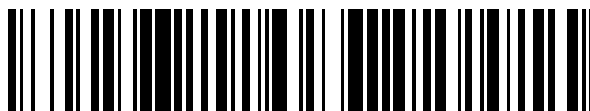


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 492 695**

51 Int. Cl.:

B01J 8/02 (2006.01)

B01D 53/047 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.08.2011 E 11757700 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.07.2014 EP 2624946**

54 Título: **Procedimiento que utiliza recipientes de lecho radial que tienen distribución uniforme del flujo**

30 Prioridad:

05.10.2010 US 897942

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

10.09.2014

73 Titular/es:

PRAXAIR TECHNOLOGY, INC. (100.0%)
39 Old Ridgebury Road
Danbury, CT 06810, US

72 Inventor/es:

CELIK, CEM E. y
ACKLEY, MARK W.

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 492 695 T3

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento que utiliza recipientes de lecho radial que tienen distribución uniforme del flujo

5 Campo de la Invención

La presente invención se refiere en general a la gestión de la distribución de flujo de fluido en procedimientos de purificación, separación o reacción que utilizan recipientes de flujo radial. Más específicamente, esta invención se refiere al diseño, procedimiento y aparato para el uso de recipientes o reactores de flujo radial para conseguir una distribución uniforme del flujo de fluido a través del lecho de material activo durante tales procedimientos.

10

Antecedentes de la Invención

Los procedimientos de purificación, separación o reacción de fluidos que utilizan materiales activos tales como adsorbentes y/o catalizadores son bien conocidos en la técnica y existen múltiples diseños de recipientes actualmente en uso para estos tipos de procesos. Los ejemplos de tales recipientes incluyen recipientes cilíndricos orientados tanto vertical como horizontalmente, con flujo de gas hacia arriba o hacia abajo a través del lecho de adsorbente y/o material catalítico durante el proceso. Un tercer tipo de recipiente, tal como se emplea en la presente memoria, está orientado con un eje central o longitudinal vertical y un diseño interno que dirige el flujo de gas de proceso radialmente a través del lecho. Este diseño de flujo radial consiste en un recipiente a presión cilíndrico que encierra cestas concéntricas interna y externa permeables a gases para contener un lecho de una o más capas de material activo. Un uso y ejemplo comunes de estos recipientes se encuentran en los procedimientos de adsorción para la separación o purificación de gases.

15

20

25

30

A medida que el tamaño de estos sistemas, en particular de los sistemas de separación de gases basados en adsorción, aumenta para satisfacer la creciente demanda de producto se presenta la necesidad de proporcionar recipientes a presión más grandes sin aumentar significativamente la huella (superficie de suelo ocupada) de los recipientes. Este es un reto difícil debido a que el mayor caudal de fluido exige un aumento proporcional en el área frontal de flujo de los recipientes. Los diseños de flujo radiales ofrecen la posibilidad de aumentar el área frontal de flujo mediante el aumento de la altura del recipiente sin alterar sustancialmente la huella del recipiente. Además, los diseños de flujo radial ofrecen un medio más eficiente de aumentar el área de flujo en comparación con los diseños de recipientes de flujo tanto horizontal como axial.

35

40

45

Un ejemplo comercial lo constituye la creciente demanda de unidades de separación criogénica del aire (ASU, por sus siglas en inglés) de mayor tamaño para satisfacer las necesidades crecientes de grandes cantidades de oxígeno y nitrógeno que se utilizan en diversos procesos industriales. Las ASU requieren recipientes de purificación (recipientes de adsorción) inicial para purificar la corriente de aire de alimentación mediante la eliminación de dióxido de carbono, agua, trazas de hidrocarburos y otros contaminantes antes de que el aire entre en la ASU. Esta eliminación se lleva a cabo típicamente mediante procedimientos de adsorción de gas. Las ASU de gran tamaño requieren mayores "unidades de pre-purificación", como se les conoce comúnmente, para tratar el aire de alimentación entrante antes del proceso de destilación criogénica. Las unidades de mayor tamaño representan un desafío para los diseñadores de recipientes cuando se trata de controlar el tamaño del recipiente, porque un mayor caudal de aire de alimentación requiere un aumento proporcional del área frontal de flujo proporcionada por los recipientes, lo que da como resultado recipientes de mayor tamaño y más costosos. Aunque en estas unidades de pre-purificación se utilizan muchos tipos de diseños de recipientes, los diseños de flujo radial son los que presentan mayor interés comercial para aplicaciones de ASU de gran tamaño.

50

55

Los recipientes de flujo radial, también denominados "recipientes de lecho radial", se caracterizan por un lecho empaquetado de material activo contenido entre al menos dos elementos cilíndricos concéntricos, porosos o perforados, fijados dentro del recipiente. Estos elementos cilíndricos son denominados comúnmente "cestas" y contienen entre ellos el material activo. Un fluido, por ejemplo un gas, que contiene dos o más componentes entra, bien sea por la parte superior o por la inferior del recipiente a presión, y es dirigido a un canal externo formado entre la pared sólida del recipiente a presión y la cesta porosa cilíndrica externa. Después, el fluido fluye radialmente a través de la pared porosa de la cesta externa, a través del lecho empaquetado de material activo, y sale a través de la pared porosa de la cesta interna a un canal central (canal interno) alineado con el eje del recipiente a presión. El fluido sale luego del recipiente a presión por la parte superior o la inferior del recipiente a presión, según se desee. Como alternativa, se puede dirigir el flujo de fluido a un canal interno y que salga del lecho a través del canal externo. Típicamente, si tal recipiente se utiliza en un procedimiento de purificación o separación de gases basado en adsorción, los gases de alimentación y de purga (de regeneración) fluyen a través del lecho y de los canales en sentidos respectivamente opuestos.

60

65

Se pueden diseñar los recipientes de lecho radial para que proporcionen una baja caída de presión y puedan aceptar caudales mayores sin riesgo de fluidificar el material del lecho, por el hecho de que el material activo está inherentemente constreñido en la dirección del flujo por las cestas concéntricas. Estos materiales pueden estar densamente "empaquetados" dentro del lecho para crear un volumen muerto reducido y mejorar la eficiencia del proceso. Sin embargo, tales recipientes y los lechos empaquetados situados en su interior pueden presentar una distribución no uniforme o inconsistente del flujo de fluido si están diseñados de forma incorrecta. Este problema de flujo, conocido como distribución incorrecta del flujo, conduce al afloramiento prematuro de impurezas en los

adsorbentes, a una baja eficacia de conversión en el caso de reactores químicos o, en general, a que pase fluido indeseado a través del lecho de material activo, lo que se traduce en un producto de menor pureza y baja eficiencia del proceso, con el correspondiente uso ineficiente del lecho.

5 Ya se han utilizado con anterioridad numerosos métodos para mejorar la distribución del flujo en recipientes de lecho radial. Por ejemplo, la patente de EE.UU. 5,759,242 utiliza una pared del recipiente externo ahusada para crear un canal externo cónico y por tanto lograr una distribución de flujo mejorada. Las patentes de EE.UU. 4,541,851 y 5,827,485 insertan un elemento distribuidor cónico dentro del canal interno para crear un efecto similar en el canal interno. Para mejorar aún más la distribución del flujo en un recipiente de flujo radial con canal externo ahusado, la
10 patente de EE.UU. 7,128,775 utiliza patrones de perforación variables en las cestas internas y externas. Como alternativa, la patente de EE.UU. 5,814,129 utiliza un deflector perforado alargado insertado en los canales para forzar una trayectoria en serpentin dentro de los canales interno o externo. Estas patentes utilizan diseños mecánicos complejos y/o equipo adicional instalado dentro del recipiente en un intento de mejorar la distribución del flujo. Tales medios complican la fabricación e incrementan el coste del recipiente. Por otra parte, ninguna de estas
15 patentes describe directrices de diseño, criterios o gama de condiciones de trabajo necesarios para lograr una distribución uniforme del flujo dentro de un recipiente de lecho radial. Las expresiones "recipientes de lecho radial" y "reactores de lecho radial" se utilizan indistintamente en la presente memoria para abarcar todos los procesos incluidos en la presente invención.

20 Diversos estudios académicos han investigado la distribución de flujo en reactores de flujo radial. En una serie de estudios, Heggis *et al.* (Gas Sep. Purif., vol. 8, nº 4, 257-264 (1994), Gas Sep. Purif., vol. 9, nº 3, 171-180 (1995), Gas Sep. Purif., vol. 9, nº 4, 243-252 (1995)) han investigado la distribución de flujo radial en un lecho de carbono anular de pequeño tamaño (0,34 m de diámetro, 0,26 m de longitud) mediante el desarrollo de un modelo de flujo para predecir los perfiles de presión en el lecho y los canales. La relación entre las áreas de sección transversal del tubo central y de la corona circular externa era 0,42, y la caída de presión máxima a través del lecho era 720 Pa
25 (0,1 psi).

Chang *et al.* (AIChE J., vol. 29, nº 6, 1039-1041 (1983)) llevaron a cabo un estudio analítico de reactores de lecho fijo de flujo radial de pequeño tamaño (0,12 m de diámetro, 1,0 m de longitud) para determinar el efecto de la
30 distribución no uniforme del flujo en la eficiencia de conversión del reactor. Llegaron a la conclusión de que el "flujo π " (flujo en los canales interno y externo en direcciones opuestas) es siempre mejor que el "flujo z" (flujo en la misma dirección en los canales interno y externo). Se sugirió que se obtendría un perfil de flujo ideal u óptimo cuando la relación entre las áreas de sección transversal del tubo central y de la corona circular fuera igual a uno y la relación entre la caída de presión en los canales y la caída de presión en el lecho fuera igual a cero, es decir, las resistencias de los canales fueran iguales a cero. Sin embargo, Chang *et al.* observaron también que la resistencia de los canales es finita y típicamente del orden de 20% de la resistencia del lecho. Los efectos de la porosidad del catalizador y del diámetro del recipiente sobre la distribución del flujo fueron caracterizados en términos de la relación de caídas de presión y de la diferencia de flujos entre el tubo central y la corona circular externa.

40 Más recientemente, Kareeri *et al.* (Ind. Eng. Chem. Res., 45, 2862-2874 (2006)) ha introducido la dinámica de fluidos por ordenador (CFD, por sus siglas en inglés) para investigar el efecto de la distribución del flujo en los fenómenos de anclaje o "pinning" en reactores de lecho móvil de flujo radial. Kareeri *et al.* realizaron una revisión de la bibliografía (la cita antes mencionada y muchas otras) y llegaron a la conclusión de que "los modelos analíticos y numéricos anteriores para estudiar la distribución de flujo en un reactor de flujo radial son limitados y bastante simplificados". En consecuencia, se desarrollaron modelos de CFD tridimensionales y se utilizaron para estudiar la
45 distribución de flujo en reactores de flujo radial de pequeño tamaño (0,5 m de diámetro, 1,68 m de longitud) con una caída máxima de presión en el lecho inferior a aproximadamente 160 Pa (0.023 psi).

