuidor, la transferencia de oxígeno y el control del desarrollo de la biopelícula. Su monografía se basaba en una reseña de "más de 80 reactores comerciales de BFB basados en medios (que) se han instalado en Norteamérica y Europa".

En una reseña más reciente, C. Nicoletta, M. C. M. van Loosdrecht y J. J. Heijnen ("Wastewater treatment with particulate biofilm reactors", *Journal of Biotechnology* 80: 1-33, 2000) identificaron cuatro inconvenientes clave de la operación de los lechos fluidizados:

1. Formación de biopelículas en portadores, lo que plantea problemas que llevan a tiempos de arranque prolongados.
2. Dificultad del control del grosor de las biopelículas.
3. Sobrecrecimiento de las biopelículas, que lleva a la elutriación de partículas.
4. Coste elevado de los distribuidores de líquidos para sistemas fluidizados para reactores de gran escala y problemas asociados con respecto a la obstrucción y a la fluidización uniforme.

Desde la introducción de la tecnología de lecho fluidizado por líquido, se han concedido varias patentes para dispositivos para garantizar la distribución uniforme del flujo de líquido en la base del lecho. Estos incluyen el flujo descendente a través de toberas de expansión (por ejemplo, US4202774, US4464262, US4618418, US5584996); toberas con una rejilla o una plancha perforada encima (US4702891, US4933149); planchas distribuidoras perforadas similares a las usadas en los sistemas convencionales fluidizados por gas (US4322296) o con un lecho estático de calidades basta y fina de arena por encima (US5965016); o simplemente un lecho estático de material granular (US5895576), arena (GB780406) o ambos (GB2149683).

Si el flujo de fluido en la base del lecho es turbulento, ello da como resultado más impactos entre las partículas fluidizadas, lo que produce abrasión o, en el caso de partículas que porten una capa de reaccionante, la eliminación prematura de la capa de reaccionante de las partículas portadoras fluidizadas. El documento GB780406 da a conocer un distribuidor de material de partículas que comprende un lecho estático de arena que yace sobre una pantalla perforada con caudales de magnitud de 48,93 litros por metro cuadrado por minuto, o aproximadamente $0,08 \text{ cm}^3$ por cm^2 por segundo. Este bajo caudal a través del distribuidor es insuficiente para provocar el movimiento de sus partículas, y la enseñanza aquí es que el material granular se usa, de hecho, como una plancha perforada "tridimensional". En un intento por mejorar la característica del flujo de del fluido en un lecho fluidizado, Bernard Suchowski, Joseph E. Gargas, Robert H. Hyde y Joseph Pluchino (US5965016) propusieron el uso de partículas de arena mayores y más pesadas reunidas inmediatamente encima de una plancha distribuidora perforada, donde contribuyen a distribuir el flujo más uniformemente.

A pesar de esto, la presencia de la propia plancha perforada plantea restricciones físicas al flujo de fluidos.

Los inventores han descubierto que eliminando la plancha por completo y haciendo o permitiendo que las partículas de la capa distribuidora se muevan, pero sin que se fluidicen ellas mismas, se obtiene una mejora significativa en las propiedades del flujo de fluidos en la parte inferior del lecho.

En un aspecto de la presente invención se proporciona un método para mejorar el rendimiento de un lecho fluidizado según la reivindicación 1. Un lecho de material particulado se fluidiza mediante el paso de un medio fluidizante a través del mismo, y se caracteriza por la provisión de una capa distribuidora a través de la cual se hace o se permite que pase el medio fluidizante antes de atravesar el lecho fluidizado, seleccionándose la densidad de las partículas

de la capa distribuidora y el caudal del medio fluidizante de tal modo que se reduzca sustancialmente o se elimine la turbulencia en el medio fluidizante antes de que actúe en el lecho fluidizado.

5 Se porta como película o capa una biopelícula en un soporte de material particulado actuante como resto reaccionante del lecho fluidizado. El grosor de la biomasa sobre el medio portador inerte se controla permitiendo que las partículas que contienen exceso de reaccionante en la superficie sean eliminadas de la parte superior del lecho fluidizado para ser recicladas en la capa distribuidora, con lo que se quita un exceso de material de biomasa de las partículas portadoras mediante la acción de la capa distribuidora al pasar las partículas portadoras a través de la misma hacia el lecho fluidizado.

10 Además, también se ha observado que puede lograrse el control del grosor de la biopelícula sin reciclar partículas desde un extremo del lecho hasta el otro extremo.

Las interacciones en la superficie de contacto entre el distribuidor del lecho móvil y el lecho fluidizado causan la eliminación del exceso de biopelícula, lo que da como resultado una biopelícula más compacta.

15 La evidencia de la naturaleza más compacta de la biopelícula surge de observaciones de que el grado de expansión del lecho se redujo (de 117,5 a 98,0 cm), pero la altura del lecho estático siguió sustancialmente igual (52,9-53,3 cm); y de que el lecho empezó a compactarse más rápidamente una vez asentado partiendo del estado expandido, durante el periodo en el que ocurrió este efecto.

La invención proporciona, en un aspecto adicional de la misma, un aparato según la reivindicación 13 para mejorar el rendimiento de un lecho fluidizado

20 La capa distribuidora puede ser una capa de un material particulado que tenga una densidad mayor que la de las partículas que constituyen la propia capa fluidizada. La capa distribuidora es agitada por el medio fluidizante, pero ella misma no se fluidiza. Se requiere aquí que las partículas que constituyen la capa distribuidora se muevan con el flujo del medio fluidizado, pero que no se fluidice el propio lecho. Así, la capa de material distribuidor actúa limitando la turbulencia del flujo del medio fluidizante, turbulencia que es amortiguada por el movimiento de las partículas en la capa distribuidora. En consecuencia, el medio fluidizante sirve para fluidizar el lecho sin turbulencia indebida ni movimiento violento de las partículas que constituyen el lecho. Así, si el lecho constituye un material delicado, se reducen al mínimo la abrasión o el daño a las partículas que constituyen el lecho.

30 En una realización preferente de la invención, la capa distribuidora es una capa distribuidora móvil en la que el movimiento de las partículas de la capa distribuidora sirve para distribuir más uniformemente el flujo del medio fluido en la cara inferior del lecho fluidizado mientras que, a la vez, sirve para aminorar la turbulencia dentro del flujo de fluido. El resultado es un flujo de fluido sustancialmente laminar a través del lecho fluidizado que sirve para abrir la estructura del lecho fluidizado para permitir la interacción entre el medio fluidizante y las partículas que constituyen el lecho, promoviendo así la interacción entre ambos mientras que, a la vez, se reduce al mínimo la intensidad de las colisiones entre partículas dentro del lecho fluidizado.

35 Esto supera un problema que viene de antiguo de la tecnología del lecho fluidizado en el que, hasta ahora, el fuerte movimiento de material fluidizante dentro del centro del lecho o en yuxtaposición con la entrada de fluido ha causado una agitación excesiva del lecho y la falta de uniformidad de las condiciones de la reacción de un lado a otro del mismo. Según se ha expuesto en la introducción a la presente memoria, se ha usado una cantidad significativa de tecnología en términos de toberas, medios de inyección, planchas divisorias y similares en un intento por superar este problema.

40 La capa distribuidora puede ser una capa diferenciada por debajo del lecho fluidizado y, preferentemente, el solapamiento entre las dos capas es mínimo para reducir la abrasión y/o la eliminación del reaccionante de las partículas portadoras, aunque ha de alentarse cierta interacción mínima, ya que sirve para controlar la biopelícula y permitir su desarrollo en una forma más compacta. Normalmente, el medio fluidizante puede ser un líquido.

45 La persona experta en la técnica apreciará que el grosor de la capa distribuidora y el caudal del medio fluidizante pueden seleccionarse de modo que sustancialmente no se experimente turbulencia alguna en el lecho de reaccionante fluidizado como consecuencia del paso del medio fluidizante a través del mismo.

50 Aquí los parámetros precisos constituyen una especie de ejercicio de equilibrio. Cuanto más densas sean las partículas de la capa distribuidora, mayor será la cantidad de energía necesaria para producir el movimiento apropiado dentro de la capa distribuidora. Así, hay un compromiso entre la densidad de las partículas en la capa distribuidora con la presión/velocidad del suministro del medio fluidizante. Este equilibrio también resulta importante para obtener el beneficio del control de la biopelícula únicamente a través de interacciones en la superficie de contacto.

55 Se ha descubierto que la presente invención es particularmente útil en reacciones en lecho fluidizado o de fermentación que implican material biológico. Las partículas del lecho fluidizado están recubiertas con una capa de biopelícula como resto reaccionante.

Según un aspecto de la invención, en este caso particular el material particulado que constituye las partículas del lecho fluidizado puede ser el medio portador inerte para la biopelícula. En un aspecto adicional de la invención, el medio portador inerte puede ser un coque vítreo sobre cuya superficie queda inmovilizada la capa de biopelícula.

5 Se describe y se reivindica tal material en el documento nº GB99/03542 de los inventores. Las células se desarrollan de forma óptima sobre materiales ligeramente porosos, lo que les permite adherirse y permite que se desarrolle la biopelícula mientras que, a la vez, proporciona la mayor área superficial posible. Los coques vítreos, producidos por el tratamiento a alta temperatura de hullas bituminosas, tienden a dar los mejores resultados. Se requiere un coque con al menos una superficie ligeramente vidriosa o vítrea. Esto da como resultado un material que tiene una superficie sustancialmente inmune al paso de materia mineral de dentro del coque a la capa de biopelícula sobre el mismo. Por lo tanto, la presencia de la superficie "vidriosa" sirve para proteger a la biopelícula de los efectos de minerales y compuestos perjudiciales frecuentemente presentes en los coques. Sin embargo, normalmente el coque tendrá una composición sustancialmente uniforme y la naturaleza vidriosa del coque no está limitada únicamente a la superficie. Las partículas de coque vítreo pueden tener un tamaño sustancialmente en el intervalo de 0,25 a 2,50 mm; en una realización preferente, el tamaño de las partículas puede estar en el intervalo de 1,0 a 1,7 mm.

15 En muchos procesos, particularmente cuando hay implicada una biomasa, como, por ejemplo, en un tratamiento de aguas residuales, un proceso de fermentación o biocatalítico, el reaccionante del lecho fluidizado es una película de material de biomasa portado como una capa sobre las partículas de un portador fluidizado de material particulado. La presente invención tiene aplicación particular en tales disposiciones, ya que una característica sumamente valiosa de la invención es que permite un control sustancialmente automático del grosor de la capa de reaccionante sobre el medio portador inerte. En un biorreactor, se alienta que la capa de material biológico portada por las partículas individuales del lecho fluidizado crezca y se reproduzca. En consecuencia, se reduce la densidad total de las partículas (incluyendo la capa de biomasa o de biopelícula), con el resultado de que aquellas partículas que tengan un mayor grosor de biopelícula en la superficie tenderán a ser transportadas hacia arriba a través del lecho hacia la parte superior de la vasija del reactor y acabarán siendo sacadas de la propia vasija.

25 Los inventores han descubierto que, al volver a dirigir este suministro desde debajo de la salida de la vasija del reactor y reintroducir el material particulado o de biomasa en la base de la vasija del reactor, el efecto de la capa distribuidora es eliminar de la superficie de las partículas el material de la biomasa exterior y permitir que las partículas vuelvan a ocupar su lugar en la porción inferior del lecho fluidizado en la que la biomasa residual, en las fértiles condiciones dentro del lecho, empezará a producir nuevamente una nueva biopelícula.

