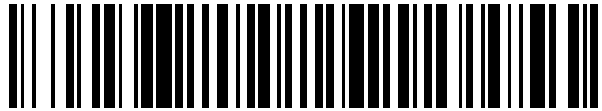


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 625 016**

51 Int. Cl.:

B01D 53/047 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **04.01.2012 PCT/US2012/020190**

87 Fecha y número de publicación internacional: **19.07.2012 WO12096812**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.01.2012 E 12700885 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.02.2017 EP 2663383**

54 Título: **Proceso de adsorción por variación de presión con seis lechos que funciona en modos normal y con límite inferior de capacidad**

30 Prioridad:

18.07.2011 US 201113185099
11.01.2011 US 201113004706

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

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

BAKSH, MOHAMED y
SIMO, MARIAN

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 625 016 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

Proceso de adsorción por variación de presión con seis lechos que funciona en modos normal y con límite inferior de capacidad

5

Campo de la Invención

La presente invención se refiere a un sistema de adsorción por variación de presión (AVP) con seis lechos que utiliza ciclos nuevos y avanzados para obtener una recuperación potenciada del hidrógeno a partir de un gas de alimentación que contiene hidrógeno (es decir, gas de síntesis). En uno de dichos ciclos, cada uno de los seis lechos tiene cuatro etapas de igualación de presión, y al menos uno de los lechos recibe y procesa dicho gas de alimentación para obtener un gas producto con hidrógeno (es decir, un ciclo 6-1-4). El sistema de AVP con seis lechos puede funcionar en un modo con límite inferior de capacidad en el que están desconectados uno o dos lechos. El nuevo ciclo de cinco lechos incluye tres etapas de igualación, mientras que al menos un lecho se encuentra en funcionamiento (es decir, un ciclo 5-1-3). El ciclo de cuatro lechos incluye dos etapas de igualación, mientras que al menos un lecho se encuentra en funcionamiento. Este modo con límite inferior de capacidad consigue una reducción inferior al cuatro por ciento, y una reducción del ocho por ciento, respectivamente, en la producción de hidrógeno. Además, la invención se refiere a una estratificación adsorbente innovadora empleada en los lechos del AVP.

10

15

20

Antecedentes de la Invención

Siguen siendo necesarios gases de alta pureza, tales como hidrógeno, procesados de los efluentes en las industrias de proceso químico. Estos efluentes son mezclas de gases de alimentación que contienen hidrógeno (es decir, gases de síntesis), procedentes del reformado de metano con vapor de gas natural o nafta, reformado catalítico de hidrocarburos, procesos de isomerización, etc., que se destinan a la AVP para un procesamiento adicional. Esta demanda creciente requiere la necesidad de desarrollar procesos de separación de alta eficiencia (por ejemplo, AVP) para la producción de hidrógeno (H₂) a partir de varias mezclas de alimentación. A efectos de obtener procesos de separación por AVP altamente eficaces, los costos de capital y operativos del sistema de AVP han de reducirse. Algunas formas de reducir el costo del sistema de AVP incluyen una disminución en el inventario de adsorbentes, en la reducción del número de lechos de AVP, y en el uso de ciclos avanzados en los procesos de AVP. Las formas para reducir el coste del sistema de AVP antes mencionadas constituyen los elementos de la presente invención.

25

30

Los sistemas de AVP convencionales son bien conocidos para la separación de una mezcla de gases de alimentación que contienen componentes con diferentes características de adsorción. Por ejemplo, en un sistema típico de AVP, una mezcla de gas de múltiples componentes se pasa a al menos uno de los múltiples lechos de adsorción a una presión elevada para adsorber al menos un componente fuertemente adsorbible mientras que pasa al menos un componente. En el caso de hidrógeno mediante AVP, el hidrógeno es el componente más débilmente adsorbido que pasa por el lecho. En un momento definido, la etapa de alimentación se interrumpe y el lecho de adsorción se despresuriza en co-corriente en una o más etapas, se purga en contracorriente en una o más etapas y se despresuriza en contracorriente en una o más etapas para permitir esencialmente que el producto de hidrógeno puro salga del lecho con una alta recuperación. La secuencia de etapas no se limita a la que se ha indicado anteriormente y una combinación de dos o más etapas pueden emplearse también como una única etapa.