Aunque los estudios académicos proporcionan herramientas y metodologías para predecir los perfiles de presión y flujo, las aplicaciones han estado dirigidas principalmente a reactores químicos y limitadas a recipientes a muy pequeña escala. Se han recomendado repetidamente configuraciones de "flujo π ". Los flujos bajos y pequeñas resistencias de canal que resultan de estos estudios en reactores pequeños producen inherentemente una mínima distribución incorrecta del flujo. Las resistencias de lecho muy bajas son demasiado bajas para ser prácticas o representativas de lechos en grandes reactores y purificadores a escala industrial. Ninguno de estos estudios aborda
55 los problemas que surgen cuando los flujos de entrada y de salida son sensiblemente diferentes, por ejemplo, en las separaciones de gran volumen. Por lo tanto, existe la necesidad de cuantificar los parámetros de los recipientes y de flujo requeridos para lograr una distribución uniforme de flujo en reactores y purificadores a escala industrial aplicables a una diversidad de configuraciones de flujo (por ejemplo, "flujo z" y "flujo π "). Además, dicha metodología debe tener éxito dentro de los requisitos estructurales impuestos, térmicos inducidos, y de fabricación, inherentes a los recipientes y los procesos a escala industrial. La presente invención aborda estas necesidades.

60 Para el funcionamiento satisfactorio de estos procesos resulta esencial lograr una distribución uniforme de flujo de fluido a través de recipientes de lecho radial a escala industrial. La geometría del recipiente (que incluye el tamaño de los canales interno y externo y el diámetro global del recipiente); la altura del lecho y la longitud de transferencia del lecho; las propiedades del lecho empaquetado (por ejemplo, el tamaño medio de partícula y la fracción de huecos del lecho o porosidad del lecho); las propiedades del gas (tales como la densidad y la viscosidad); y las

condiciones del proceso (tales como el caudal, la presión y la temperatura del fluido) contribuyen todos a la distribución del flujo en los recipientes de lecho radial. Un diseño adecuado del recipiente debe dar como resultado una distribución uniforme del flujo tanto en los flujos de fluido de alimentación como los de purga (regeneración). Así, en la presente memoria se proporcionan recipientes de lecho radial con canales interno y externo diseñados adecuadamente, y requisitos de caída de presión en el lecho, que conducen a recipientes que son menos costosos y más fáciles de fabricar, al tiempo que consiguen una mejor distribución del flujo.

Además de afectar a la distribución del flujo, la geometría del recipiente tiene también un impacto importante en el logro de un rendimiento óptimo del proceso. Por ejemplo, la duración del ciclo en procedimientos de separación cíclicos y la eficiencia de conversión en procedimientos de reacción dependen de la longitud de transferencia o profundidad del lecho. En otras palabras, la distribución del flujo y las prestaciones del proceso están interrelacionadas o acopladas, y esta relación puede variar con el tipo de proceso. A menudo se desea la configuración de "flujo z" que puede venir dictada por consideraciones externas de pérdida de calor, requisitos de canalización del proceso, etc. La enseñanzas anteriores han luchado con estas complejidades y sin embargo no se ha identificado ninguna enseñanza clara de cómo conseguir una distribución uniforme del flujo. Tales deficiencias son superadas en la presente invención, en donde se han desarrollado criterios específicos que pueden ser aplicados universalmente en configuraciones de lecho radial para lograr una distribución de flujo relativamente uniforme y, por tanto, superar cualquier degradación en el rendimiento del proceso causada por la distribución incorrecta de los flujos de fluido.

Breve resumen de la Invención

La presente invención consiste en un procedimiento de purificación, separación o reacción de fluidos que emplea un recipiente de flujo radial que presenta características de diseño que logran o dan como resultado una distribución uniforme del flujo de fluido en procedimientos de purificación, separación o reacción basados en catálisis. El recipiente de flujo radial es cilíndrico con cestas porosas internas que contienen un lecho de material activo. El recipiente está diseñado de manera tal que la relación entre las áreas de sección transversal de los canales interno y externo es proporcional a la relación de caudales másicos del gas de proceso que fluye a y desde los canales interno y externo, respectivamente. Además, el canal interno y el canal externo tienen cada uno un área de sección transversal, y el conjunto anular de cestas (que incluye al menos cestas porosas interna y externa) tiene una altura de lecho y una longitud de transferencia de lecho de dimensiones tales que la caída de presión dentro de los canales interno y externo es menor o igual que 10% de la caída de presión a través del lecho de material activo en las condiciones de funcionamiento del fluido de proceso.

En consecuencia, se proporciona un procedimiento de purificación, separación o reacción de fluidos que emplea un recipiente de lecho radial que comprende:

- una carcasa de recipiente sustancialmente cilíndrica que tiene un eje longitudinal vertical, una tapa superior y una tapa inferior;
 - una cesta externa porosa sustancialmente cilíndrica dispuesta concéntricamente dentro de la carcasa a lo largo del eje longitudinal y unida a al menos una de las tapa superior y tapa inferior;
 - una cesta interna porosa sustancialmente cilíndrica dispuesta concéntricamente dentro de la cesta externa porosa a lo largo del eje longitudinal y unida a al menos una de las tapa superior y tapa inferior del recipiente;
 - un canal externo sustancialmente anular dispuesto entre la carcasa del recipiente y la cesta externa a lo largo del eje longitudinal que tiene un área de flujo en sección transversal capaz de transportar ya sea un fluido de alimentación o un fluido producto;
 - un canal interno sustancialmente cilíndrico dispuesto dentro de la cesta interna a lo largo del eje longitudinal que tiene un área de flujo en sección transversal capaz de transportar ya sea un fluido de alimentación o un fluido producto;
 - un lecho sustancialmente anular compuesto por al menos una capa de material activo dispuesto en el espacio anular entre las cestas interna y externa;
- en donde:

la relación entre el área de flujo en sección transversal del canal que transporta el fluido de alimentación y el área de flujo en sección transversal del canal que transporta el fluido producto está en proporción a la relación entre el caudal másico del fluido de alimentación y el caudal másico del fluido producto, siendo la constante de proporcionalidad mayor o igual que 0,7 y menor o igual que 1,4; y

el lecho anular tiene una altura de lecho y una longitud de transferencia de lecho de dimensiones tales que el cambio de presión a lo largo de las longitudes de los canales interno y externo son en cada caso menores o iguales que 10% de la caída de presión a través del lecho en las condiciones de trabajo para el fluido particular empleado.

Breve descripción de los dibujos

Para una comprensión más completa de la presente invención, se debe hacer referencia a la siguiente descripción detallada tomada en conjunción con los dibujos adjuntos, en los cuales:

la Figura 1 es una representación esquemática del recipiente de flujo radial empleado en una realización de esta invención;

la Figura 2 es una serie de vistas esquemáticas de un recipiente de flujo radial que muestra diversas trayectorias de flujo a través del recipiente;

la Figura 3 es una vista en sección transversal horizontal del recipiente radial de la Figura 1;

la Figura 4 son dos vistas esquemáticas que muestran las direcciones de flujo del gas de alimentación y del gas de purga;

la Figura 5 es un gráfico que muestra el efecto de aumentar el flujo másico sobre la relación entre la caída de presión en los canales y la caída de presión en el lecho para una caída fija de presión en el lecho;

la Figura 6 es un gráfico que muestra el efecto de la relación entre el área de sección transversal del canal de alimentación y del canal de producto sobre la relación entre la caída de presión en el canal de alimentación (externo) y la caída de presión en el lecho;

la Figura 7 es un gráfico que muestra las caídas de presión en el canal interno, el canal externo y el lecho durante el flujo de alimentación; y

la Figura 8 es un gráfico que muestra los perfiles de velocidad del flujo de alimentación que entra (V1) en el lecho y el flujo de producto que sale (V2) del lecho a lo largo de la altura del lecho durante la etapa de alimentación del proceso.

Descripción detallada de la Invención

La presente invención es un procedimiento de purificación, separación o reacción de fluidos que emplea un recipiente de flujo radial diseñado con características que logran una distribución uniforme del flujo de fluido en procedimientos de purificación, separación o reacción de fluidos basados en catálisis o adsorción. El logro satisfactorio de una distribución uniforme del flujo es esencial para conseguir unas prestaciones óptimas de cualquier lecho de material activo, y tiene particular importancia el control de las características de distribución del flujo cuando el fluido fluye a través del lecho. La expresión "distribución uniforme" del flujo de fluido tal como se utiliza en la presente memoria significa que la variación en la magnitud de la velocidad en el lecho a lo largo de la altura del lecho (dirección axial) es menor de 5%, es decir, la magnitud del vector de velocidad radial en la cara de la cesta interna o externa varía en menos de 5% a lo largo de toda la altura de la parte porosa del conjunto de cestas o, como alternativa, a lo largo de toda la altura del lecho. La uniformidad en la distribución del flujo también se puede definir de manera similar por la variación mínima en la resistencia o la caída de presión a través del lecho de material activo a lo largo de la altura del lecho.

Para los fines de la presente invención, longitud de transferencia y profundidad del lecho son términos equivalentes que describen la distancia entre las cestas interna y externa, medida a lo largo de la dirección radial del recipiente. El fluido entra y sale del lecho anular en una u otra de las caras de las cestas interna y externa que tienen una velocidad orientada radialmente (denominada en lo sucesivo "velocidad radial"). Del mismo modo, el fluido fluye principalmente dentro de los canales interno y externo que tienen una velocidad orientada paralelamente al eje longitudinal del recipiente (denominada en lo sucesivo velocidad "longitudinal" o "en el canal") a medida que el fluido es arrastrado de manera uniforme desde el canal al lecho, o bien el fluido se dispersa uniformemente al interior los canales desde el lecho, a través de las perforaciones. "Altura del lecho" se refiere a la altura longitudinal total efectiva o de trabajo del lecho de material activo contenido entre las cestas porosas interna y externa. Para mayor claridad, es la altura del lecho a través del cual el fluido fluye radialmente.

Es importante señalar que, en reactores industriales de flujo radial de gran tamaño, se pretende para los fines de esta invención que la resistencia al flujo a través del material de la cesta perforada sea pequeña en comparación con la resistencia del lecho. A este respecto, el área abierta de las paredes de cesta es preferiblemente mayor de 15%, y muy preferiblemente mayor de 25%. Tales criterios mantienen una baja resistencia al flujo de la cesta y también proporcionan flexibilidad de diseño estructural para que las cestas satisfagan las cargas dinámicas y estáticas impuestas al conjunto de cestas. Así, la resistencia total del lecho/cesta al flujo está controlada por la resistencia del lecho de material activo en lugar de por el uso de una porosidad muy baja (área abierta \leq 5%) de la pared de la cesta, tal como sugirieron Kareeri *et al.* Un área abierta tan pequeña de las cestas perforadas da como resultado un flujo de alta velocidad en la cara de la cesta y en realidad puede crear zonas muertas dentro del lecho, en las cuales no se aproveche el material activo. Estas zonas muertas se encontrarían en zonas cercanas a la superficie de la cesta y detrás de las zonas sólidas de las paredes de la cesta. El uso de una pared de cesta con alta resistencia para producir una distribución de velocidades uniforme a lo largo de la cara de la pared crea una falsa indicación de flujo uniforme a través del interior del lecho de material activo. La intención de la baja distribución incorrecta de flujo en la presente invención es dirigir el fluido a través del lecho de modo que todas las partículas activas dentro del lecho se pongan en contacto de manera uniforme con el flujo.