30 En una realización alternativa, el equilibrio entre la velocidad de la entrada y, por ende, la cantidad de movimiento de la arena de sílice puede efectuar el control de la biopelícula sustancialmente por medio de interacciones entre el material distribuidor del lecho móvil y las biopartículas fluidizadas.

Las partículas recicladas pueden combinarse con medio fluidizante y antes de su introducción en la capa distribuidora, o, en una realización alternativa, las partículas recicladas pueden ser inyectadas por separado en la capa distribuidora.

35 En este segundo caso, se prefiere que la temperatura del líquido sea controlada dentro del intervalo de 13 o 22 grados centígrados, normalmente 14-21°C.

En una realización adicional de la presente invención, el lecho fluidizado puede contener una capa superior de desnitrificación encima de la capa de nitrificación. Esta capa adicional incorpora bacterias desnitrificantes para descomponer los nitritos y/o los nitratos producidos por las bacterias nitrificantes aerobias en la capa inferior de nitrificación. Permitiendo que la nitrificación prosiga casi hasta una fase en la que el líquido, en este caso agua, esté desoxigenado casi por completo, las condiciones son ideales para la conversión anóxica del nitrito/los nitratos resultantes en gas nítrico, eliminando así del líquido el nitrito/los nitratos.

45 Los microbios implicados en la desnitrificación son normalmente bacterias capaces de una "respiración anaerobia"; es decir, bacterias que respiran usando oxígeno, pero que también tienen la capacidad de usar oxígeno combinado químicamente cuando el oxígeno molecular (O₂) está presente en una concentración baja o está ausente. Fuentes de oxígeno combinado químicamente que las bacterias y las arqueobacterias pueden utilizar incluyen nitritos (NO₂⁻), nitratos (NO₃⁻), sulfatos (SO₄²⁻) y carbonatos (CO₃²⁻) y, operando el reactor de nitrificación de tal modo que se elimine todo el oxígeno molecular disuelto, los microbios desnitrificantes pueden respirar el nitrito y/o el nitrato. Así, y si el control de proceso es adecuado, el nitrito y/o el nitrato pueden convertirse en nitrógeno molecular (dinitrógeno, N₂), que vuelve a la atmósfera (aire = 78% de N). Cuando el control del proceso es inadecuado, pueden liberarse a la atmósfera los compuestos intermedios en la reducción del nitrato. Bacterias desnitrificantes adecuadas pueden ser una o más de:

55 *Achromobacter piechaudii* (*Alcaligenes piechaudii*), *Achromobacter ruhlandii* (*Alcaligenes ruhlandii*), *Achromobacter xylosoxidans subsp. denitrificans*, *Alcaligenes denitrificans*, *Alcaligenes xylosoxidans*, *Azoarcus toluolyticus*, *Azoarcus toluovorans*, *Azospirillum brasilense* (*Spirillum lipoferum*), *Azoarcus toluclasticus*, *Bacillus halodenitrificans*, *Blastobacter aggregatus*, *Blastobacter capsulatus*, *Blastobacter denitrificans*, *Candidatus "Brocadia anammoxidans"*, *Comamonas denitrificans*, *Flavobacterium sp.*,

5 *Flexibacter canadensis, Haloferax denitrificans (Halobacterium denitrificans), Halomonas campisalis, Hyphomicrobium denitrificans, Jonesia denitrificans, (Listeria denitrificans) Kingella denitrificans Neisseria denitrificans, Ochrobactrum anthropi, Paracoccus denitrificans (Micrococcus denitrificans), Pseudoalteromonas denitrificans (Alteromonas denitrificans), Pseudomonas denitrificans, Pseudomonas putida, Pseudomonas stutzeri, Roseobacter denitrificans, Roseobacter litoralis, Thauera aromatica, Thauera chlorobenzoica, Thiobacillus denitrificans, Thiomicrospira denitrificans, Thiosphaera pantotropha.*

Esta lista, sin embargo, no es exhaustiva.

10 El agua relativamente desoxigenada puede ser descargada desde la parte superior del lecho y hacerse o permitirse que rebose o caiga en cascada como una película delgada para efectuar la aireación rápida del medio. Alternativamente, puede ser reciclada a través de un aireador a contracorriente; es decir descendentemente desde la parte superior o cerca de la misma de una columna estrecha en la que aire, aire enriquecido con oxígeno u oxígeno puro borbotean hacia arriba desde el fondo o cerca del mismo. El diámetro de la columna está dimensionado de tal modo que la velocidad descendente del líquido que ha de airearse u oxigenarse sea ligeramente menor que la velocidad natural de ascensión de las burbujas de gas, que es normalmente de 22 centímetros por segundo para una burbuja de aire de 2 mm de diámetro que se eleva en agua tranquila y de 42 cm s⁻¹ para un montón de burbujas. Así, las burbujas se mantienen el mayor tiempo posible y, por lo tanto, tienen la máxima oportunidad de transferir oxígeno a la solución.

15 En un sistema plenamente operativo y según la presente invención otro subproducto útil es el material de biomasa de residuos, que puede ser envasado y vendido; por ejemplo, como fertilizante o comida para peces.

20 Un aparato típico según la presente invención puede incluir un reactor o torre generalmente vertical que incorpore medios para establecer un lecho de material que debe ser fluidizado en el que el medio fluidizante se introduce en la base de la torre para que pase ascendentemente a través del medio que ha de fluidizarse.

25 En una realización de este aspecto de la invención, el medio fluidizante puede ser inyectado directamente en la capa distribuidora sin pasar primero por una plancha de apoyo perforada o similar. En una realización preferente, la capa distribuidora debería tener, preferentemente, una densidad mayor que la de la capa fluidizada y debería formar una capa diferenciada por debajo de la del lecho fluidizado.

30 Resultará evidente para la persona experta en la técnica que, en ausencia de una plancha de apoyo, el tamaño de partícula de la capa distribuidora requerido para la operación efectiva del lecho fluidizado depende de la velocidad del medio fluidizante. Se prefiere que el tamaño de partícula de la capa distribuidora se seleccione de modo que, en las condiciones imperantes, las partículas que constituyen la capa distribuidora se muevan pero no se fluidicen ellas mismas.

En un aspecto adicional de la presente invención, el medio para establecer un lecho de material que ha de fluidizarse es, preferentemente, una torre o vasija del reactor vertical y el medio fluidizante se inyecta, preferentemente, en la base de la torre para que atraviese ascendentemente el medio que ha de fluidizarse.

35 La torre o vasija del reactor puede estar dotada de un conducto central para el suministro del medio fluidizante a través del cual pasa descendentemente el suministro de medio fluidizante hacia la base del reactor o torre, por lo que el medio fluidizante es inyectado descendentemente contra un elemento reflector para ser redirigido hacia arriba a través de la capa distribuidora y el lecho fluidizado. Los medios de inyección pueden incluir, por lo tanto, un conducto de suministro, que está dimensionado para que tenga suficientes pérdidas por rozamiento para permitir un grado de control sobre el flujo a través de él variando la altura hidrostática.

40 El lecho fluidizado transporta biomasa como una capa de reaccionante en la superficie del material particulado que constituye el propio lecho fluidizado. El grosor de la capa de biomasa sobre el medio portador se controla permitiendo que las partículas que contienen un exceso de biomasa en la superficie sean eliminadas de la parte superior del lecho fluidizado y sean recicladas e inyectadas en el lecho con el medio fluidizante de la manera descrita más arriba. En una realización alternativa, puede lograrse un control sustancial de la biopelícula simplemente a través de interacciones entre las partículas del distribuidor del lecho móvil y las partículas recubiertas de biopelícula.

45 A partir de lo anterior resultará evidente que será preciso que haya medios de control para controlar el caudal de fluido a través del lecho de reaccionante. Tales medios de control deberían incluir medios para muestrear la concentración de oxígeno en el fluido antes o durante la entrada al reactor y medios para muestrear la concentración de oxígeno del fluido o el líquido a su salida o después de salir del reactor. Pueden proporcionarse medios para regular el caudal de fluido que atraviesa el reactor y/o para detectar otros parámetros del reactor, de modo que la concentración de oxígeno al salir del reactor esté inmediatamente por encima de una concentración en la que la concentración de oxígeno sería controladora de la tasa para el proceso de nitrificación. En una realización de la invención, esta es de aproximadamente 0,1 a 0,3 mg/l. El aparato según la presente invención también puede incluir medios para airear el líquido que sale de la vasija del reactor. En este sentido, la aireación puede efectuarse haciendo que el líquido caiga en cascada sobre la parte superior del reactor y permitiéndole que caiga a través del aire para su recogida. En una realización alternativa, puede efectuarse la aireación reciclando el fluido desde el

extremo del lecho fluidizado distal al distribuidor hasta el extremo superior de una columna de aireación, en la que se inyectan burbujas de gas que contienen oxígeno en el extremo inferior, o cerca del mismo, y se elevan a contracorriente hacia el líquido que desciende, transfiriendo con ello el oxígeno con mayor eficiencia. Una eficiencia normal de la aireación en un proceso anterior a isocorriente de la técnica anterior es del orden del 3-6%, mientras que en la presente invención las eficiencias son del orden del 7-12% en el proceso a contracorriente de la presente invención.

Pueden proporcionarse medios para separar la biomasa desechada del reactor; tales medios pueden ser un depósito de sedimentación o hidrociclón. Puede lograrse otro medio de control del flujo de fluido a través del sistema proporcionando medios de depósito colector, medios de bombeo para bombear medio fluidizante al depósito colector y medios de suministro desde dicho depósito colector a los medios de inyección para el lecho fluidizado, siendo la disposición tal que el depósito colector proporcione suficiente presión hidrostática a los medios de inyección para mantener la capa distribuidora y para efectuar la fluidización del lecho. Por lo tanto, de esto se sigue que el control del caudal a través del aparato según la invención puede efectuarse controlando la altura hidrostática en el depósito colector. En un aspecto particular, los medios de inyección pueden incluir, por lo tanto, un conducto de suministro que esté dimensionado para que tenga suficientes pérdidas por rozamiento como para permitir un grado de control sobre el flujo simplemente variando la altura hidrostática aplicada al fluido que entra en el conducto.

Cuando se usan el método y el aparato de la presente invención en la purificación de agua, ocurre con frecuencia que se descargue agua residual en un depósito de desecho en el que tiene lugar una purificación adicional gracias a una filtración por membrana. Tal proceso es relativamente lento y muy caro de operar. De vez en cuando la membrana "se ciega" como consecuencia de que quede atascada por materia suspendida. Los inventores han descubierto, con sorpresa, que la proporción de materia suspendida y de residuos biológicos, incluyendo bacterias suspendidas viables en el agua purificada según la presente invención se reduce muy significativamente, con el resultado de que un tratamiento de filtración por membrana subsiguiente al tratamiento de nitrificación según la presente invención puede ir adelante con mucha mayor eficacia. La reducción media en la concentración de sólidos suspendidos usando el método del estándar británico (BS EN 872: 1996 BS 6068: Sección 2.54: 1996) fue de 2,4 mg/l, que equivalía al 21 por ciento; y la reducción media en número de *Escherichia coli* viables fue de casi el 80 por ciento.