35

40

45

La patente de Estados Unidos n.º 4.834.780 se dirige a un sistema de AVP con seis lechos que tiene un lecho en funcionamiento con los ciclos 6-1-3 y 6-1-4, en donde el primer número del ciclo se refiere al número total de lechos, el segundo número se refiere al número de lechos en la etapa de alimentación en cualquier instante, y el tercer número se refiere al número de etapas de igualación lecho a lecho en el ciclo de AVP. De este modo, 6-1-3 significa un ciclo de AVP con seis lechos que tiene un lecho en alimentación en cualquier instante, y el ciclo de AVP contiene tres etapas de igualación lecho a lecho. Este ciclo se reproduce a continuación en la Tabla 1.

50

Tabla 1: Gráfica del ciclo 6-1-3 de AVP.

Etapa:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N.º de lecho												
1	A1	A2/PP	I1	I2	I3	PGP	D	PG	I3'	I2'	I1'	PP
2	I1'	PP	A1	A2/PP	I1	I2	I3	PGP	D	PG	I3'	I2'
3	I3'	I2'	I1'	PP	A1	A2/PP	I1	I2	I3	PGP	D	PG
4	D	PG	I3'	I2'	I1'	PP	A1	A2/PP	I1	I2	I3	PGP
5	I3	PGP	D	PG	I3'	I2'	I1'	PP	A1	A2/PP	I1	I2