Los procesos convencionales de purificación, separación o reacción a menudo emplean lechos empaquetados de manera suelta, y dicho empaquetado no uniforme contribuye a la dificultad de obtener una distribución uniforme de flujo a través del lecho. El empaquetado denso de lechos, tal como se describe en el documento de EE.UU. nº 5,836,362, produce un empaquetamiento más uniforme y estable de material activo dentro del lecho y también se traduce en una mayor caída de presión a través del lecho. Aunque no se requiere, el empaquetamiento denso del lecho mejora aún más los beneficios de la presente invención. El empaquetamiento denso se refleja en la densidad de empaquetamiento resultante o en la fracción de huecos del lecho, que dependen ambas de las propiedades

físicas del adsorbente. Para los fines de esta invención, la fracción de huecos del lecho (volumen entre partículas dividido por el volumen total del lecho) debe ser mayor o igual que 0,30 y menor o igual que 0,50, preferiblemente mayor o igual que 0,32 y menor o igual que 0,42. Influyen en la fracción de huecos la forma de la partícula, la amplitud de la distribución de tamaño de partícula y el grado en que el lecho está empaquetado a su máxima densidad. En general, se pretenden utilizar en los recipientes de flujo radial de esta invención partículas con un diámetro medio en masa igual o mayor que 0,5 mm y menor o igual que 5,0 mm, preferiblemente un diámetro medio en masa igual o mayor que 1,0 mm y menor o igual que $\leq 4,0$ mm. El tamaño de partícula "medio en masa", tal como se utiliza en esta memoria descriptiva significa el diámetro medio determinado al separar una muestra representativa del material activo a través de un conjunto de tamices de la serie de tamices de EE.UU. (ASTM E-11) y pesar las partículas retenidas en cada tamiz, con el fin de determinar la distribución de tamaño de partícula y el diámetro promedio por métodos bien conocidos por los expertos en la técnica.

Sin limitación, esta invención está dirigida preferiblemente a recipientes de flujo radial empleados en procedimientos de separación de gases basados en adsorción, tales como procedimientos para la separación de gases aprovechando diferencias en sus propiedades de adsorción. Son muy preferidos los recipientes de lecho radial empleados en procedimientos de separación de gases tales como la adsorción por oscilación de presión (PSA, por sus siglas en inglés), la adsorción por oscilación de vacío (VSA), la adsorción por oscilación de vacío y presión (VPSA) o la adsorción por oscilación térmica (TSA), procedimientos que son bien conocidos en la técnica. Por ejemplo, los recipientes de flujo radial son empleados para procedimientos (TSA) adaptados a la pre-purificación de aire antes de la separación criogénica del aire y para la separación a gran escala del aire utilizando procedimientos PSA o VPSA.

La distribución del flujo a través de un lecho empaquetado se refleja en los perfiles de presión (gradientes) resultantes en los canales interno y externo del recipiente. La diferencia de presión entre los dos canales en cualquier posición local a lo largo de la altura del lecho proporciona la fuerza impulsora para el fluido fluya a través del lecho empaquetado. Además, esta fuerza impulsora localizada debida a la presión (la caída de presión) a través del lecho determina la cantidad de flujo a través de cada segmento local del lecho a la altura correspondiente del lecho. El mantener una caída de presión uniforme a través del lecho en todas las posiciones locales a lo largo de la altura del lecho, minimizando al mismo tiempo la caída de presión en cada canal, asegura una distribución uniforme del flujo radial a través del lecho y dentro de toda la altura del lecho. Tal como se usa en la presente memoria, el término "lecho" se refiere a las una o más capas de material activo densamente empaquetado que llenan el volumen o espacio entre las cestas concéntricas dentro del recipiente. Una caída de presión a través del lecho (caída de presión en el lecho) relativamente mayor en comparación con el gradiente global de presión dentro del canal (caída o aumento de presión en el canal) permite que el fluido llene de manera uniforme los canales interno y externo y ayuda a evitar que el fluido fluya preferentemente a través de secciones dispares del lecho. De esta manera, el propio lecho es utilizado como un distribuidor de flujo y se evita la necesidad de fabricar recipientes complejos y/o costosos dispositivos o métodos de distribución de flujo.

Por conveniencia, en lo que sigue se nombrará el cambio de presión dentro de los canales como "caída de presión", que es el efecto más típico, aunque se pretende que esta invención incluya, no obstante, incrementos de presión, en los cuales la presión dentro de un canal puede incrementarse.

La caída de presión en los canales interno y externo, así como a través del lecho, se puede estimar razonablemente a partir de las condiciones del proceso, la geometría del recipiente y las propiedades y características del lecho, utilizando formulaciones analíticas cuidadosamente seleccionadas. Esta metodología de estimación de la caída de presión se aplica luego en el ajuste de los parámetros del recipiente a fin de satisfacer los criterios antes desarrollados respecto a la distribución uniforme del flujo, es decir, una caída de presión en los canales interno y externo pequeña en comparación con la caída de presión en el lecho. En particular, se pueden determinar los tamaños del canal interno, del canal externo, la longitud de transferencia del lecho (profundidad del lecho) y la altura del lecho que proporcionen distribuciones uniformes del flujo para unas condiciones de trabajo dadas del lecho y del proceso. Más específicamente, estas predicciones de presión se pueden utilizar para diseñar un recipiente de flujo radial con sus canales interno y externo dimensionados de modo que garanticen que la relación entre las áreas de flujo en sección transversal de los canales sea sustancialmente igual a la relación entre los caudales máxicos que entran y salen del recipiente y que las caídas de presión en los canales sean como máximo 10%, y preferiblemente como máximo 5%, de la caída de presión en el lecho.

Aunque no se pretende limitar el alcance de esta invención, la invención se describirá a continuación con referencia al procedimiento preferido de adsorción de gases. En el diseño de un lecho y recipiente de adsorción, la cantidad de material adsorbente necesaria está determinada por el tipo de proceso, los contaminantes a eliminar y la pureza y rendimiento deseados en el producto. Otros factores importantes de diseño incluyen el caudal másico, las condiciones de proceso (por ejemplo, duración del ciclo, presión, temperatura) y las características físicas y químicas del material adsorbente. El tamaño y la geometría de las cestas están definidos por el radio interno y externo del lecho (la diferencia entre estos parámetros es conocida como "longitud de transferencia del lecho") y la altura del lecho. Los tamaños de los canales interno y externo para un caudal másico, longitud de transferencia del lecho y altura del lecho dados se deben diseñar correctamente tal como se ha descrito más arriba para lograr una distribución uniforme del flujo. Después se determina la geometría global recipiente a partir de estas

consideraciones. La distribución incorrecta del flujo a lo largo de la altura del lecho conduce al afloramiento prematuro de gas o impurezas adsorbidas, hacia el canal de producto, lo que finalmente se traduce en la infrautilización de adsorbentes y menores prestaciones del lecho. Un proceso con una utilización eficiente y maximizada del lecho requiere típicamente una variación inferior a 5% en la velocidad de flujo radial a lo largo de toda la altura del lecho. Del mismo modo, un elevado aprovechamiento del lecho requiere una variación relativamente pequeña de la caída de presión en el lecho a lo largo de toda la altura del lecho.

En un reactor o recipiente con flujo distribuido de manera uniforme, cada partícula o segmento de lecho que contenga partículas adsorbentes está expuesto a, o bien trata de cualquier otra manera, aproximadamente el mismo número de moléculas de fluido del gas de alimentación. Cuando el flujo no está uniformemente distribuido, algunos segmentos de lecho están expuestos a un número mayor o menor de moléculas que otros segmentos. Los segmentos expuestos a un mayor flujo localizado experimentarán un afloramiento de contaminante más temprano en procedimientos de adsorción, o bien tendrán menor eficiencia de conversión en procedimientos de reacción, que los segmentos que funcionen con una velocidad menor. Tal distribución no uniforme del flujo a través del lecho es indeseable, y se traduce en unas prestaciones disminuidas del proceso.

Para un procedimiento de purificación, el caudal másico que entra y sale del lecho permanece relativamente inalterado salvo variación debida a las pequeñas cantidades de contaminantes eliminados del gas de alimentación por adsorción y posteriormente devueltas al gas de purga mediante la regeneración (desorción). Contrariamente a los procedimientos de purificación, en las separaciones de gran volumen el caudal másico que sale del recipiente puede ser sustancialmente menor que el caudal másico que entra en el recipiente debido a la mayor cantidad de componentes del gas de alimentación (presentes en una cantidad notable) que son retenidos en el adsorbente. Por lo tanto, el primer paso en el control de las resistencias al flujo en los canales requiere que la relación entre las áreas de los canales interno y externo sea aproximadamente igual a la relación entre los caudales másicos en esos canales. Por lo tanto, los tamaños y áreas en sección transversal de los canales interno y externo, que también son denominados canales de alimentación o de producto, pueden ser significativamente diferentes para un recipiente diseñado para la purificación en comparación con los canales diseñados para la separación en grandes volúmenes. Sin embargo, se establece un único criterio para determinar la relación entre las áreas de los canales interno y externo que puede ser aplicado a procesos de purificación, separación en grandes volúmenes y reacción.

A partir de la ecuación de continuidad, el caudal másico que entra o sale de cualquiera de los canales se puede expresar:

$$m_i = (\rho \cdot A \cdot V)_i$$

m representa el caudal másico total que entra o sale de un canal, ρ es la densidad del fluido, A es el área de la sección transversal del canal, V es la velocidad en la entrada o la salida del canal, y el subíndice i representa o bien el canal interno (IC, por sus siglas en inglés) o el canal externo (OC). Considerando que la densidad del fluido es relativamente constante en el conjunto del recipiente y los canales, y que es deseable mantener aproximadamente la misma velocidad de entrada en el canal de alimentación que de salida del canal de producto, es deseable entonces mantener el mismo flujo másico ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$) en los canales:

$$\frac{m_{IC}}{A_{IC}} = \frac{m_{OC}}{A_{OC}}$$

Para los fines de esta invención (en donde los cambios en la densidad del fluido entre los flujos de alimentación y de producto son generalmente pequeños), el caudal y el flujo en los canales han sido descritos en términos de masa. Si llegase el caso en donde la densidad del fluido fuera sensiblemente diferente entre los canales de flujo, las anteriores ecuaciones de flujo se pueden aplicar con respecto a un flujo molar.