Sigue una descripción, únicamente a título de ejemplo y con referencia a los dibujos informales adjuntos, de métodos para realizar la invención.

En los dibujos:

La Figura 1 es un gráfico que muestra el cambio en la altura del lecho estático antes y después de la adición de un lecho móvil de arena de sílice para contribuir a la distribución de flujo.

La Figura 2 es un gráfico que muestra la tasa de abrasión de un lecho fluidizado de coque vítreo, con y sin un distribuidor móvil de arena de sílice.

Las Figuras 3 a 9 ilustran diversas realizaciones del uso de una altura hidrostática fija para el aparato según la presente invención.

La Figura 10 es una representación esquemática que ilustra la técnica de control del grosor de la biomasa según la presente invención.

La Figura 11 es una representación esquemática de una versión alternativa bombeada de la realización mostrada en la Figura 10.

A pesar de una experiencia de muchos años de uso de coque vítreo como material de soporte de la biomasa en biorreactores de lecho fluidizado a escala de laboratorio, se observó mucha turbulencia en la zona inferior de la planta de nitrificación a escala piloto. Se estableció la planta particular, que tenía una distribución de flujo mediante una descarga descendente en un cono de 60°, un diseño común para esta escala de operación. Aunque la bibliografía científica describe una zona turbulenta por encima de algunos tipos de distribuidor antes de que se calme el flujo y se establezca una fluidización uniforme, se pensaba que este era un problema peculiar a materiales densos tales como la arena, con los que se requieren velocidades de flujo mayores para lograr la fluidización. Se hizo una observación similar en cierta medida con el coque vítreo, porque la zona turbulenta solo se extendía 30-40 cm hacia arriba en el lecho fluidizado, en comparación con una zona de 60-100 cm del lecho de chorro para un lecho fluidizado de arena en un reactor similar de escala piloto que tenga ajustada una plancha porosa encima del cono de entrada; véase P. F. Cooper y D. H. V. Wheeldon, "Complete treatment of sewage in a two-fluidised bed system", capítulo 7 de P. F. Cooper y B. Atkinson (editores), "Biological Fluidised Bed Treatment of Water and Wastewater", Ellis Horwood, Chichester, 1981.

La operación continuada del reactor piloto con coque se caracterizó por la producción de finos mediante abrasión fuerte. Esto llevó a que el agua recirculante se volviera negra y opaca de la noche a la mañana, requiriendo el desagüe regular del reactor para restaurar la claridad, aunque el caudal a través del sistema fuera equivalente a que todo el volumen se sustituyese aproximadamente cada dos horas. La operación continuó, ya que se esperaba que la

formación final de una biopelícula sobre las partículas de coque las protegiera de abrasión adicional, porque esto había ocurrido con biorreactores a escala de laboratorio. Desgraciadamente, tal colonización protectora no ocurrió. Las mediciones regulares demostraron que se perdía cada día aproximadamente un 0,3% de la altura original del lecho estático (Figura 1), lo que significaba que todo el coque se erosionaría en aproximadamente 10 meses. Obviamente, la tasa de abrasión superaba la tasa de colonización. Previamente, se había usado la descarga ascendente en una zona de expansión para biorreactores a escala de laboratorio con poca evidencia de abrasión del coque. La elevada tasa de abrasión a escala piloto resultó tanto más sorprendente, dado que se había descubierto previamente que el coque vítreo era mucho más duradero que el carbono activado.

En un experimento para intentar reducir el efecto generador de turbulencia del flujo de entrada en el lecho de coque expandido, se usó un equipo a escala de laboratorio. Este equipo era alimentado por una descarga ascendente de agua de grifo mediante una sección de expansión a un lecho de coque vítreo. A caudal elevado, esto imitaba el efecto generador de turbulencia visto con el reactor piloto. Se añadieron cantidades crecientes de arena de sílice hasta que hubo suficiente (8,5 cm de profundidad) para absorber la fuerza del flujo de entrada y distribuirlo de una manera suficientemente homogénea para producir un lecho fluidizado uniforme de coque, sin señal de turbulencia ni de chorros.

En la operación a escala piloto, se añadió arena de sílice incrementalmente en el biorreactor hasta que se notó el efecto de calma de la turbulencia. Esto requirió un lecho de arena de 10 cm de profundidad. Una vez que se había logrado la fluidización homogénea del coque, se desaguó el reactor para eliminar los finos acumulados y restaurar la claridad óptica. Incluso después de la operación durante la noche, el agua recirculante seguía siendo clara: la generación de finos se había detenido. De hecho, el agua siguió clara desde el momento en que se añadió arena como distribuidor de flujo de lecho móvil: la generación de finos por abrasión del coque se había detenido verdaderamente. Este hecho está claro con los datos de la altura del lecho estático presentados en la Figura 1. Además, la colonización del coque por bacterias nitrificantes empezó ahora y prosiguió a una tasa equivalente a casi el 0,1% de la nueva altura del lecho estático por día. El lecho crecía ahora en tamaño, en comparación con la continua disminución antes de la adición de arena.

El efecto inesperado de la adición de una capa de arena de sílice a la base de un lecho fluidizado de coque vítreo llevó a un experimento para comparar el grado de abrasión del coque con y sin arena. Se montaron dos columnas de 5 cm de diámetro y 50 cm de altura y se cargaron con una profundidad de 15 cm de coque vítreo o con una profundidad de 5 cm de arena de sílice y una profundidad de 15 cm de coque vítreo. Los lechos se alimentaron desde un depósito colector a una velocidad ascendente de 1,5-2,0 cm s⁻¹ y se permitió que rebosaran a un depósito de sedimentación. Las partículas de finos del coque asentadas en el depósito fueron recogidas por filtración de forma diaria y secadas hasta un peso constante. Aunque seguían abradiéndose finos del lecho de coque con el distribuidor del lecho móvil de arena, esta abrasión era aproximadamente la mitad de la tasa de cuando no había presente arena alguna (véase la Figura 2). Esto resulta sorprendente, dado que cabría esperar que las partículas más densas de arena colisionaran con mayor intensidad con el coque de lo que lo harían las partículas de coque por sí solas. Sin embargo, debido a la mayor densidad de la arena de sílice, esta no puede expandirse y llegar a fluidizarse a las velocidades ascendentes usadas con partículas de coque vítreo de un tamaño adecuado para la colonización por microorganismos. De hecho, resultó sorprendente descubrir que la masa de arena por área unitaria precisa ser tal que ejerza mayor "presión" que la caída de presión calculada de un extremo al otro del lecho de arena requerida para lograr la expansión antes de la fluidización. La capa de arena está en un estado mínimamente expandido, es decir, no fluidizado, y esto permite que el lecho de arena distribuya el flujo pero no se mezcle con el coque. Así, la tasa de abrasión del coque se hace menor que la tasa de colonización microbiana y puede iniciarse la formación de la biopelícula.

A partir de esta evidencia experimental, resulta evidente que la capa fluidizada debería ser significativamente menos densa que el material distribuidor del lecho móvil, valiéndose, como se vale, de la expansión y la fluidización de la capa superior menos densa, pero no del material distribuidor. Dado que la arena de sílice es un material de soporte de biomasa usado comúnmente para reactores de lecho fluidizado, debe usarse un material más denso, tal como granate o ilmenita, en combinación, como distribuidor del lecho móvil para tal soporte. Sin embargo, esta combinación requeriría más energía para la expansión y la fluidización del lecho de la que requiere el uso de coque vítreo y arena de sílice. Alternativamente, el uso de un lecho móvil de, por ejemplo, arena de sílice como distribuidor de flujo permitirá el uso de materiales de soporte de biomasa o biocatalizador tales como el carbono activado que, en otro caso, se erosionan con demasiada facilidad.

Convencionalmente, se bombea agua residual u otro líquido acuoso en la zona distribuidora de un lecho fluidizado para inducir la expansión del lecho. En el tratamiento de aguas residuales, esto da cuenta de aproximadamente el 40% de la energía requerida para operar el proceso. En emplazamientos inclinados es posible un sistema alimentado por gravedad, que reduciría considerablemente el coste energético. Aun sin un emplazamiento inclinado, usar bombas grandes y eficientes para elevar el agua residual hasta depósitos colectores, y proporcionar con ello una altura hidrostática para la expansión de muchos lechos a la vez, sería más eficiente energéticamente que el suministro por medio de bombas individuales. Esto ahorraría dinero a las empresas explotadoras y, por ende, al público, así como reduciría el daño medioambiental causado por la excesiva generación de energía. Además, mediante un diseño juicioso es posible regular automáticamente la expansión del lecho, sin intervención humana ni de máquinas, para tener en cuenta de variaciones en el flujo.

R. Badot, T. Coulom, N. de Longeaux, M. Badard y J. Sibony ("A fluidised-bed reactor: the Biolift process", Water Science and Technology Vol. 29 10-11 : 329- 338, 1994) describen un "lecho fluidizado" alimentado por gravedad, pero el sistema aquí descrito no es un auténtico lecho fluidizado. Es, más bien, un reactor de lecho circulante. Además, es un sistema trifásico (gas-líquido-sólido), no un sistema bifásico (líquido-sólido). Además, está diseñado con una entrada de flujo ascendente a través de una zona de expansión con forma de cono en la base.

Una característica interesante de la presente invención implica el uso de un tubo (10) que se extiende hacia abajo a través del lecho (12) desde un depósito colector integral o soportado independientemente (Figura 10). Este tubo está dimensionado para que tenga suficientes pérdidas por rozamiento para permitir un grado de control sobre el flujo a través de él variando la altura hidrostática, desde casi cero a decenas de centímetros, devolviéndose el exceso de flujo al interior del depósito colector mediante un dispositivo (14) de rebose. Este sistema de control automático es para permitir una variación sustancial en la expansión del lecho, lo que, a su vez, es para acomodar un cambio sustancial en el caudal del efluente. Tal cambio está causado, por ejemplo, por fluctuaciones diurnas o de tiempo húmedo a seco en el caudal de efluente. Se apreciará que en el tratamiento de aguas residuales, en condiciones secas el agua tendrá una concentración mucho mayor de nitrógeno que cuando está altamente diluida con aguas pluviales.

Los costes de bombeo del agua son significativamente elevados para cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales. En este aspecto de la invención, la expansión del lecho se induce por medio de un sistema de alimentación común de flujo por gravedad. Dado que la densidad del coque vítreo es baja en comparación con materiales convencionales de soporte de biomasa, como la arena de sílice, solo se requiere una altura hidrostática relativamente pequeña para la expansión. Para sistemas a escala de laboratorio, una altura hidrostática de 5-30 cm fue adecuada para producir un flujo suficiente para una buena expansión del lecho. El cambio ascendente de escala (hasta, por ejemplo, columnas de 50-200 cm de diámetro y 1-5 m de altura) no conlleva un aumento significativo de escala de la altura hidrostática salvo para tener en cuenta cualquier pérdida adicional por rozamiento.