6	I1	I2	I3	PGP	D	PG	I3'	I2'	I1'	PP	A1	A2/PP
---	----	----	----	-----	---	----	-----	-----	-----	----	----	-------

- Según las enseñanzas del ciclo 6-1-3, el sistema de AVP suministra un flujo continuo de gas de cola mediante AVP a un depósito de compensación que elimina las fluctuaciones de la presión, caudales y composiciones, antes de enviarlo a una unidad aguas arriba (por ejemplo, RMV) para su uso (por ejemplo, combustible del quemador de RMV). No obstante, el ciclo 6-1-4 de la patente presenta un flujo discontinuo de gas de cola mediante AVP dirigido aguas arriba a través del depósito de compensación. El flujo discontinuo de gas de cola mediante AVP puede crear fluctuaciones en las plantas de hidrógeno.
- 10 La patente de Estados Unidos n.º 6.454.838 se dirige a un ciclo 6-1-4 modificado para eliminar el suministro discontinuo de gas de cola mediante AVP no deseado al depósito de compensación. No obstante, la solución proporcionada en esta patente da como resultado un ciclo de AVP que tiene varias etapas inactivas. Específicamente, se describe un ciclo de veinticuatro etapas con cuatro etapas inactivas, etapas de solapamiento en la cuarta igualación y despresurización. Los expertos en la técnica reconocerán que las etapas inactivas en el ciclo de AVP producen invariablemente una degradación en el rendimiento del proceso de AVP (por ejemplo, una menor recuperación de hidrógeno). En una realización alternativa, la patente de Estados Unidos n.º 6.454.838 describe un ciclo 6-1-4 de AVP, en donde el ciclo de AVP consiste en veinticuatro etapas del ciclo (véase Tabla 3) que presentan lo siguiente: (1) etapa de solapamiento para proporcionar purga y cuarta igualación; (2) depósito adicional para el almacenamiento temporal de gas procedente de la segunda etapa de igualación; (3) no hay etapas inactivas y (4) volumen de gas emitido continuo. No obstante, en esta realización se utiliza un depósito de almacenamiento a efectos de eliminar las cuatro etapas inactivas. Además, la recuperación del proceso de AVP cae un 1-1,5 % en los ciclos que utilizan una cuarta igualación en comparación con el ciclo 6-1-3 de la técnica anterior. Véase Tabla 4.
- 25 La patente de Estados Unidos n.º 6.007.606, propiedad conjunta por el cesionario de la presente invención, describe un proceso de AVP que implica el almacenamiento de productos que tienen diversos grados de pureza en los depósitos de almacenamiento segregados para su posterior uso. Los productos con un grado de pureza creciente, admitidos en el producto final del lecho se utilizan durante las etapas de purga y represurización. Además, las diferentes corrientes de composición recogidas en el extremo de alimentación del lecho durante la etapa de despresurización en contracorriente son admitidas en el extremo de alimentación del lecho con el fin de aumentar el contenido de los componentes del producto durante la etapa o etapas de presión creciente.
- 35 Además de los ciclos, la técnica relacionada discute materiales adsorbentes convencionales utilizados en los lechos como un medio para mejorar la recuperación del producto de hidrógeno en los sistemas de AVP. Por ejemplo, la patente de Estados Unidos n.º 6.814.787 se dirige a un aparato de AVP y a un proceso para la producción de hidrógeno purificado de una corriente de gas de alimentación que contiene hidrocarburos pesados (es decir, hidrocarburos que tienen al menos seis átomos de carbono). El aparato incluye al menos un lecho que contiene al menos tres capas. La zona de adsorción en capas contiene un extremo de alimentación con un adsorbente que presenta un área superficial baja (20 a 400 m²/g), que comprende 2 a 20 % de la longitud total del lecho seguido por una capa de un adsorbente que presenta área superficial intermedia (425 a 800 m²/g) que comprende 25 a 40 % de la longitud total del lecho y una capa final de un adsorbente que presenta un área superficial elevada (825 a 2.000 m²/g) que comprende 40 a 78 % de la longitud total del lecho.
- 45 La patente de Estados Unidos n.º 6.340.382 se dirige a un proceso de AVP que purifica hidrógeno procedente de una mezcla que pasa a través de una capa de óxido de aluminio (Al₂O₃) para la eliminación de la humedad, a continuación, a través de una capa de carbón activado para la eliminación de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) y metano (CH₄), y finalmente, a través de una capa de zeolita CaX para la eliminación de nitrógeno (N₂) para producir un H₂ de alta pureza (>99,99 %). CaX representa al menos el 90 % de Ca intercambiado con SiO₂/Al₂O₃ = 2,0.
- 50 La patente de Estados Unidos n.º 7.537.742 B2 se refiere a un conjunto óptimo de adsorbentes para su uso en sistemas de AVP de hidrógeno. Cada lecho adsorbente se divide en cuatro regiones. La primera región contiene un adsorbente para eliminar agua. La segunda región contiene una mezcla de adsorbentes fuertes y débiles para eliminar las impurezas de la masa como CO₂. La tercera región contiene un adsorbente que presenta una alta densidad aparente > 17,23 kg/m³ (> 38 lbfm/ft³) para eliminar CO₂ restante y la mayor parte de CH₄ y CO presentes en las mezclas de alimentación que contienen hidrógeno. La cuarta región contiene un adsorbente que tiene constantes altas de la ley de Henry para la limpieza final de N₂ e impurezas residuales para producir hidrógeno en una alta pureza deseada.
- 55 La patente de Estados Unidos n.º 6.402.813 B2 describe la purificación de una mezcla de gases por adsorción de las impurezas en un adsorbente de carbono formada por una combinación de varios carbones activos diferentes. En particular, se describe un proceso de AVP para la purificación de un gas, tal como hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, monóxido de carbono, argón, metano o mezclas de gases que contienen estos componentes. La