En el caso de la purificación (o en algunas reacciones), $m_{IC} = m_{OC}$, y la relación anterior indica que las áreas de sección transversal de los canales interno y externo deben ser iguales. Ambos resultados, es decir, igual área o igual flujo másico, representan condiciones ideales que ayudan a asegurar condiciones de flujo equilibradas entre los canales interno y externo.

Sin embargo, la condición de relación de áreas iguales no es ni suficiente ni siquiera necesaria para una distribución uniforme del flujo, por ejemplo en la separación en grandes volúmenes, o bien cuando las áreas de sección transversal de los canales son demasiado pequeñas. Esta es la razón por la cual es requerida la condición adicional que relaciona las caídas de presión en los canales con la caída de presión en el lecho, tal como se describe más adelante.

Para reactores de flujo radial a escala industrial con caudales de fluido relativamente elevados, es importante proporcionar áreas de sección transversal de los canales lo suficientemente grandes para mantener las velocidades de canal lo más bajas posibles. Esto a su vez se traduce en una caída de presión relativamente baja en el canal. Para los fines de esta invención, se ha encontrado que la condición de igual flujo másico se puede relajar en cierta

medida sin dejar de lograr una distribución uniforme del flujo, es decir, en combinación con los criterios de que las resistencias de los canales al flujo deben ser pequeñas en comparación con la resistencia del lecho. Los flujos de alimentación y de producto pueden ser introducidos o retirados, respectivamente, tanto del canal (o corona circular) interno como del canal (o corona circular) externo. Por lo tanto, la relación en área de estos canales (áreas de flujo) puede describirse más directamente en términos del tipo de flujo másico, es decir, de alimentación o de producto, que está siendo conducido en ese canal. Se ha encontrado que el siguiente criterio de diseño de relación de áreas cumple los requisitos de la presente invención:

$$\frac{A_{feed}}{A_{product}} \geq 0,70 \cdot \left(\frac{m_{feed}}{m_{product}} \right) \text{ para } A_{feed} < A_{product}$$

$$\frac{A_{feed}}{A_{product}} \leq 1,40 \cdot \left(\frac{m_{feed}}{m_{product}} \right) \text{ para } A_{feed} > A_{product}$$

Los subíndices "feed" (en inglés, alimentación) y "product" (producto) se refieren al tipo de fluido que está siendo conducido en el canal. Las anteriores relaciones entre áreas de los canales se aplican con independencia de que se esté utilizando el canal interno o el externo para conducir el flujo de alimentación o de producto. La relación de igual caudal másico se utiliza para realizar una primera aproximación a la relación entre áreas, que posteriormente se puede relajar para satisfacer la condición anterior. Esto proporciona la flexibilidad necesaria en la geometría de diseño para satisfacer simultáneamente los requisitos estructurales y de proceso, logrando una distribución aceptable del flujo. Por lo tanto, la relación entre las áreas de flujo del canal de alimentación y del canal de producto está en proporción a la relación entre los caudales másicos del fluido de alimentación y del fluido producto, y la constante de proporcionalidad se sitúa entre aproximadamente 0,7 y aproximadamente 1,4, y preferiblemente entre 0,85 y 1,2.

Haciendo referencia ahora a la Figura 1, se muestra un recipiente (1) de lecho radial con una tapa superior (12), tapa inferior (10) y una carcasa (3) del recipiente a presión cilíndrica a lo largo del eje longitudinal (4). El lecho (2) está contenido entre una cesta externa (5) y una cesta interna (6) que forman un espacio anular interno que contiene el material activo. Las paredes de la cesta externa (5) y la cesta interna (6) están hechas de un material poroso o tienen de otro modo perforaciones para permitir que el gas de proceso fluya a través del lecho (2). El volumen cilíndrico dentro de la cesta interna (6) se denomina canal interno (7), y el volumen anular entre las paredes de la carcasa (3) del recipiente a presión y la cesta externa (5) se denomina canal externo (8). El gas de alimentación, por ejemplo, es introducido en el recipiente a través de una boquilla (9) de entrada unida a la tapa inferior (10) del recipiente (1), y el gas producto se retira del recipiente a través de la boquilla (11) de salida unida a la tapa superior (12) del recipiente (1).

El lecho (2) se compone típicamente de una o más capas concéntricas de materiales activos. Normalmente, el material activo puede fluir libremente. Para los procedimientos basados en adsorción, tales como la purificación de aire u otros separaciones, se utiliza un material adsorbente que es típicamente un material de tamiz molecular de tipo zeolita que es conocido y está disponible comercialmente. El material adsorbente puede constar de una sola capa, o bien tener una configuración de dos o más capas concéntricas, en donde la primera capa (por ejemplo alúmina activada) más cercana a la entrada de la alimentación elimina el agua del gas de alimentación, y la segunda capa (por ejemplo tamiz molecular de zeolita) adsorbe un componente seleccionado de gas tal como el dióxido de carbono en la purificación o nitrógeno en la separación del aire. Se puede utilizar una tercera capa para adsorber o hacer reaccionar uno o más contaminantes traza (tales como CO o N₂O), y así sucesivamente. En los procedimientos de tipo reactivo, el material activo puede estar seleccionado de cualquier material catalizador conocido del que se sepa que es eficaz en los procesos en recipientes de lecho fijo. Normalmente, estos catalizadores pueden fluir libremente, y los ejemplos de los mismos incluyen diversos tipos de tamices moleculares con alta contenido de sílice, hopcalita, alúmina y sustratos de sílice impregnados con metales y óxidos metálicos (por ejemplo, de metales del grupo VIII), y otros catalizadores conocidos empleados en reacciones químicas. Preferiblemente, el adsorbente o catalizador está densamente empaquetado con el fin de reducir al mínimo la sedimentación y otros movimientos de las partículas, y para maximizar la eficiencia de los procesos, como es conocido. El material que fluye libremente puede ser cualquier material aglomerado en forma de perlas, esférulas, gránulos, etc., tales como están disponibles comercialmente, en donde la actividad del material satisfaga los requisitos de separación o reacción del procedimiento.

Como el experto en la materia comprenderá, la dirección del flujo de gas de alimentación dentro del lecho radial puede ser radialmente hacia dentro o radialmente hacia fuera, tal como se entiende mejor con referencia a las Figuras 1 y 2. El gas de alimentación puede ser introducido en el recipiente (1) de lecho radial desde el canal interno (7) y fluir radialmente hacia fuera hacia el canal externo (8), o bien se puede introducir desde el canal externo (8) y fluir radialmente hacia dentro hacia el canal interno (7). En un recipiente de lecho radial típico, se puede introducir

gas de alimentación en el lecho anular (2) a través del canal externo (8) y fluir radialmente hacia dentro a través del lecho (2), y salir después del recipiente el gas producto pasando por el canal interno (7). Dicho gas de alimentación puede entrar en el recipiente desde la tapa inferior (10) y fluir axialmente (de manera paralela al eje longitudinal del recipiente) hacia arriba en los canales de flujo interno (7) y externo (8) (Figura 2a), o bien entrar en el recipiente desde la tapa superior (12) y fluir axialmente hacia abajo en los canales de flujo interno y externo (Figura 2b). Como alternativa, también se puede introducir el gas de alimentación en el canal interno (7), fluir radialmente hacia fuera a través del lecho (2), y salir luego del recipiente el gas producto a través del canal externo (8) (Figuras 2c-2d). Dicho gas puede entrar en el recipiente desde la tapa inferior (10) y fluir axialmente hacia arriba en los canales de flujo (Figura 2c), o bien entrar en el recipiente desde la tapa superior (12) y fluir axialmente hacia abajo en los canales de flujo (Figura 2d). La dirección axial de flujo tal como se muestra en las Figuras 2a-2b-2c-2d es la misma en los canales interno y externo (esto se denomina a menudo "flujo z" en la bibliografía). Como alternativa, el flujo en estos canales también puede ir en sentidos opuestos entre sí (lo que a menudo se denomina "flujo π " en la bibliografía), tal como se muestra en la Figura 2e.

En el caso de las trayectorias de flujo en los canales en sentidos opuestos, tal como se representa en la Figura 2e, el gas de alimentación entra en el recipiente desde la boquilla (9) de entrada en la tapa inferior (10), luego entra en el lecho (2) desde el canal externo (8) y sale al canal interno (7) siguiendo una trayectoria de flujo radialmente hacia dentro a través del lecho (2), y sale del recipiente desde la tapa inferior (10) a través de una boquilla de salida separada. Otras variaciones posibles a esta configuración de flujo incluyen: i) entra gas en el recipiente desde la tapa superior, luego entra en el lecho desde el canal externo y sale al canal interno siguiendo una trayectoria de flujo radialmente hacia dentro a través del lecho, y sale del recipiente desde la tapa superior, ii) o bien entra gas en el recipiente desde la tapa inferior, a continuación, entra en el lecho radial desde el canal interno y sale al canal externo siguiendo una trayectoria de flujo radialmente hacia fuera a través del lecho, y sale del recipiente desde la tapa inferior, iii) o bien entra gas en el recipiente desde la tapa superior, luego entra en el lecho radial desde el canal interno y sale al canal externo siguiendo una trayectoria de flujo radialmente hacia fuera a través del lecho, y sale del recipiente desde la tapa superior. En esas configuraciones en las que el flujo entra y sale desde el mismo extremo del recipiente, se proporcionan boquillas de entrada y salida separadas. Aunque los estudios académicos han concluido que el flujo π proporciona una mejor distribución del flujo que el flujo z, la presente invención proporciona directrices de diseño para lograr una distribución aceptable del flujo empleando cualquiera de las configuraciones de flujo.

En un procedimiento de separación de gases basado en adsorción, el adsorbente del lecho adsorbe en primer lugar el gas más fácilmente adsorbible, en segundo lugar el segundo gas más fácilmente adsorbible y así sucesivamente. En los procedimientos de purificación, se selecciona un adsorbente que adsorba fácilmente las impurezas. Cuando el lecho alcanza un cierto grado de saturación, determinado por la pureza del producto deseado, es regenerado con un gas de purga que elimina los gases o impurezas adsorbidos. Con independencia del sentido de flujo del gas de alimentación, el gas de purga fluye típicamente en sentido opuesto al gas de alimentación. Tal como se muestra en las Figuras 2a a 2e, existen muchas combinaciones posibles de sentidos de flujo dentro de los canales de flujo y a través del lecho radial. En un modo preferido de funcionamiento de la presente invención, el gas de alimentación entra por el fondo del recipiente y sigue la trayectoria correspondiente que se muestra en la Figura 2a, y el gas de purga entra por la parte superior del recipiente y sigue la trayectoria correspondiente que se muestra en la Figura 2d.