Los cálculos a partir de la operación a escala de laboratorio, basada en el uso de una alimentación artificial o de un efluente de lodo activado, demuestran que puede lograrse una nitrificación casi completa mediante el paso secuencial a través de una serie de lechos, siendo igual el número de lechos a la concentración de amoníaco a la entrada menos la concentración requerida de descarga $\div 2$ o bien reciclando varias veces con una cascada de solo algunos lechos, calculándose de manera similar el número de reciclados y de lechos. Estos cálculos están basados en un sistema no presurizado en el que se suministra oxígeno desde el aire. Con sistemas presurizados o sistemas en los que se use enriquecimiento de oxígeno, el número de lechos o reciclados puede reducirse en proporción al aumento en la concentración de oxígeno disuelto lograda con ello. Durante condiciones de flujo elevado típicas del tiempo húmedo, cuando el amoníaco está más diluido (por ejemplo, $6 \text{ mg NH}_3\text{-N dm}^{-3}$), será suficiente un único paso a través de cada una de solo dos o tres columnas (véase la Figura 3). En contra de lo que dicta la intuición, se calcula que solo se requerirá el flujo bombeado para el reciclado para los flujos interiores de tiempo seco, porque entonces el amoníaco está más concentrado (hasta $25 \text{ mg NH}_3\text{-N dm}^{-3}$). Así, el diseño novedoso de los inventores únicamente requiere el bombeo del volumen mínimo de agua residual. Incluso para flujos de tiempo seco, únicamente se requerirá un solo reciclado, minimizando con ello los requerimientos energéticos. Así se minimizarán el tamaño, el coste y el consumo de energía de las bombas.

En emplazamientos distintos de los inclinados, será preciso bombear el agua residual hasta una altura por encima de la parte superior del lecho más elevado para producir suficiente altura hidrostática para la expansión del lecho. De ahí fluirá por gravedad, salvo para el flujo de reciclado en condiciones de tiempo seco o concentración elevada de amoníaco. Mediante un diseño juicioso, estaciones de bombeo y depósitos colectores comunes minimizarán los costes de construcción y operativos. Sin embargo, esta eficiencia de diseño depende de que se fabrique un colector para producir un flujo igual en cada módulo de lecho fluidizado. Las Figuras 3-7 ilustran diversas configuraciones de módulos de lecho fluidizado en disposiciones en cascada. Obviamente, no hay necesidad alguna de colocar un módulo encima de otro si se bombea efluente a cada módulo; por ejemplo en emplazamientos en los que haya disponible suficiente superficie de terreno y los costes de bombeo no sean prohibitivos (Figuras 8 y 9).

En el proceso del lodo activado para el tratamiento secundario (biológico) de las aguas negras, el suministro de aire comprimido supone hasta el 60% del coste energético. Cuando la demanda de oxígeno de proceso biológico es alta, se requiere el enriquecimiento con oxígeno del aire suministrado, lo que es aún más caro.

En los procesos biológicos convencionales de lecho fluidizado, como la nitrificación, para el tratamiento de aguas residuales, se suministra oxígeno a los microorganismos borboteando aire a través del lecho (véase, por ejemplo, la patente estadounidense nº 4490258) o suministrando al lecho un efluente preaireado (véase la patente del Reino Unido nº 1520895). La primera solución adolece de una excesiva eliminación de biomasa de las partículas de soporte, mientras que la segunda solución es cara. El aire es caro de comprimir y, cuando se complementa con oxígeno, la aireación es aún más cara. En algunos sistemas, el aire es sustituido por entero con oxígeno, ocasionando instalaciones de almacenaje caras y peligrosas.

Pese al gasto, los sistemas para suministrar oxígeno disuelto están diseñados para ser operados bajo presión, necesitando caras vasijas de presión de forma difícil de fabricar. La operación bajo presión aumenta la capacidad de transporte de oxígeno del agua residual según la ley de Henry. Sin embargo, una mayor concentración de oxígeno

disuelto puede llevar al menos a dos problemas cuando se descarga en el lecho fluidizado. En primer lugar, la menor presión en el lecho causa una desgasificación, provocando las burbujas resultantes que se elimine biopelícula de las partículas del material de soporte. En segundo lugar, el mayor contenido de oxígeno disuelto provoca estrés oxidativo en las bacterias, llevando al desvío de energía y materiales del proceso biológico deseado a la reparación y la protección de las células. En tercer lugar, la liberación de burbujas de gas en un lecho fluidizado tiende a convertirlo en un lecho recirculante, resultando en el establecimiento de una mezcla vertical rápida, alterando con ello la formación de gradientes físicos, químicos y biológicos.

Otra consecuencia de un lecho con circulación de aire es hacer que la concentración de oxígeno se equilibre en todo el volumen del líquido en la vasija. Aunque la mayoría de los procesos biológicos aerobios requiere únicamente niveles bajos de oxígeno disuelto, tiende a controlarse con una concentración mínima de 2 mg dm^{-3} , que se aproxima a una saturación del 20-30% con respecto al aire. Esto no solo disminuye la fuerza de impulsión de la transferencia de oxígeno, sino que también significa que no pueden lograrse zonas de diferente concentración de oxígeno. En los sistemas biológicos naturales, los gradientes de concentración de nutrientes, incluyendo el oxígeno, son importantes para establecer diferentes poblaciones de microbios, cada una de los cuales es idónea para procesos biológicos diferentes.

Por ejemplo, se requiere una concentración de oxígeno disuelto superior a $0,3 \text{ mg/l}$ para lograr una concentración de amoníaco residual inferior a 1 mg/l .

La operación de un lecho fluidizado de coque vítreo colonizado por una biopelícula nitrificante puede llevar al total agotamiento del oxígeno disuelto a medida que el agua residual atraviesa el lecho, dando tasas elevadas de nitrificación, a pesar de directrices industriales para mantener el oxígeno disuelto a una concentración mínima de 2 mg dm^{-3} . La operación sin borboteo de gas de esta manera permite que la concentración de oxígeno disuelto caiga lo bastante bajo para permitir que bacterias desnitrificantes usen el nitrito y/o el nitrato producidos por los nitrificantes aerobios más abajo. Por lo tanto, resulta posible tener una zona de desnitrificación encima de la de nitrificación, todo en el mismo biorreactor. Esto mejor significativamente la utilización de espacio y la eficiencia en costes operativos del sistema. Además, a la salida del lecho, el agua residual casi libre de oxígeno absorbe rápidamente oxígeno del aire o de otro gas que contenga oxígeno, que fluya o borbotee a contracorriente del flujo de reciclado del agua residual, haciendo que el oxígeno disuelto aumente hasta una concentración por encima del 85% en cuestión de segundos. Además, la eficiencia de esta transferencia de oxígeno a contracorriente es más del doble que la de la aireación convencional en el sentido de la corriente (eliminado un 7-12% de oxígeno en comparación con un 3-6%).

Es bien sabido que la fuerza de impulsión de la oxigenación es proporcional a la diferencia de presión parcial entre la fase gaseosa (aire, 100%) y la fase líquida (agua, inicialmente al 0% o cerca). Además, permitir que el agua desprovista de oxígeno caiga en cascada una distancia de solo 100 cm bajando por el exterior de una columna también causa una rápida reaireación, alcanzando un valor del 45-80% en el fondo.

Permitir que el agua residual rebose por la parte superior de la columna del lecho expandido y discurra bajando por sus lados crea una película delgada que contribuye a maximizar la tasa de transferencia de oxígeno. Para lograr la fluidización de partículas pequeñas de coque vítreo, el agua residual asciende por el lecho a una velocidad entre $0,5$ y $2,0 \text{ cm/seg}$, llevándole, por lo tanto, entre 50-200 segundos para subir $1,0 \text{ m}$. En cambio, una lámina de agua en contacto con una superficie vertical cae a casi $1,5 \text{ m/seg}$ (Grassmann, P. *Physical Principles of Chemical Engineering*, Pergamon Press, 1971). Así, cabe esperar que se forme una película de entre $40-160 \text{ }\mu\text{m}$ en torno a una columna de 10 cm de diámetro, y una de $400-1600 \text{ }\mu\text{m}$ para una de 50 cm de diámetro. La elevada velocidad de deslizamiento entre las fases gaseosa y líquida minimiza el grosor de la capa laminar limitante, maximizando con ello la tasa de transferencia de oxígeno. Se ha establecido para una columna de 10 cm de diámetro que se puede lograr un grado elevado de oxigenación (concentración de oxígeno disuelto del 45-80%) con una caída de solo $1,0 \text{ m}$. Cabe esperar resultados similares para una columna de 50 cm , especialmente si aumentan la caída, el grado de turbulencia o el área de la superficie de la película de agua, provocando con ello un aumento de la tasa de oxigenación.

Por lo tanto, se sigue que, construyendo módulos de lecho fluidizado con un depósito colector para suministrar aguas residuales y provocar la expansión del lecho, puede optimizarse la reaireación del agua residual permitiendo que fluya hacia abajo por el exterior de una vasija de reactor (Figuras 4-8). Así, se prescinde en buena medida de los costes energéticos principales del suministro de oxígeno.

Aunque el fomento del crecimiento microbiano como una biopelícula unida a pequeñas partículas de material de soporte de biomasa para la operación como un lecho fluidizado da claras ventajas al proceso, sí crea el problema del sobrecrecimiento de la biopelícula. Las investigaciones de la cinética de las conversiones bioquímicas en una biopelícula microbiana indican que a medida que aumenta el grosor de la película, las células alejadas más de $0,1$ o $0,15 \text{ mm}$ ($100-150 \text{ }\mu\text{m}$) de la superficie exterior quedan privadas de alimento, de oxígeno en particular (M. Denac, S. Uzman, H. Tanaka e I. J. Dunn, "Modelling and experiments on biofilm penetration effects in a fluidised bed nitrification reactor", *Biotechnology and Bioengineering* Vol. 25: 1841-1861). Por lo tanto, el control del grosor de la biopelícula puede tener ventajas significativas en términos de la eficiencia del proceso, garantizando que la mayoría de las células de la biopelícula cuente con un suministro de nutrientes u oxígeno suficientes.

Jeris, Beer y Mueller, de Ecolotrol, en la patente estadounidense 3956129, describen varios métodos para el control de biopelículas mediante su eliminación y su agitación mecánica. Estos métodos incluían un mezclador con “una cuchilla giratoria similar a una licuadora Waring”, o el “uso de aire comprimido o de pulverizadores de agua”. En invenciones posteriores, Jeris da a conocer “un agitador giratorio flexible” en la parte superior del lecho (patente estadounidense nº 4009098), un agitador mecánico montado en la parte superior del lecho (patente estadounidense 4009105 y patente estadounidense 4009099) o “hacer girar una cuchilla afilada o un agitador flexible” en la parte superior del lecho (GB1520895) o “hacer girar una cuchilla afilada o un agitador flexible” en la parte superior del lecho (patente estadounidense 4009099). Un trabajo posterior realizado en Ecolotrol por Hickey y Owens dio a conocer un sistema de control basado en una columna separadora dentro de la porción superior del lecho fluidizado, que se valía de varias disposiciones de agitadores para la eliminación de la biopelícula; véase la patente EP 0007783. Estas disposiciones de agitadores incluían una pala accionada por motor, un transductor para producir energía sónica, una bomba para la eliminación de partículas con biopelícula gruesa y el retorno de las partículas de biopelícula eliminadas, y un sistema bombeado similar, pero con un mezclador estático de línea o un medio para efectuar un cizallamiento hidráulico. Uno de los enfoques más novedosos para el control de biopelículas ha sido descrito en la patente estadounidense 4618418, en la que partículas de soporte recubiertas de una biopelícula gruesa son transportadas mediante elevación por gas hasta un borde del que rebosan a una zona de asentamiento. Estas partículas son transportadas descendentemente a continuación hasta un punto “... preferentemente un tanto a mitad de camino descendiendo la distancia entre el techo del espacio de reacción y el dispositivo de distribución del líquido...” para su reintroducción en el lecho fluidizado.

En todos los casos anteriores de dispositivos y métodos de eliminación de biopelículas, lograr el control requiere energía significativa y equipos mecánicos, requiriendo estos, además, mantenimiento y sustitución periódicos. Además, la biopelícula quitada debe ser eliminada del sistema y deshidratada antes de su eliminación, recuperándose las partículas del material de soporte de la biomasa eliminada para su devolución al lecho.

En la presente invención el control de la biopelícula puede llevarse a cabo con un coste energético mínimo y en un sistema sin ninguna parte móvil. Así, se minimizan los costes de instalación, operación, mantenimiento y sustitución. Normalmente, el lecho se expandirá mediante el crecimiento de la biopelícula, tendiendo a migrar las partículas que porten la biopelícula más gruesa hacia la parte superior del lecho debido a su disminución en densidad. Si se incorpora un dispositivo (14) de rebose en un punto del biorreactor (8) en el que haya de controlarse la altura del lecho, entonces el crecimiento adicional de la biopelícula provocará que las partículas con mayor grosor de recubrimiento entren en el dispositivo (14) de rebose (Figura 10). Se hace que estas partículas fluyan, por la influencia combinada de la gravedad y el flujo inducido por un inyector Venturi (16) situado inmediatamente antes del extremo de la corriente (18) de entrada que fluye hacia abajo (Figura 10). El medio fluidizante hace entonces impacto en la pared inferior (20) de la vasija del reactor e invierte su flujo hacia arriba y a través de la capa distribuidora y el lecho fluidizado (12).

Alternativamente, con sistemas bombeados, el dispositivo de rebose y el Venturi pueden ser externos, pero, de nuevo, situados inmediatamente antes de la entrada al lecho (Figura 11). Así, las partículas con la biopelícula más gruesa vuelven a entrar en el lecho en la zona más turbulenta, la del distribuidor. Además, si esa zona contiene un lecho de partículas pequeñas, densas y móviles (por ejemplo, arena de sílice) debajo de un lecho menos denso de material de soporte de la biomasa (por ejemplo, coque vítreo), entonces puede ocurrir una eliminación aún más eficiente de la biopelícula, dado que el coque recubierto de biopelícula atraviesa el lecho móvil inferior y la zona inferior del lecho fluidizado superior.

Se realizaron varios experimentos comparativos para comprobar la efectividad de la capa distribuidora en la contribución a la eliminación de la biopelícula.

Se trazaron gráficos, uno para el lecho expandido y el distribuidor del lecho móvil según la presente invención y el otro sin el material distribuidor.

Ventajas adicionales de este enfoque incluyen el regreso automático del material de soporte de la biomasa al lecho. Aunque estas partículas habrán sido depuradas de su gruesa biopelícula, seguirán reteniendo un número suficiente y una mezcla de bacterias para permitir el nuevo desarrollo rápido de biopelícula nueva. Así, se eliminan células moribundas y son sustituidas por otras nuevas. No solo eso, sino que se retienen en el sistema las células arrancadas, cuando las activas pueden contribuir a recolonizar las partículas depuradas y también contribuyen al rendimiento total del sistema antes de acabar siendo eliminadas por enjuague. La biomasa que abandona el sistema será o bien partículas de biopelícula o se hará que se acumule formando flóculos de biopelícula por las condiciones hidrodinámicas durante el paso a través del lecho. Esta materia microbiana acumulada es separada con una facilidad significativamente mayor del agua residual, ya sea por sedimentación, centrifugación, filtración u otras técnicas bien conocidas. En particular, permitir que el agua residual tratada salga del sistema mediante un hidrociclón concentrará la biomasa de la manera más eficiente energéticamente.

En diferentes aparatos, no se requiere el reciclado de partículas recubiertas por una biopelícula más gruesa desde la parte superior del lecho mediante un inyector. Con el debido equilibrio entre la velocidad del fluido de entrada y el momento de las partículas del distribuidor del lecho móvil, existe una interacción suficiente con el lecho fluidizado suprayacente de partículas como para efectuar sustancialmente el control de la biopelícula.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un método de tratamiento de un líquido que comprende hacer pasar dicho líquido a través de un lecho fluidizado de material particulado que contiene una capa de biopelícula, fluidizándose dicha capa por el paso de dicho líquido a través de la misma, y que comprende una capa distribuidora a través de la cual se hace o se permite que pase el líquido antes de que pase a través de la capa fluidizada, seleccionándose la densidad de las partículas de la capa distribuidora y el caudal del medio fluidizante de tal modo que se reduzca sustancialmente o se elimine la turbulencia en el medio fluidizante antes de que actúe en el lecho fluidizado, agitándose la capa distribuidora por el paso de líquido a través de la misma, pero sin ser ella misma fluidizada,
- 10 **caracterizado por que**
- el grosor de la capa de biopelícula sobre el material particulado se controla permitiendo que las partículas que contengan un exceso de la capa de biopelícula en la superficie sean eliminadas de la parte superior del lecho fluidizado para ser recicladas en la capa distribuidora, con lo que se quita un exceso de material de biomasa de las partículas portadoras mediante la acción de la capa distribuidora al pasar las partículas portadoras a través de la misma hacia el lecho fluidizado.
- 15 2. Un método según la reivindicación 1 en el que la capa distribuidora es una capa de un material particulado que tiene una densidad mayor que la de la capa fluidizada.
3. Un método según la reivindicación 1 en el que la capa distribuidora es una capa diferenciada por debajo del lecho fluidizado y en el que el solapamiento entre las dos capas es mínimo para reducir la abrasión y/o la eliminación del reaccionante de las partículas portadoras.
- 20 4. Un método según cualquier reivindicación precedente en el que el grosor de la capa distribuidora y el caudal del medio fluidizante se seleccionan de tal modo que, sustancialmente, no se experimente turbulencia alguna en el lecho de reaccionante fluidizado como consecuencia del paso del medio fluidizante a través del mismo.
- 25 5. Un método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4 en el que el material particulado del lecho fluidizado es un coque vítreo y en el que la biomasa que constituye la capa de biopelícula es inmovilizada como una biopelícula desarrollada sobre la superficie de las partículas de coque vítreo.
6. Un método según la reivindicación 5 en el que las partículas de coque tienen una superficie "vítrea" o ligeramente vidriada y un tamaño sustancialmente dentro del intervalo de 0,25 a 2,50 mm.
7. Un método según la reivindicación 6 en el que el coque vítreo tiene un tamaño de partícula de 1,0 a 1,7 mm.
- 30 8. Un método según la reivindicación 1 en el que las partículas recicladas se combinan con el medio fluidizante para su introducción en la capa distribuidora.
9. Un método según cualquier reivindicación precedente en el que el líquido es un medio que ha de nitrificarse y la biopelícula comprende una bacteria nitrificante.
- 35 10. Un método según la reivindicación 9 en el que se controla la temperatura del fluido hasta que esté dentro del intervalo de 13 a 22 grados Celsius.
11. Un método según una cualquiera de las reivindicaciones 9 o 10 en el que el lecho fluidizado contiene una zona superior de desnitrificación encima de la zona de nitrificación, zona superior que incorpora bacterias desnitrificantes para descomponer el nitrito y/o el nitrato producidos por las bacterias nitrificantes aerobias en la zona de nitrificación.
- 40 12. Un método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes en el que el medio fluidizante se descarga desde la parte superior del lecho y se le hace o se permite que rebose o caiga en cascada como una película delgada a través del aire para efectuar la aireación del medio.
13. Un aparato para el tratamiento de un líquido que comprende
- un lecho (12) de material particulado que contiene una capa de biopelícula que ha de fluidizarse,
- 45 una capa distribuidora (12) de material particulado a través de la cual se hace que pase el líquido sustancialmente antes de que pase a través de dicho lecho, con lo que se reduce sustancialmente la turbulencia en el medio fluidizante cuando pasa a través de dicho lecho fluidizado,
- medios (18) de inyección para inyectar una corriente de líquido a través de dicho lecho por medio de la capa distribuidora,
- 50 **caracterizado por** la provisión de

un medio para eliminar partículas del lecho fluidizado de una parte superior del lecho, y

medios secundarios (16) de inyección yuxtapuestos a la capa distribuidora, con los que las partículas del lecho fluidizado que contienen un exceso de biopelícula son eliminadas de la parte superior de dicho lecho e introducidas en el lecho fluidizado por medio de dicha capa distribuidora, con lo que se quita un exceso de biopelícula de las partículas portadoras mediante la acción de las partículas de la capa distribuidora al pasar las partículas portadoras ascendentemente hacia el lecho fluidizado.

- 5
14. Un aparato según la reivindicación 13 que incluye medios para permitir una interacción suficiente entre el material distribuidor y el material de biopelícula para efectuar de manera sustancial el control del grosor de la biopelícula.
- 10 15. Un aparato según las reivindicaciones 13 o 14 en el que la capa distribuidora tiene una densidad mayor que la de la capa fluidizada.
16. Un aparato según una cualquiera de las reivindicaciones 13 a 15 en el que la capa distribuidora es una capa diferenciada por debajo de la del lecho fluidizado.
- 15 17. Un aparato según una cualquiera de las reivindicaciones 13 a 16 en el que el medio de establecimiento de un lecho de material que ha de fluidizarse es un reactor o torre (8) vertical y en el que el líquido es inyectado en la base de la torre para que pase hacia arriba a través del medio de que ha de fluidizarse.
18. Un aparato según una cualquiera de las reivindicaciones 13 a 17 en el que la vasija del reactor o torre está dotada de un conducto central (10) para el suministro del medio fluidizante y descendentemente hacia la base del reactor o torre, por lo que el líquido se inyecta contra un elemento reflector para la redirección del mismo hacia arriba a través de la capa distribuidora y del lecho fluidizado.
- 20 19. Un aparato según una cualquiera de las reivindicaciones 13 a 18 para la nitrificación de un fluido en el que se hace pasar al fluido que ha de nitrificarse por un lecho de partículas inertes que contienen una capa de una biomasa que comprende bacterias nitrificantes, **caracterizado por que** las partículas portadoras inertes que constituyen el lecho del reactor incluyen una proporción sustancial de partículas de coque que tienen una superficie al menos "vítrea" o ligeramente vidriada y un tamaño sustancialmente dentro del intervalo de 0,25 a 2,50 mm, y **por que** las partículas contienen una biopelícula de bacterias nitrificantes en la superficie de las mismas.
- 25 20. Un aparato según una cualquiera de las reivindicaciones 13 a 19 que incluye medios de aireación del líquido.
- 30 21. Un aparato según una cualquiera de las reivindicaciones 13 a 20 que incluye medios de control para controlar el caudal de fluido a través del lecho del reactor.
22. Un aparato según una cualquiera de las reivindicaciones 13 a 21 que incluye medios de control para muestrear la concentración de oxígeno en el fluido antes o durante su entrada en el reactor, medios para muestrear la concentración de oxígeno en el fluido en o después de la salida del reactor y medio para la regulación del caudal de fluido a través del reactor, y/u otros parámetros del reactor, de modo que la concentración de oxígeno a la salida del reactor esté inmediatamente por encima de una concentración en la que la concentración de oxígeno sería controlante de la tasa del proceso de nitrificación.
- 35 23. Un aparato según una cualquiera de las reivindicaciones 13 a 22 que incluye medios para separar la biomasa desechada del reactor.
- 40 24. Un aparato según una cualquiera de las reivindicaciones 13 a 23 que incluye medios de depósito colector, medios de bombeo para bombear medio fluidizante a dicho depósito colector, medios de suministro desde dicho depósito colector a los medios (18) de inyección para el lecho fluidizado, siendo la disposición tal que el depósito colector proporcione suficiente fluido o presión hidrostática en los medios de inyección para mantenerla capa distribuidora y para efectuar la fluidización del lecho.
- 45 25. Un aparato según la reivindicación 24 en el que los medios de inyección incluyen un conducto (10) de suministro al efecto que está dimensionado para que tenga suficientes pérdidas por rozamiento para permitir un grado de control sobre el flujo a través de él variando la altura hidrostática.
26. Un aparato según una cualquiera de las reivindicaciones 13 a 25 en el que la capa distribuidora es arena de sílice.
- 50 27. Un procedimiento de tratamiento de aguas residuales que comprende un método de nitrificación según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12.
28. Un procedimiento de purificación de agua que comprende un método de nitrificación según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12.