La Figura 3 muestra la vista en sección transversal horizontal del recipiente radial de la Figura 1. Se supone que tanto el radio del canal interno (7) cilíndrico como el radio de la cesta interna (6) y el radio interno del lecho (2) tienen todos el mismo radio nominal r_i . De manera similar, se supone el radio externo del lecho (2), el radio de la cesta externa (5) y el radio interno del canal externo (8) tienen todos el mismo radio nominal r_b . Análogamente, el radio de la carcasa (3) del recipiente y el radio del canal externo (8) tienen el mismo radio nominal r_o . Estos son supuestos válidos ya que los grosores de la cesta y las paredes del recipiente son significativamente menores que las dimensiones radiales involucradas. Si dichos grosores son comparables con respecto a otras dimensiones radiales, las formulaciones pueden ser fácilmente modificadas para tenerlo en cuenta. Además, se supone que las longitudes de los canales interno (7) y externo (8) y la altura del lecho (2) en la dirección axial son todas L . Con todos estos datos geométricos;

el área de flujo en sección transversal del canal interno (7) se expresa como

$$A_{IC} = \pi \cdot r_i^2;$$

el área de flujo en sección transversal del canal externo (8) se expresa como

$$A_{OC} = \pi \cdot (r_o^2 - r_b^2);$$

el área de la superficie interna del lecho (2) se expresa como

$$A_{BI} = 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot L, \text{ y}$$

el área de la superficie externa del lecho (2) se expresa como

$$A_{BO} = 2 \cdot \pi \cdot r_b \cdot L$$

5

10

La caída de presión en los canales interno y externo se puede estimar con éxito utilizando las enseñanzas de esta invención. Mediante el ajuste de los parámetros que definen las geometrías del lecho y del canal en las predicciones de presión, se pueden determinar las dimensiones preferidas del canal interno, el canal externo, la longitud de transferencia del lecho y la altura del lecho para satisfacer los criterios de caída de presión y de relación de áreas antes mencionados que producen una distribución uniforme de flujo a través del lecho para una condición operativa dada.

15

20

La caída de presión en los canales se rige por el tamaño y la longitud del canal, así como por la densidad y la velocidad longitudinal del gas dentro del canal. Para un caudal másico (o velocidad deseada del producto) y condiciones de proceso (temperatura y presión) dados, una mayor área de sección transversal de los canales de flujo se traduce en una velocidad longitudinal del gas más baja y una menor caída de presión en el canal. Por otro lado, la caída de presión a través del lecho se rige por la densidad, la viscosidad y la velocidad radial del gas que fluye, así como por el tamaño medio de las partículas del lecho, la fracción de huecos (porosidad del lecho) y la altura del lecho. La relación para predecir la caída de presión en un lecho empaquetado, conocida como ecuación de Ergun, está muy bien documentada y es ampliamente utilizada (Chem. Engr. Progress, vol. 48, págs. 89-94, febrero de 1952).

25

30

Una forma de determinar la caída de presión en los canales y en el lecho consiste en modelar el flujo utilizando el análisis de la dinámica de fluidos por ordenador para la geometría y condiciones de flujo dadas. Sin embargo, este análisis requiere múltiples simulaciones y la investigación de la distribución del flujo para diferentes dimensiones del canal. Considerando el número de variables involucradas, tales análisis pueden llegar a ser abrumadores. Un enfoque alternativo consiste en estimar caídas de presión en los canales y el lecho y utilizar estas estimaciones para diseñar adecuadamente los tamaños de los canales y el lecho de modo que se cumplan los criterios de caída de presión mencionados anteriormente para una distribución uniforme del flujo.

Predicción de la caída de presión en el lecho

35

40

La caída de presión a través de un lecho empaquetado se estima con precisión mediante la ecuación de Ergun. Sin embargo, esta ecuación fue desarrollada para lechos en configuración de flujo axial. El área de flujo y velocidad de flujo se mantienen constantes en un lecho axial. Por otro lado, el área de flujo y la velocidad de flujo radial resultante varían con la profundidad del lecho en un lecho de flujo radial, es decir, la velocidad varía de manera inversa al área de flujo. Por esta razón, se debe modificar la ecuación clásica de Ergun para estimar con precisión la caída de presión en el lecho de un recipiente de flujo radial. La caída de presión en un lecho anular sometido a flujo radial se puede expresar como:

$$\Delta P_{bed} = C_L \cdot \left(\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \rho} \right) \cdot \ln \left(\frac{r_b}{r_i} \right) + C_Q \cdot \left(\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \rho} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_b} \right)$$

$$\text{con } C_L = 150 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu}{d_p^2} \quad \text{y} \quad C_Q = 1.75 \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho}{d_p}$$

45

donde

50

55

- ε es fracción de huecos del lecho (volumen de huecos entre partículas / volumen del lecho)
- μ es la viscosidad del gas
- d_p es el diámetro de partícula esférica equivalente según la definición de Ergun
- ρ es la densidad del gas
- m es el caudal másico el gas de proceso
- L es la altura de lecho
- r_b es el radio externo del lecho
- r_i es el radio interno del lecho

Introduciendo la información del gas de proceso (μ , ρ , m), del lecho adsorbente (ε , d_p), y de la geometría del lecho

(L, r_b, r_i) en la ecuación antes presentada, se puede predecir la caída de presión en el lecho sin usar CFD u otra simulación o análisis extensivos y sin necesidad de experimentación excesiva. La formulación que se da en la presente memoria se ha desarrollado para una sola capa de material en un lecho, pero se puede ampliar fácilmente a múltiples capas de materiales, como entenderá un experto en la materia.

5 Predicción de caídas de presión en canal interno y canal externo
 En las Figuras 4a y 4b, respectivamente, se muestran el sentido de flujo para el gas de alimentación (que entra por el fondo del recipiente) y para el gas de purga (que entra desde la parte superior del recipiente) en el funcionamiento preferido de esta invención. El flujo de gas en estos canales tiene lugar principalmente en la dirección axial, es decir, longitudinalmente hacia arriba o hacia abajo dependiendo de por cuál de los extremos del recipiente entre el flujo, tal como se muestra en las Figuras 4a y 4b. El gas entra en el lecho desde uno del canal interno (7) o el canal externo (8), fluye radialmente a través del lecho y sale al otro canal. Por ejemplo, si entra al lecho desde el canal externo entonces sale del lecho hacia el canal interno, y viceversa.

15 Haciendo referencia a la Figura 4a, el flujo másico que entra en el canal externo (8) con una velocidad sustancialmente en la dirección axial es arrastrado de manera uniforme desde el canal hacia el lecho a lo largo de la longitud del canal a través de la cesta externa (5). Por otra parte, la velocidad de flujo en el lecho se sitúa sustancialmente en una dirección radialmente hacia el interior. El intercambio de impulso debido al cambio en la dirección de flujo desde axial dentro del canal externo (8) a radial a través de las perforaciones en la cesta externa (5) se suma a la caída de presión total en el canal. La resistencia al flujo axial por fricción en la pared del canal externo también contribuye a esta caída de presión. Haciendo referencia a la Figura 4a, se produce un intercambio de impulso similar cuando el flujo sale del lecho a través de las perforaciones de la cesta interna (6) y cambia de la dirección radial a la axial dentro del canal interno (7), es decir, este cambio de impulso contribuye a la caída de presión en el canal interno. La resistencia al flujo axial por fricción en la pared del canal interno (7) también contribuye a la caída de presión en el canal interno. Por lo tanto, la caída de presión tanto en el canal interno (7) como en el canal externo (8) se deben a los efectos combinados de la resistencia por fricción y la recuperación de presión inercial (por impulso).

20 La caída de presión debida al intercambio de impulso en los canales interno y externo puede ser considerada en el contexto de la presente invención como similar o análoga a la caída de presión en distribuidores de tubo perforado (Green D., Perry R.H., *Perry's Engineers' Handbook*, 8ª edición, 2008). La caída de presión para un tubo perforado dependerá de la dirección del flujo; si el gas está fluyendo hacia fuera de un tubo a través de los agujeros perforados, entonces se trata de un "tubo de descarga". Sin embargo, si el gas está fluyendo hacia el tubo a través de los agujeros perforados, entonces es un "tubo de retorno". Para las direcciones de flujo de gas de alimentación que se muestran en la Figura 4a, el canal anular externo (8) junto con la cesta externa (5) forman un tubo de descarga, ya que es descargado gas de alimentación desde el canal anular externo (8) a través de la cesta externa (5). Por otro lado, el canal interno (7) junto con la cesta interna (6) forman un tubo de retorno, ya que se recoge flujo de gas en el canal interno (7) pasando a través de la cesta interna (6). Del mismo modo que para los sentidos de flujo del gas de purga, tal como se muestra en la Figura 4b, el canal interno (7) junto con la cesta interna (6) forman un tubo de descarga y el canal externo (8) junto con la cesta externa (5) forman un tubo de retorno.

La caída de presión en los canales interno y externo se debe a los efectos combinados de la fricción y recuperación de presión inercial (por impulso), y por lo tanto se puede expresar como

$$\Delta P = \left(\frac{4 \cdot f \cdot L}{3 \cdot D} + 2 \cdot K \right) \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}$$

- 45 donde
- ΔP es la caída neta de presión a lo largo de la longitud del canal
 - L es la longitud de la carcasa perforada
 - 50 D es el diámetro de la carcasa perforada
 - f es el factor de fricción obtenido del diagrama de Moody (para flujo en tubos)
 - K es el factor de recuperación de impulso ideal; igual a -0,5 para tubos de descarga y +1,0 para tubos de retorno
 - ρ es la densidad del gas
 - 55 V es la velocidad de entrada en el canal para el tubo de descarga, o bien la velocidad de salida del canal para el tubo de retorno, y es igual a $\frac{m}{\rho \cdot A}$ siendo A el área del canal

60 Los flujos de gas en los canales interno y externo tienen lugar típicamente en regímenes turbulentos. Cuando el término de fricción del tubo es relativamente insignificante en comparación con el término inercial (intercambio de impulso), la caída de presión en los canales interno y externo está dominada por el término de impulso ($K \cdot \rho \cdot V^2$). Como el factor de recuperación de impulso K es negativo para un tubo de descarga y positivo para un tubo de

retorno, la presión aumentará a lo largo de un tubo de descarga y disminuirá a lo largo del tubo de retorno. La magnitud de la caída de presión en cada canal está controlada por la velocidad de entrada para un tubo de descarga o la velocidad de salida para un tubo de retorno. Sin embargo, para facilitar los cálculos, las caídas de presión en el canal se expresan en términos del caudal másico que entra en o sale de los canales (m_{IC} , m_{OC}) y el área de sección transversal de los canales (A_{IC} , A_{OC}). Por lo tanto, la caída de presión en los canales externo e interno se puede expresar como (cuando los efectos de fricción son insignificantes):

$$\Delta P_{OC} = \frac{K \cdot m_{OC}^2}{\pi^2 \cdot \rho \cdot (r_o^2 - r_b^2)^2} \quad \text{y} \quad \Delta P_{IC} = \frac{K \cdot m_{IC}^2}{\pi^2 \cdot \rho \cdot r_i^4}$$

10 Cuando se introduce el gas en el lecho adsorbente desde el canal externo y sale del lecho al canal interno, se afirma en la presente memoria que el canal externo se comporta como un tubo de descarga ($K = -0,5$) y el canal interno se comporta como un tubo colector ($K = 1$). Por otro lado, cuando el gas entra en el lecho desde el canal interno y sale al canal externo, el canal interno puede ser visto como un tubo de descarga ($K = -0,5$) y el canal externo como un tubo colector ($K = 1$). Los factores K , así como los factores de fricción, son constantes empíricas seleccionadas de la bibliografía por conveniencia. La exactitud de las predicciones se puede mejorar aún más desarrollando factores directamente relacionados con los materiales y la geometría del diseño del recipiente.