FIG. 1

Cambio en la altura del lecho estático de 1,0 - 1,4 mm de coque antes y después de la adición de un lecho móvil de arena para contribuir a la distribución de flujo

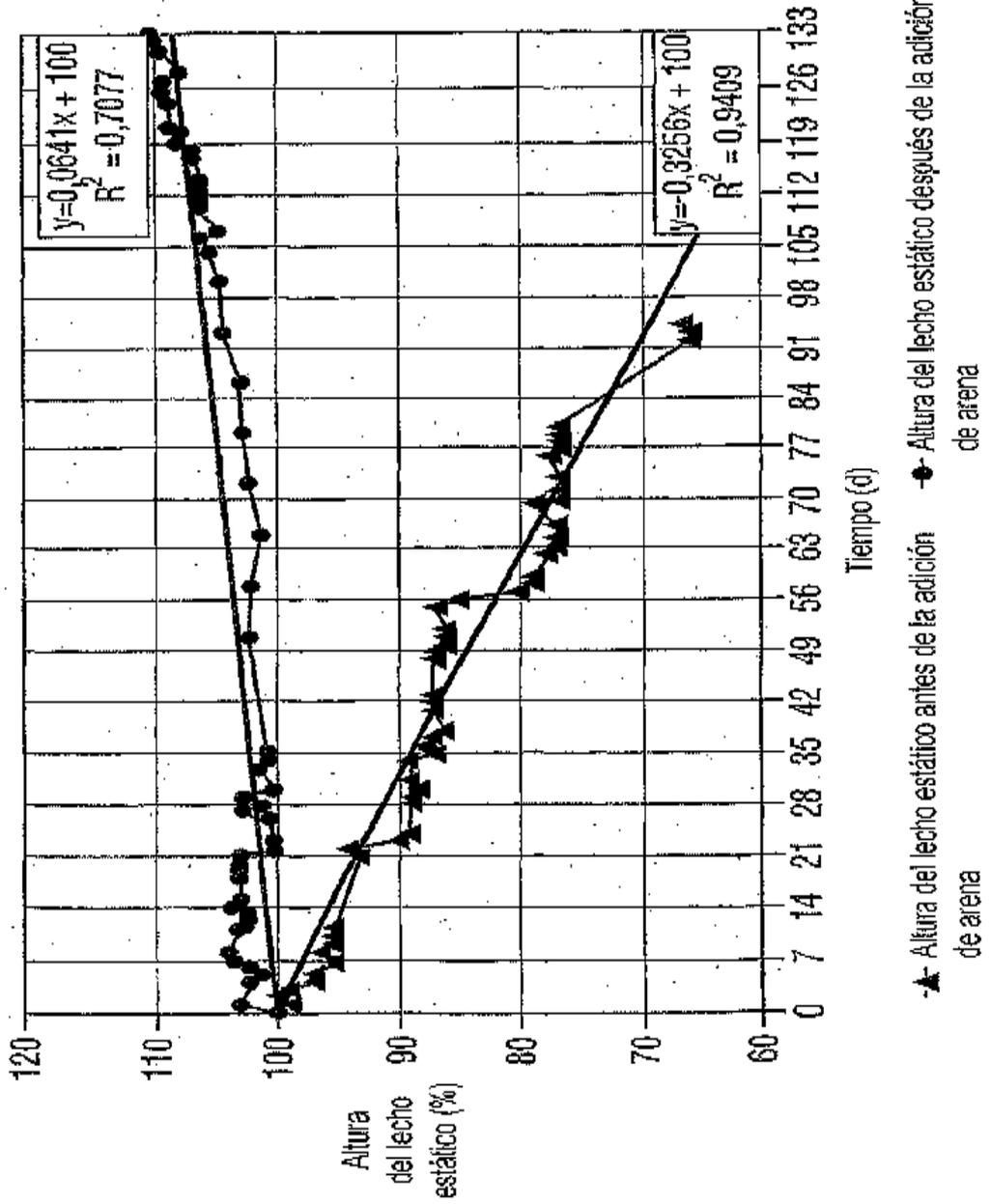


FIG. 2

Abrasión del coque, columna de 2 cm de diámetro; lecho estático de coque de 15 cm con o sin distribuidor de arena; suministro de depósito colector.