15 Cabe señalar que, aunque en los estudios en lecho de pequeño tamaño de Heggs *et al.* y Kareeri *et al.* se ha descrito el aumento de presión en el tubo de descarga, es más probable que en los canales de reactores a escala industrial ocurra una caída de la presión. Como es evidente en las ecuaciones anteriores que incluyen tanto términos de fricción como términos inerciales, estos términos se oponen entre sí en la configuración de la tubería de descarga, es decir, las pérdidas por fricción contribuyen a una caída de la presión y la recuperación de impulso contribuye a un aumento de la presión. En los reactores a escala industrial que utilizan placas perforadas de superficie basta con área abierta significativa (muchas perforaciones) las pérdidas por fricción pueden no ser insignificantes, sobre todo a medida que aumenta la altura del lecho. La gran área superficial de las cestas, combinada con los grandes flujos y las grandes alturas de lecho favorecen como mínimo que las pérdidas por fricción compensen la recuperación de impulso en el tubo de descarga. Por lo tanto, para reactores a escala industrial, es recomendable incluir el término de fricción en la ecuación de la caída de presión en el canal y también mejorar la exactitud de las constantes empíricas K y f . Con independencia del aumento o la caída de la presión en la configuración de descarga, la directriz es minimizar la caída de presión global en el canal.

20 Al conceptualizar los canales de flujo de un recipiente de lecho radial como tubos de descarga o colectores, se pueden predecir las caídas de presión en los canales para diversos valores de caudal másico del gas de proceso y para diversos tamaños de canal. La comparación de los valores de caída de presión en los canales con respecto a la caída de presión en el lecho, y el ajuste de los mismos mediante la reconfiguración del diseño del recipiente proporciona una metodología para alcanzar los criterios de distribución de flujo, es decir, para diseñar los canales de manera que las caídas de presión en los canales sean significativamente menores que la caída de presión en el lecho, proporcionando una distribución más uniforme del flujo a través del lecho.

25 El mantener las caídas de presión en los canales significativamente inferiores a la caída de presión en el lecho se traducirá en la distribución uniforme del flujo. Empleando los métodos descritos en lo que antecede se pueden diseñar el recipiente y el lecho de manera que las caídas de presión en los canales sean preferiblemente menores o iguales que 10%, pero más preferiblemente menores o iguales que 5%, de la caída de presión en el lecho. La relación entre la caída de presión en los canales y la caída de presión en el lecho para un flujo másico o intervalo de flujos másicos dado está controlada por una combinación de factores, entre ellos los tamaños de los canales, la forma, el tamaño y el empaquetamiento de las partículas de adsorbente, la longitud de transferencia del lecho y la altura del lecho.

30 La condición más importante que se requiere para conseguir una distribución uniforme del flujo en un recipiente de flujo radial es que las caídas de presión en los canales sean pequeñas en comparación con la caída de presión en el lecho. Estos criterios se expresan como sigue:

$$\Delta P_{IC} \ll \Delta P_{Bed}$$

$$\Delta P_{OC} \ll \Delta P_{Bed}$$

35 Más específicamente, se prefiere que las caídas de presión en los canales sean menores o iguales que 10% de la caída de presión en el lecho:

$$\Delta P_{IC} \leq 0,10 \cdot \Delta P_{Bed}$$

$$\Delta P_{OC} \leq 0,10 \cdot \Delta P_{Bed}$$

Más preferiblemente, las caídas de presión en los canales son menores o iguales que 5% de la caída de presión en el lecho:

$$\Delta P_{IC} \leq 0,05 \cdot \Delta P_{Bed}$$

$$\Delta P_{OC} \leq 0,05 \cdot \Delta P_{Bed}$$

5

El paso inicial es determinar la caída de presión máxima admisible o deseable a lo largo del lecho. Esta determinación se verá fuertemente influenciada por el coste de la energía de compresión y el valor del producto del proceso. En la pre-purificación de aire previa a la separación criogénica del aire, es preferible que la caída de presión en el lecho sea menor o igual que 34.5 kPa (5 psi), preferiblemente menor o igual que 20.7 kPa (3 psi). En procesos PSA de separación de aire para la producción de oxígeno es preferible que la caída de presión en el lecho sea menor o igual que 13.8 kPa (2 psi) y muy preferiblemente menor igual que 6.9 kPa (1,0 psi). Un valor elevado del producto y/o un bajo coste de la energía harán que se tienda hacia una mayor caída de presión permisible en el lecho. Se espera que en todos estos procesos que la caída de presión en el lecho será mayor o igual que 1.0 kPa (0.15 psi). Se espera, además, que la caída de presión a través de las paredes porosas de la cesta será pequeña e incluso despreciable en comparación con la resistencia en el lecho. Tal baja resistencia de las paredes perforadas de las cestas se logrará asegurando áreas abiertas de placa perforada de al menos 15% y preferiblemente al menos 25%.

10

15

20

25

En general, las caídas de presión en los canales serán pequeñas, por ejemplo, mucho menores de 6.9 kPa (1,0 psi). Una baja caída de presión en los canales requiere baja velocidad (longitudinal) en los canales, lo que a su vez requiere un área de sección transversal de los canales suficientemente grande. Se ha hallado en el curso de esta invención que estas condiciones son satisfechas de la mejor manera proporcionando no sólo un área de flujo en sección transversal suficientemente grande del canal, sino también estableciendo el área de flujo en sección transversal de acuerdo con la relación proporcionada más arriba, es decir,

$$\frac{A_{feed}}{A_{product}} \geq 0,70 \cdot \left(\frac{m_{feed}}{m_{product}} \right) \text{ para } A_{feed} < A_{product}$$

$$\frac{A_{feed}}{A_{product}} \leq 1,40 \cdot \left(\frac{m_{feed}}{m_{product}} \right) \text{ para } A_{feed} > A_{product}$$

30

preferiblemente

$$\frac{A_{feed}}{A_{product}} \geq 0,85 \cdot \left(\frac{m_{feed}}{m_{product}} \right) \text{ para } A_{feed} < A_{product}$$

$$\frac{A_{feed}}{A_{product}} \leq 1,20 \cdot \left(\frac{m_{feed}}{m_{product}} \right) \text{ para } A_{feed} > A_{product}$$

35

Estas condiciones garantizan que las caídas de presión dentro de los canales interno y externo sean bajas, siempre y cuando los canales tengan una longitud sustancialmente igual y los flujos másicos en ambos canales sean aproximadamente iguales. Tales condiciones también impiden la restricción del flujo en los canales.

40

Debe señalarse que en grandes recipientes comerciales se han de evitar grandes relaciones de área fuera de los anteriores intervalos preferidos debido a que los costes de fabricación del recipiente pueden incrementarse significativamente. En los casos de separación en gran volumen en donde se utiliza el canal interno para transportar el flujo de producto, puede ser necesario añadir un tapón o tubo central sellado para ocluir una parte del volumen expuesto al producto, con el fin de maximizar el rendimiento y pureza del producto. En estos casos, el canal interno se transforma de un cilindro a un anillo. En tales casos de separación en gran volumen, las precedentes directrices con respecto a la relación entre áreas aseguran que se mantienen ambos requisitos de distribución del flujo sin impactar significativamente sobre el rendimiento o la pureza del producto.

45

Además, estas condiciones aseguran que el fluido llena de manera uniforme los canales de flujo antes de entrar en el lecho, y por tanto la velocidad de flujo radial del fluido que entra en cada segmento a lo largo de la altura del lecho es sustancialmente igual a la de todos los demás segmentos. De esta manera se utiliza el lecho como un distribuidor

50

de flujo.

Una vez que se ha establecido el diseño del recipiente en cuanto a sección transversal, se puede atender un aumento de la demanda de producto incrementando la altura del lecho de manera proporcional al aumento del caudal másico que entra en el lecho, es decir, sin alterar los canales de flujo u otra geometría de sección transversal del recipiente. Tal cambio proporcional en la altura del lecho mantendrá inalterada la velocidad del gas que fluye al lecho y, en consecuencia, la caída de presión del lecho no se verá modificada. Por tanto, las enseñanzas de la invención pueden ser explotadas para crear un diseño estándar de recipiente (diámetros fijos de recipiente y cesta) en sección transversal (simplificando la fabricación y reduciendo el coste del recipiente) para satisfacer una gama relativamente importante de caudales másicos de alimentación y/o de producto, alterando sólo la altura del recipiente.

La altura del depósito no puede aumentarse sin límite ya que los caudales másicos en los canales se incrementan. El mantener el área de sección transversal de los canales de flujo para un caudal másico incrementado se traducirá en una mayor velocidad en los canales y un aumento en la caída de presión en los canales. El aumento de la caída de presión en los canales sin aumentar la caída de presión en el lecho comenzará a afectar negativamente a la uniformidad de la distribución de flujo cuando la altura del depósito se aumente demasiado. Por lo tanto, o bien se debe reducir la caída de presión en los canales mediante el agrandamiento de los canales, o bien se debe incrementar la caída de presión en el lecho para obtener una distribución de flujo más uniforme. Así, se incrementa el diámetro del recipiente y se ajustan las geometrías de cesta para crear un nuevo diseño de recipiente estándar, que puede utilizarse entonces en un segundo rango de caudales másicos. Por lo tanto, se puede satisfacer toda la gama de flujos para un proceso dado con uno o varios tamaños de recipientes estándar.

El efecto que sobre la relación entre la caída de presión en el canal externo y la caída de presión en el lecho tiene el aumento del caudal másico, para una caída de presión en el lecho fija, se ilustra con más detalle en el Ejemplo 1 a continuación.