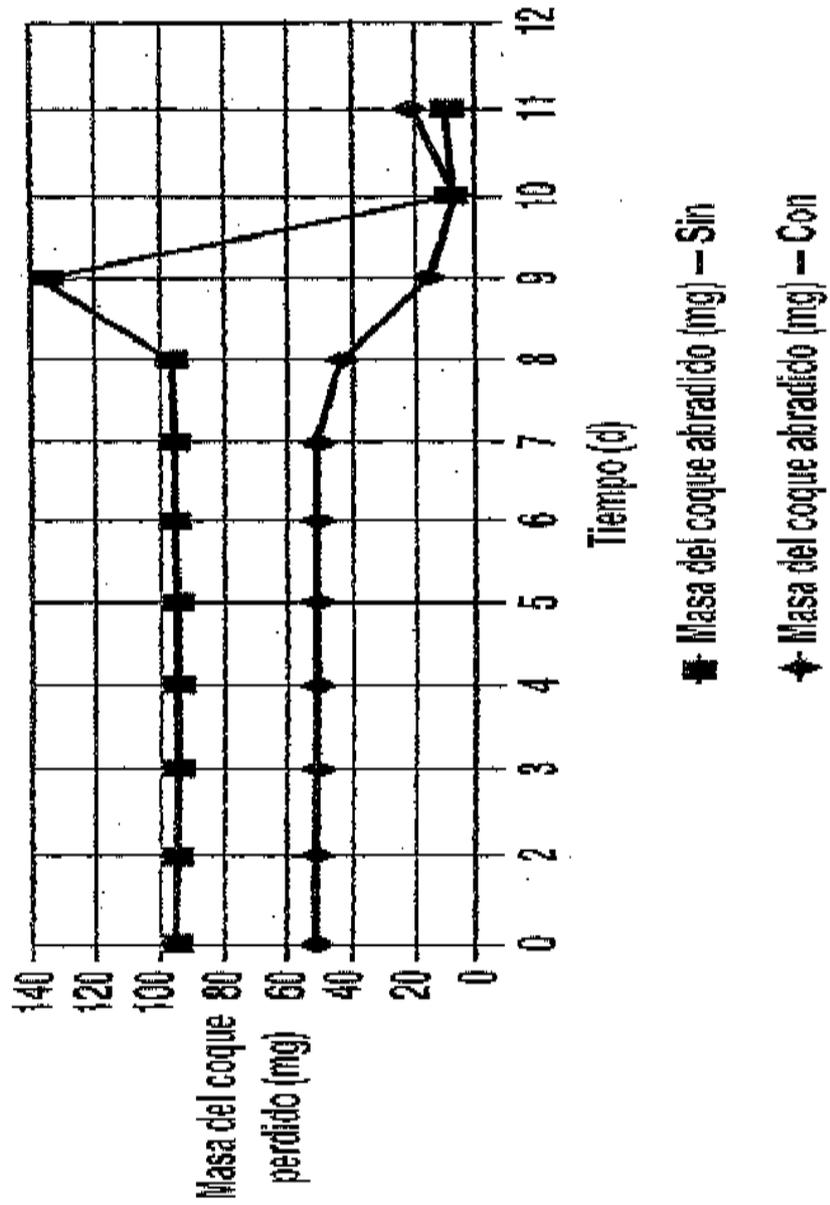


FIG. 3

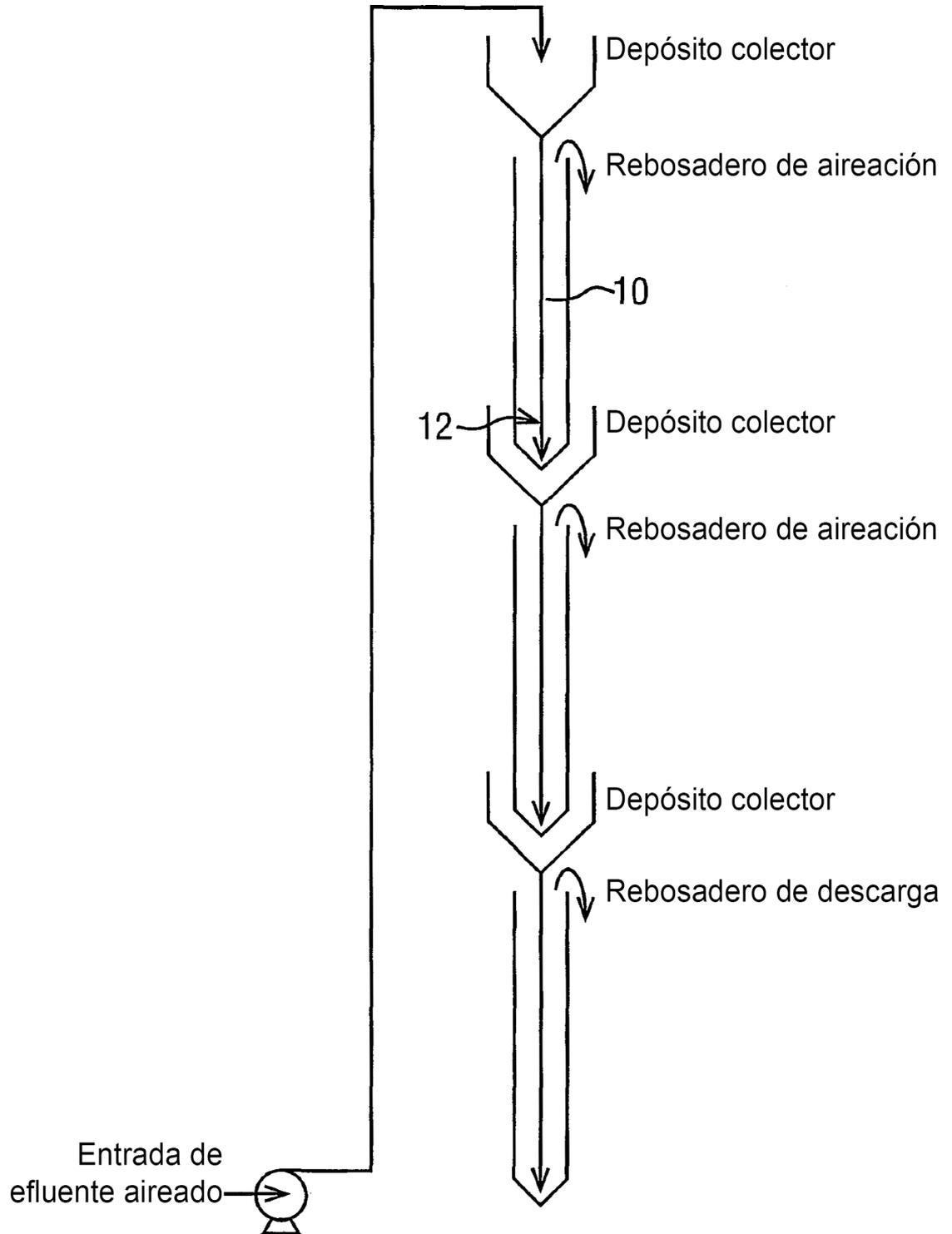


FIG. 4

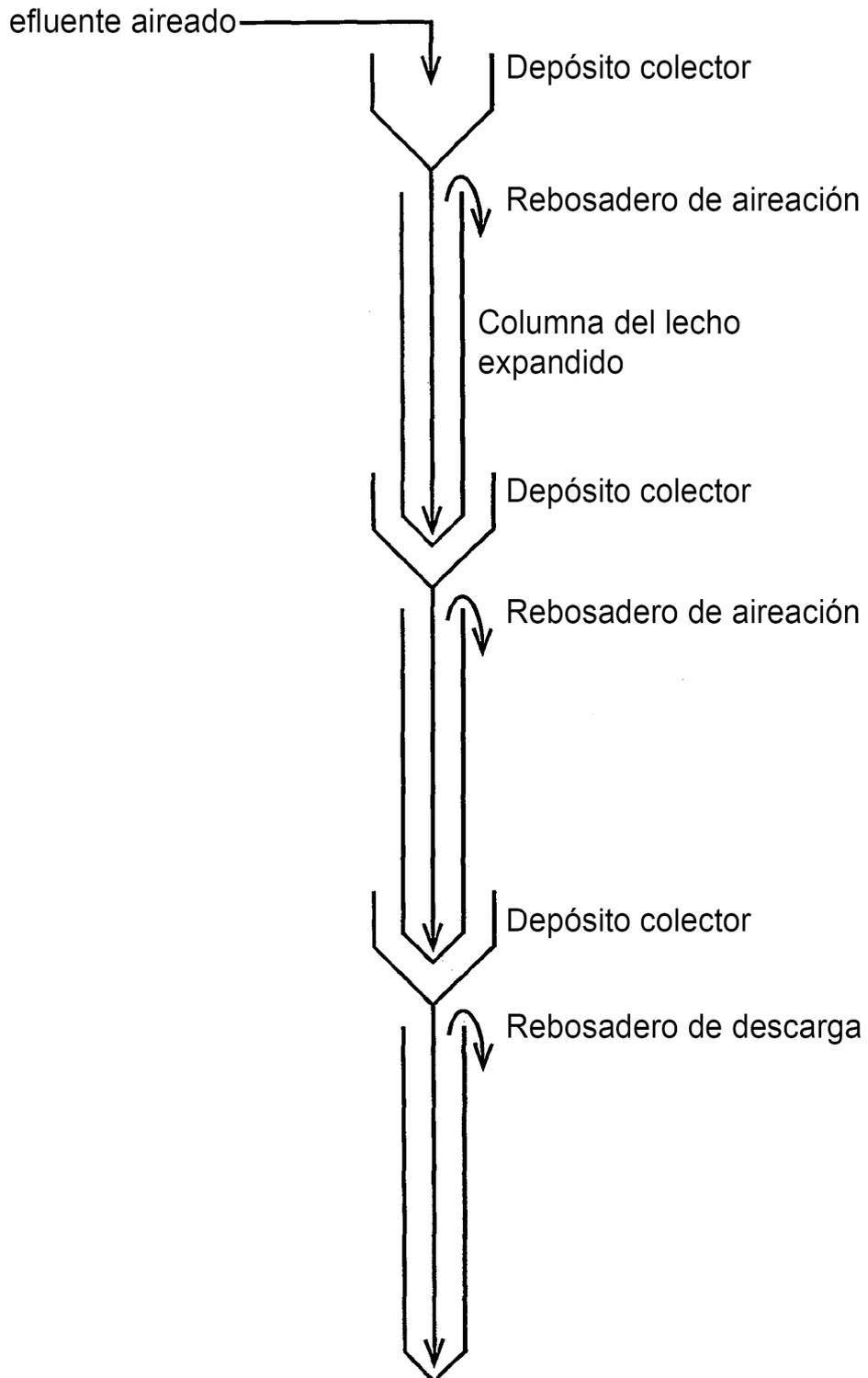


FIG. 5

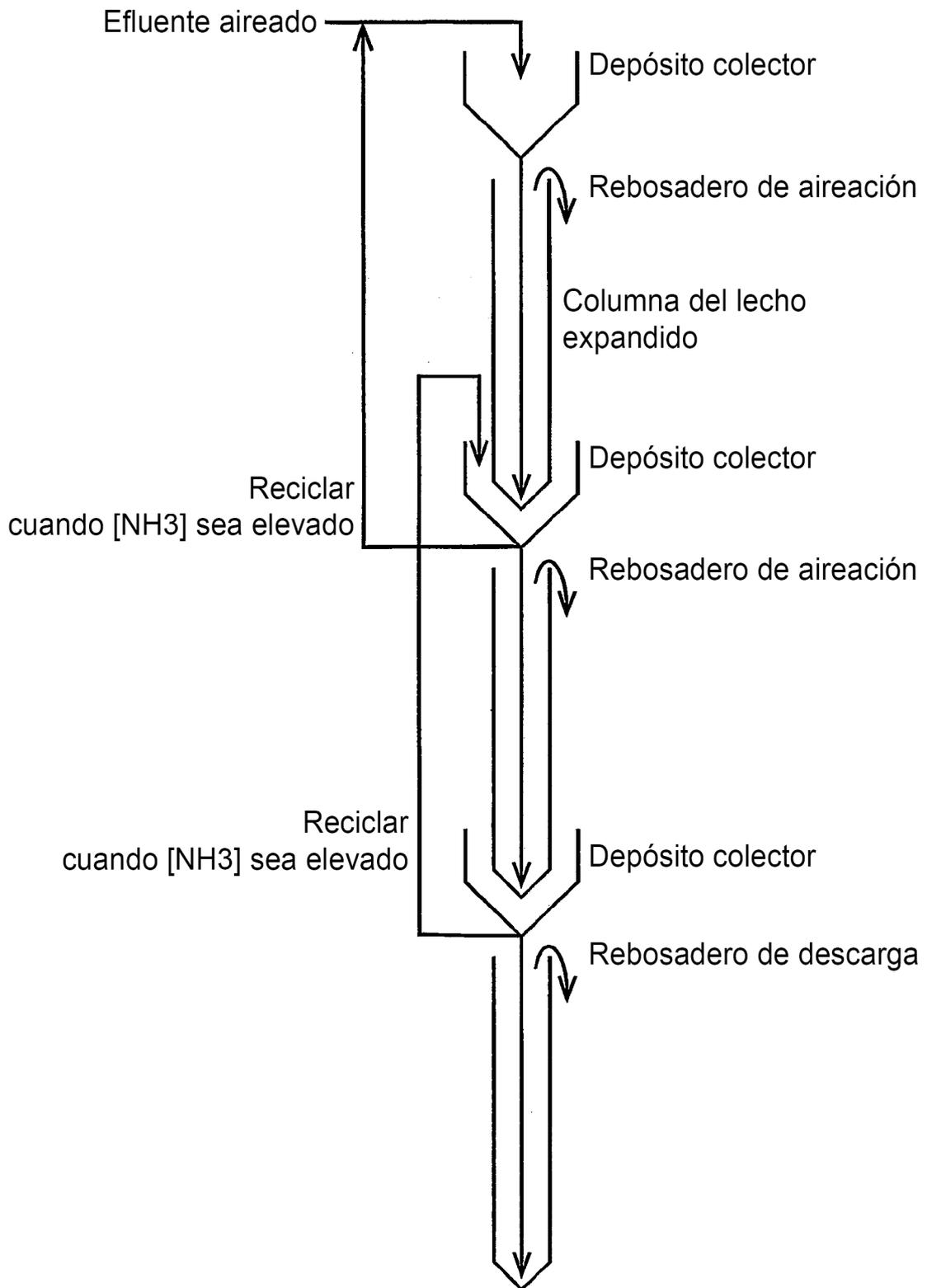


FIG. 6

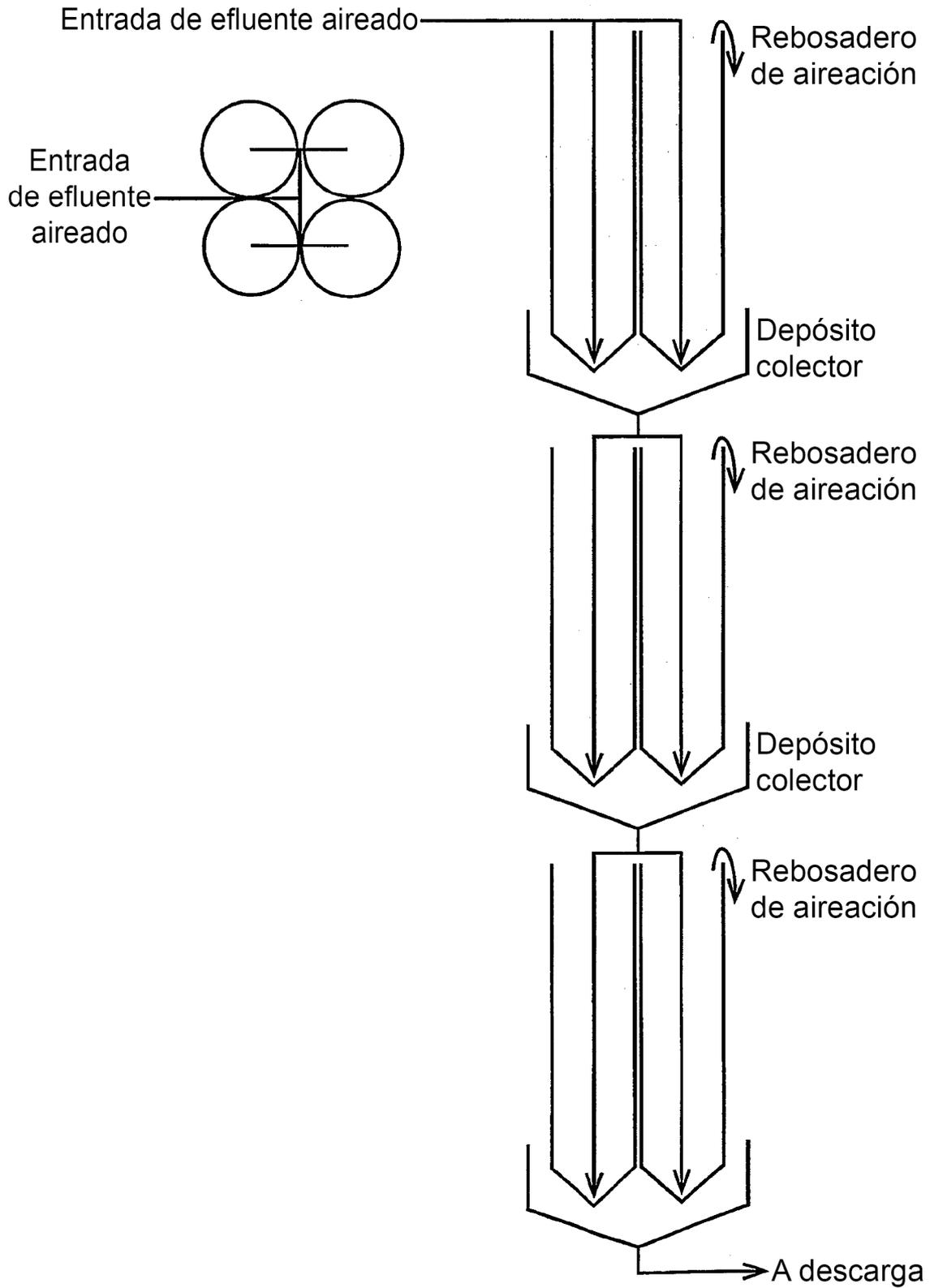


FIG. 7

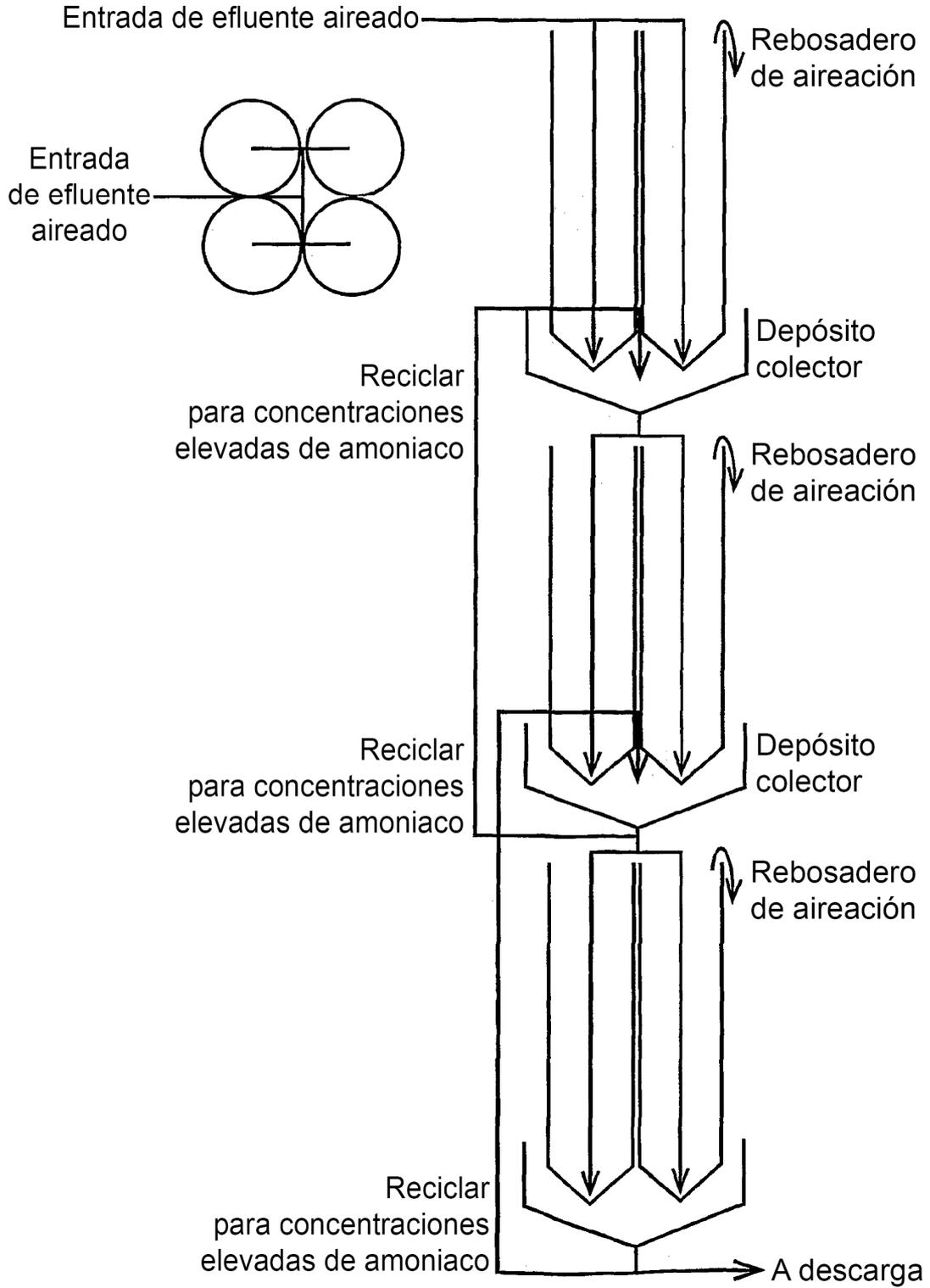


FIG. 8

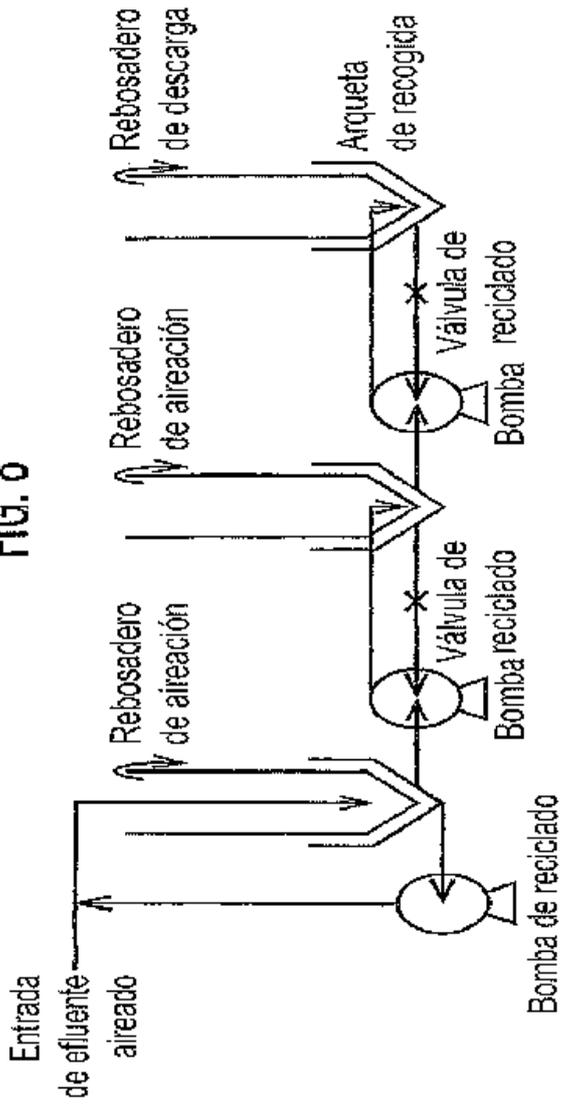


FIG. 9

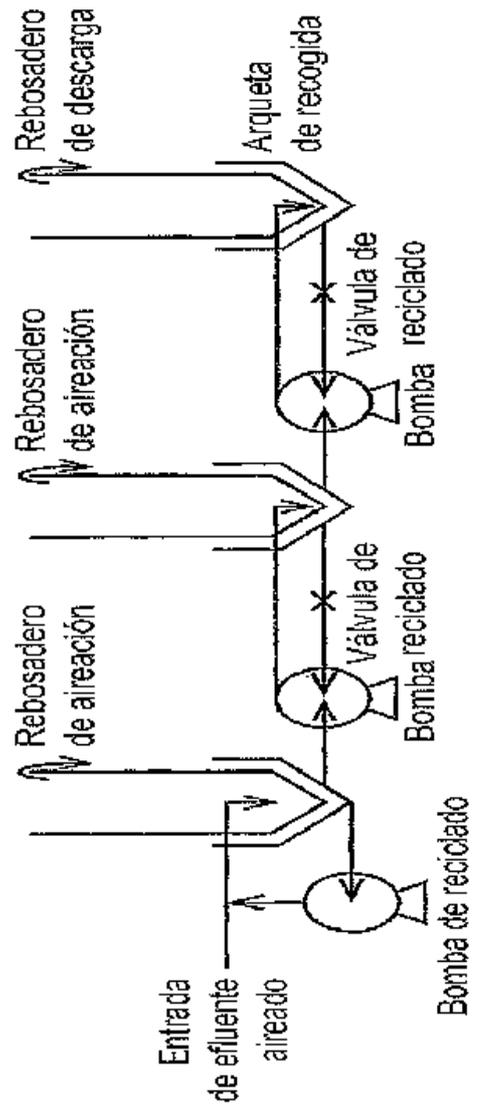
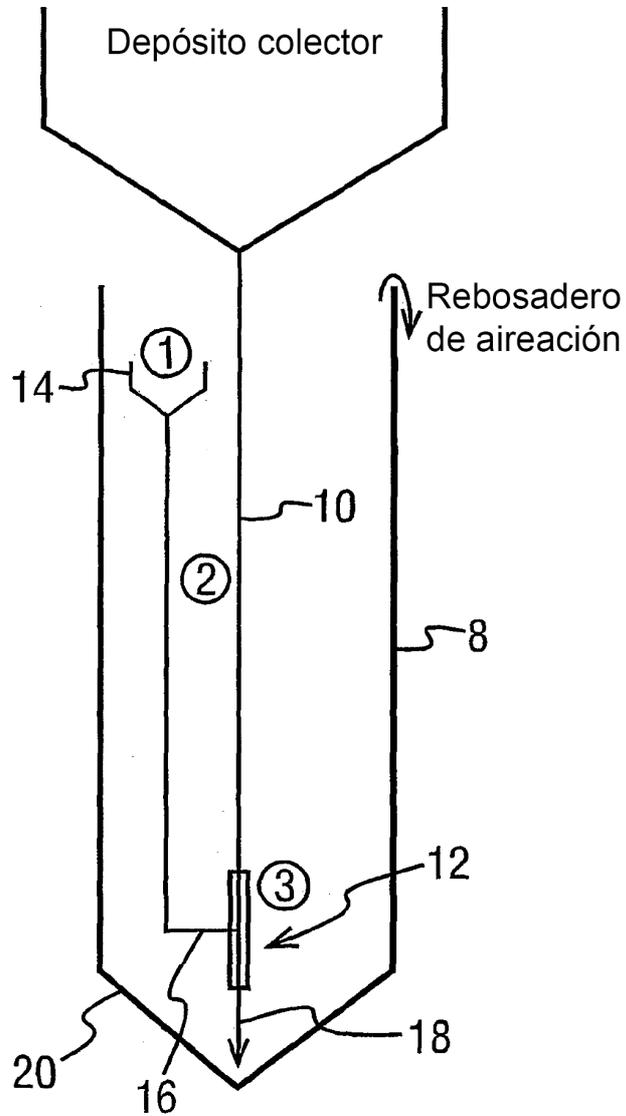


FIG. 10



1. Tolva para el rebose de partículas de recubrimiento grueso
2. Tubo de suministro para partículas de recubrimiento grueso
3. Venturi, para la inyección de partículas de recubrimiento grueso en la zona de entrada turbulenta

FIG. 11