Ejemplo 1

Se investigó el efecto de aumentar el caudal másico sobre la relación entre la caída de presión en el canal externo y la caída de presión en el lecho, para una caída de presión de lecho fija en un proceso de purificación, utilizando las formulaciones de caída de presión. En este ejemplo, aire a 652,9 kPa y 280 K entra con un caudal másico de 121 kg/s en el lecho de flujo radial desde el canal externo. El recipiente radial tiene un diámetro de 5,1 m, una anchura de canal externo de 0,25 m y un radio de canal interno de 1,12 m. El lecho radial tiene una longitud de transferencia de 1,22 m y una altura de lecho de 10,06 m. Se compone de partículas de adsorbente que tienen un diámetro medio de 2,1 mm empaquetadas para proporcionar un porcentaje de huecos en el lecho de 37% (fracción de huecos en el lecho = 0,37). En esta geometría del recipiente, las áreas de sección transversal de los canales interno y externo son iguales entre sí. En el análisis, el caudal másico que entra en el recipiente radial se incrementa proporcionalmente con la altura del lecho de modo que la velocidad de flujo de gas que entra en el lecho y la caída de presión resultante en el lecho se mantienen constantes. Ningún otro parámetro geométrico se modifica en el análisis. Aunque no se modifica la caída de presión en el lecho, la caída de presión en el canal externo aumenta a medida que aumenta el caudal másico dentro de este canal, es decir, el flujo de alimentación se incrementa a medida que aumenta la altura del lecho. Por lo tanto, la relación entre la caída de presión en el canal externo y la caída de presión en el lecho aumenta, como se muestra en la Figura 5, más allá de la relación preferida de 0,05 (5%). Este resultado sugiere que el aumentar el caudal másico más allá de un cierto nivel aceptable (200 kg/s en este ejemplo) de manera proporcional junto con la altura del lecho para procesar más gas sin aumentar los tamaños de los canales de gas dará lugar a una distribución incorrecta del flujo.

Ejemplo 2

Como se ha mencionado más arriba, las áreas de sección transversal de los canales interno y externo deben ser sustancialmente iguales entre sí para conseguir una distribución uniforme del flujo cuando los caudales másicos de alimentación y de producto son sustancialmente iguales. Se investigó el efecto de la relación entre el área de sección transversal del canal externo y la del canal interno, sobre la relación entre la caída de presión en el canal externo y la caída de presión en el lecho, utilizando la misma configuración de recipiente y proceso descritas en el Ejemplo 1. En este caso se seleccionó el canal interno como el canal de producto. En este análisis, el tamaño del canal interno, la altura del lecho, la longitud de transferencia del lecho y el caudal másico que entra al recipiente se mantienen fijos. Por lo tanto, la caída de presión resultante en el lecho también es fija. Se aumenta de forma incremental el área del canal externo mediante el aumento del diámetro del recipiente, y se calcula la correspondiente caída de presión en el canal externo. La relación resultante entre la caída de presión en el canal externo (canal de alimentación) y la caída de presión en el lecho se representa en la Figura 6 como una función de la relación entre el área de sección transversal del canal externo (canal de alimentación) y el área de sección transversal del canal interno (canal de producto). La relación más preferible, de 5% o inferior, entre la caída de presión en los canales y la caída de presión en el lecho (como una medida de la distribución uniforme del flujo) se consigue para relaciones entre el área de sección transversal del canal de alimentación y del canal de producto de al menos 0,70. Las relaciones inferiores a 0,7 entre las áreas de los canales se traducen en relaciones de caída de presión superiores a 0,05, es decir, que conducen al aumento de la falta de uniformidad de la distribución del flujo. Las relaciones superiores a 1,4 entre las áreas de los canales originan un excesivo volumen o diámetro del

recipiente, que conduce a mayores costes de fabricación.

Ejemplo 3: Simulación de flujo

5 Se llevó a cabo una simulación de dinámica de fluidos por ordenador para verificar la directriz de diseño establecida en la presente invención. Se usaron en la simulación el gas de proceso y el recipiente de flujo radial tal como se han especificado en el Ejemplo 1. Para esta geometría, las áreas de los canales interno y externo son casi iguales entre sí ($A_{IC} \approx A_{OC}$). Los resultados, tal como se muestra en la Figura 7, sugieren que las caídas de presión tanto en el canal interno como en el canal externo son del orden de 138-207 Pa (0,02-0.03 psi), y son significativamente menores que la caída de presión de 2.76 kPa (0.40 psi) en el lecho, es decir, menos de $0.10 \cdot \Delta P_{Bed}$. La caída de presión local en el lecho es simplemente la diferencia entre las presiones de los canales interno y externo a esa altura del lecho. Como la diferencia de presión entre los canales externo e interno es la fuerza impulsora fundamental del flujo de gas, la caída de presión significativamente más baja dentro de cada canal con respecto a la caída de presión en el lecho asegura la distribución uniforme del flujo a través del lecho. Los perfiles de velocidad de canal resultantes, tal como se muestra en la Figura 8, para el flujo de gas que entra en el lecho ($V1$) desde su límite exterior y el flujo de gas que sale del lecho ($V2$) a través de su límite interior muestran ambos menos de 4% de distribución incorrecta del flujo. Los perfiles de caída de presión y de velocidad similares que se obtienen para el flujo en sentido inverso también confirman la distribución satisfactoria del flujo para el flujo inverso. En la Figura 7 la diferencia de presión desde la parte inferior hasta la parte superior del canal (altura de lecho) representa la caída de presión en el canal, mientras que en la Figura 8 se muestra la variación de la velocidad radial para cada cara de la cesta a lo largo de la altura del lecho.

20 Para reactores de flujo radial a escala industrial, esta invención se aplica preferiblemente a recipientes que tengan un diámetro igual o mayor que 1,0 m, una altura de lecho igual o mayor que 2,0 m y una profundidad de lecho igual o mayor que 0,3 m.

25 Debe resultar evidente para los expertos en la técnica que la presente invención no está limitada por los ejemplos proporcionados en la presente memoria, que han sido proporcionados meramente para demostrar la operabilidad de la presente invención. El alcance de esta invención incluye formas de realización, modificaciones y variaciones equivalentes que caen dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

30

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento de purificación, separación o reacción de fluidos que emplea un recipiente de lecho radial que comprende:
- 5 una carcasa de recipiente sustancialmente cilíndrica que tiene un eje longitudinal vertical, una tapa superior y una tapa inferior;
- una cesta externa porosa sustancialmente cilíndrica dispuesta concéntricamente dentro de la carcasa a lo largo del eje longitudinal y unida a al menos una de la tapa superior y la tapa inferior;
- 10 una cesta interna porosa sustancialmente cilíndrica dispuesta concéntricamente dentro de la cesta externa porosa a lo largo del eje longitudinal y unida a al menos una de la tapa superior y la tapa inferior del recipiente;
- un canal externo sustancialmente anular dispuesto entre la carcasa del recipiente y la cesta externa a lo largo del eje longitudinal que tiene un área de flujo en sección transversal capaz de transportar ya sea un fluido de alimentación o un fluido producto;
- 15 un canal interno sustancialmente cilíndrico dispuesto dentro de la cesta interna a lo largo del eje longitudinal que tiene un área de flujo en sección transversal capaz de transportar ya sea un fluido de alimentación o un fluido producto;
- un lecho sustancialmente anular compuesto por al menos una capa de material activo dispuesto en el espacio anular entre las cestas interna y externa;
- 20 en donde:
- la relación entre el área de flujo en sección transversal del canal que transporta el fluido de alimentación y el área de flujo en sección transversal del canal que transporta el fluido producto está en proporción a la relación entre el caudal másico del fluido de alimentación y el caudal másico del fluido producto, siendo la constante de proporcionalidad mayor o igual que 0,7 y menor o igual que 1,4; y
- 25 el lecho anular tiene una altura de lecho y una longitud de transferencia de lecho de dimensiones tales que el cambio de presión a lo largo de las longitudes de los canales interno y externo son en cada caso menores o iguales que 10% de la caída de presión a través del lecho en las condiciones de trabajo para el fluido de proceso empleado.
- 30
2. El procedimiento según la reivindicación 1 en donde el cambio de presión es una caída de presión.
- 35
3. El procedimiento según la reivindicación 2 en donde el procedimiento es un procedimiento de separación de gases basado en adsorción que tiene flujo uniforme.
4. El procedimiento según la reivindicación 3 en donde el procedimiento de separación de gases está seleccionado del grupo consistente en un procedimiento de adsorción por oscilación de presión, de adsorción por oscilación de vacío, de adsorción por oscilación de vacío y presión y de adsorción por oscilación térmica.
- 40
5. El procedimiento según la reivindicación 4 en donde el procedimiento se utiliza para la pre-purificación de aire.
6. El procedimiento según la reivindicación 5 en donde el procedimiento emplea un tamiz molecular de tipo zeolita.
- 45
7. El procedimiento según la reivindicación 6 en donde el lecho está densamente empaquetado y la fracción de huecos del lecho es mayor o igual que 0,30 y menor o igual que 0,50.
8. El procedimiento según la reivindicación 7 en donde el tamiz molecular tiene un diámetro medio en masa mayor o igual que 0,5 mm y menor o igual que 5,0 mm.
- 50
9. El procedimiento según la reivindicación 1 en donde la caída de presión a lo largo del lecho será menor o igual que 1,0 kPa (0,15 psi).
- 55
10. El procedimiento según la reivindicación 1 en donde la relación entre las áreas de flujo en sección transversal de los canales está en proporción a la relación entre los caudales másicos, siendo la constante de proporcionalidad mayor o igual que 0,85 y menor o igual que 1,2.
- 60
11. El procedimiento según la reivindicación 10 en donde las áreas de flujo en sección transversal de los canales que transportan los fluidos de alimentación y producto son sustancialmente iguales y los caudales másicos del fluido de alimentación y el fluido producto son sustancialmente iguales.
12. El procedimiento según la reivindicación 2 en donde las caídas de presión en los canales son menores o iguales que 5% de la caída de presión en el lecho.
- 65

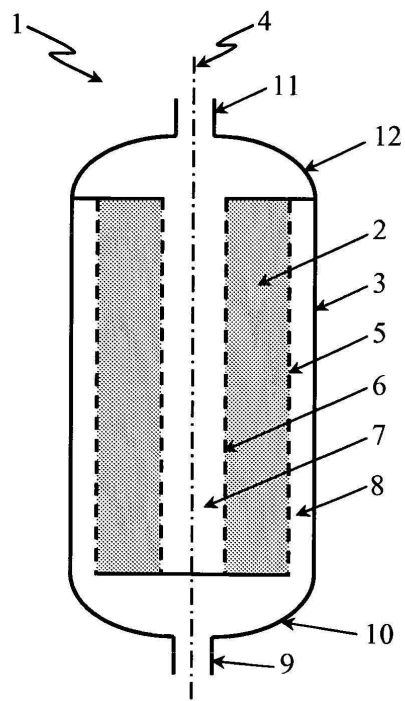


FIG. 1

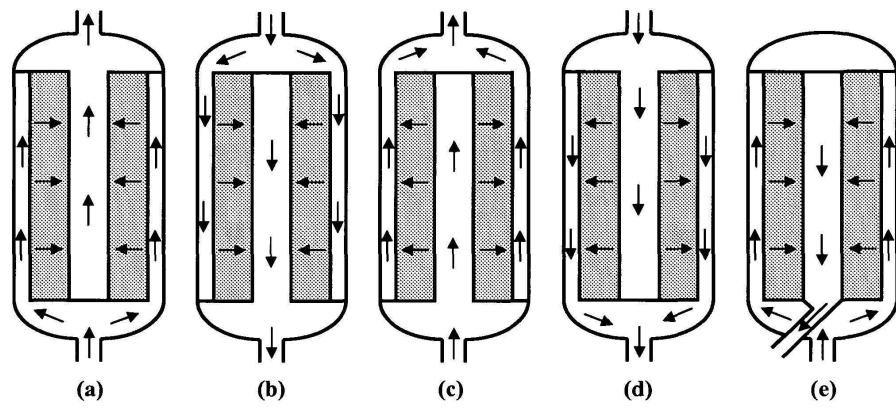


FIG. 2

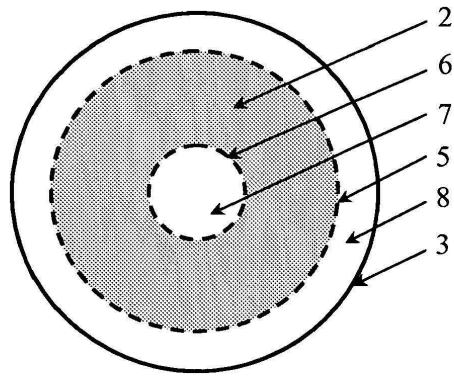


FIG. 3

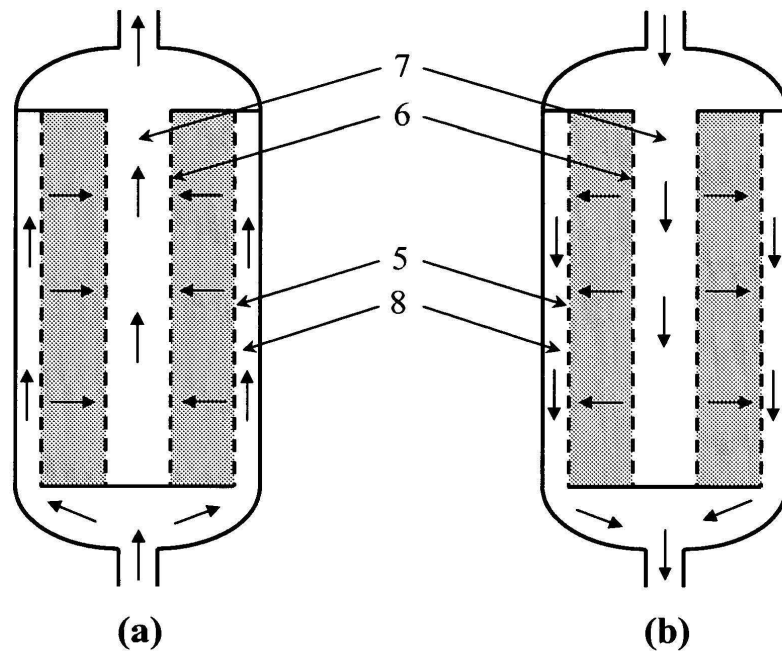


FIG. 4

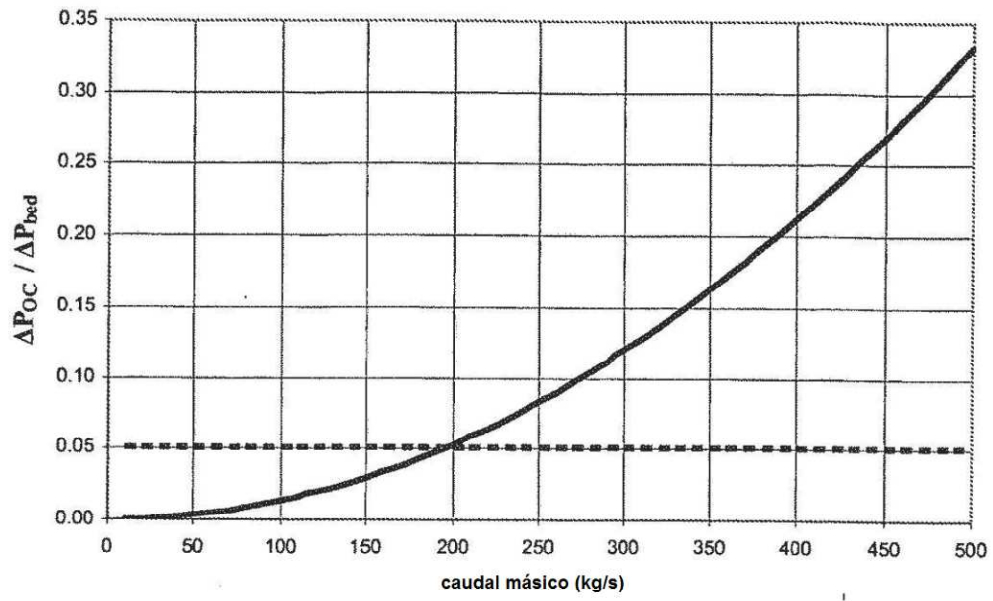


FIG. 5

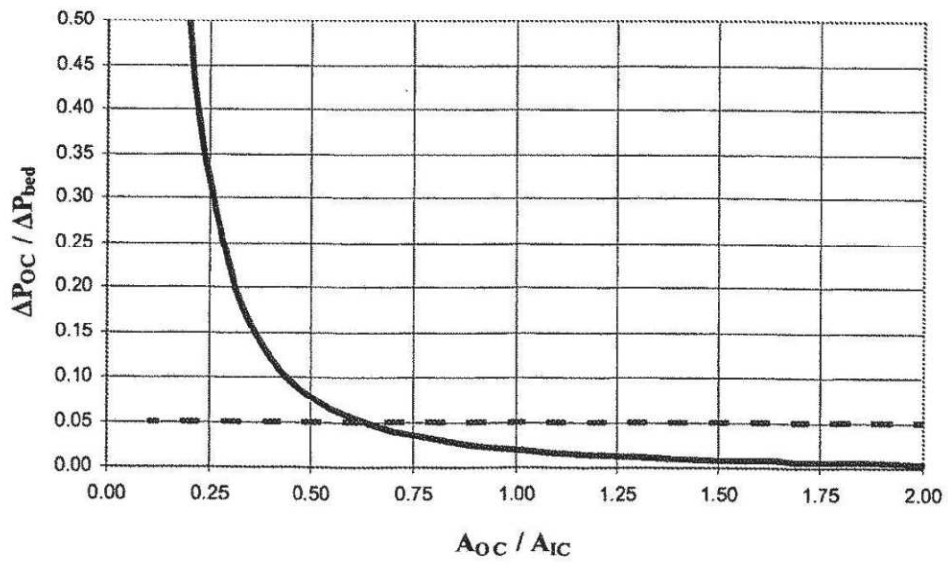


FIG. 6

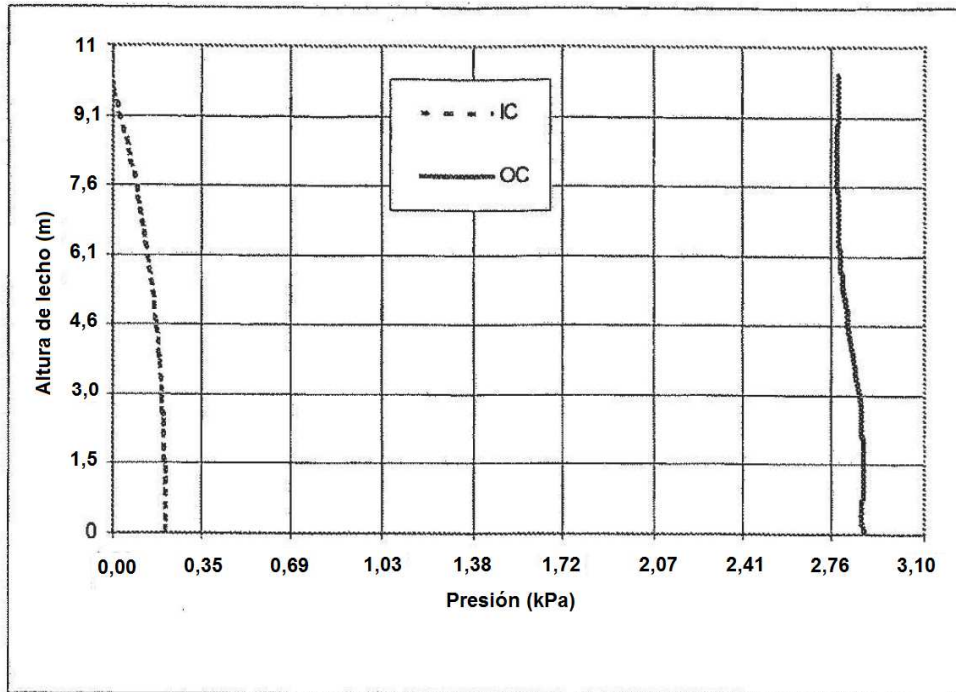


FIG. 7

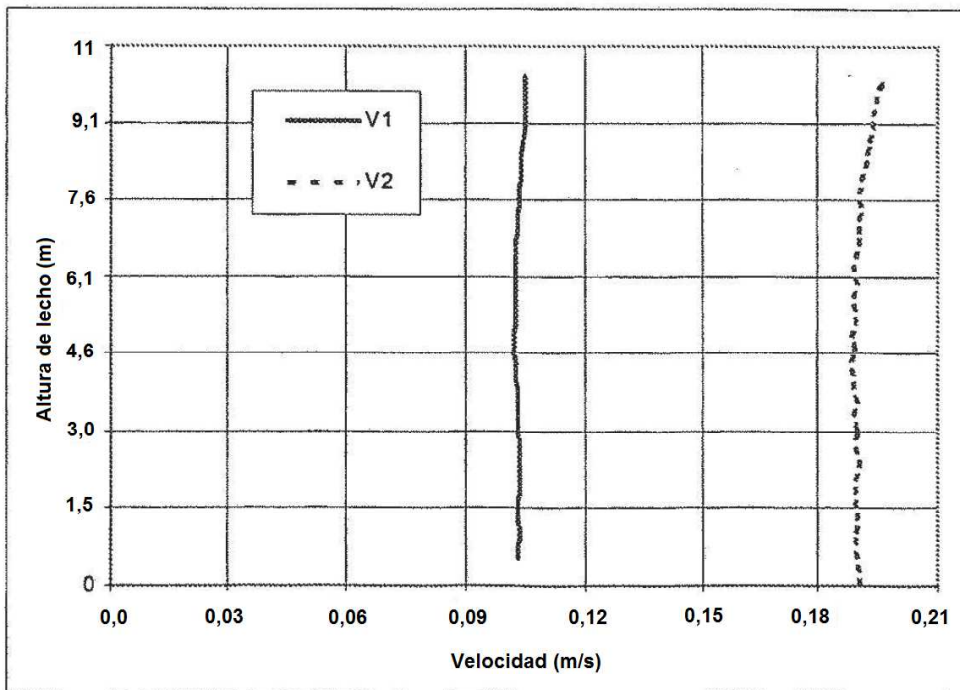


FIG. 8