corriente de gas a purificar pasa por capas de carbonos, en donde el orden de las capas de carbono es tal que al menos existe una de las siguientes condiciones: (1) la densidad (D) es tal que $D1 < D2$; (2) el área superficial específica (ASE) es tal que $ASE1 > ASE2$; 3) el tamaño medio de poros (TMP) es tal que $TMP1 > TMP2$, y (4) el volumen de poro es tal que $VP1 > VP2$. Más específicamente, esta patente se refiere a un proceso en el que se utilizan al menos dos capas de carbonos activados en el que la primera capa de carbono tiene una densidad menor que la segunda, el primer carbono tiene un área superficial más específica, y también un tamaño mayor medio de poro que el segundo carbono.

Para superar los inconvenientes de los sistemas de AVP con seis lechos de la técnica relacionada, es objeto de la presente invención introducir ciclos nuevos y avanzados de AVP con modos con límite inferior de capacidad, que incluyen todas las siguientes características (1) sin necesidad de depósito de almacenamiento adicional; (2) no hay etapas inactivas (3) mayor recuperación que los ciclos de la técnica relacionada.

Otro objeto de la invención es modificar el sistema adsorbente de cada lecho para que se contenga al menos tres capas de adsorbentes (por ejemplo, alúmina, carbón activado y zeolita), en donde los componentes de carbón activo y zeolita están dispuestos en capas basándose en el tamaño de partículas y permita una mejora adicional en la recuperación de hidrógeno. Por lo tanto, se ha descubierto un proceso de separación de AVP eficiente con una alta recuperación de hidrógeno, requisitos inferiores de adsorbentes, (es decir, factor de tamaño de lecho (FTL)) inferior, y menores costos de capital y operativos. Adicionalmente, el proceso debe funcionar de manera eficiente cuando uno o más lechos se desconecten por motivos operativos, tales como fallo en el funcionamiento de la válvula (denominado en la presente memoria, como "límite inferior de capacidad" o "modo con límite inferior de capacidad").

Compendio de la Invención

La invención proporciona procesos de adsorción por variación de presión para la separación de un suministro de gas de alimentación presurizado que contiene uno o más componentes fuertemente adsorbibles y al menos un componente de gas producto menos fuertemente adsorbible en un sistema adsorbente con seis lechos como se definen en las reivindicaciones 1 y 11. El gas de alimentación se suministra a un extremo de alimentación de un lecho adsorbente que contiene un material o materiales adsorbentes sólidos, que preferentemente adsorben el componente o los componentes más fuertemente adsorbibles. El componente del producto menos fuertemente adsorbible se retira de un extremo de salida del lecho de adsorción. El ciclo incluye etapas en las que el gas de alimentación continuo fluye en co-corriente secuencialmente a través de cada uno de los lechos de adsorción para producir un gas producto utilizando gas de alimentación continuo, etapas de presurización, etapas de igualación de presión, etapa o etapas de despresurización, y etapa o etapas de purga.

El gas producto del proceso es preferiblemente hidrógeno, aunque el proceso puede ser extendido a otros procesos de separación, tales como purificación de helio, mejora de gas natural, producción de CO_2 a partir de gas de síntesis o de otra fuente que contiene CO_2 en el suministro de alimentación o en otros procesos de AVP para la coproducción de H_2 y CO_2 . Una de las características innovadoras de la presente invención es la introducción de un ciclo nuevo y avanzado en un sistema de AVP con seis lechos que tiene cuatro etapas de igualación para conseguir una recuperación potenciada de H_2 . Este ciclo se puede modificar adicionalmente y utilizar para operar el sistema de AVP en un modo con límite inferior de capacidad con una reducción relativamente pequeña en la producción, permitiendo así que el sistema de AVP funcione con tan solo cuatro lechos, sin embargo, mantiene la producción de hidrógeno por encima del 90 %. Otra característica innovadora de la invención es el adsorbente en capas que puede utilizarse en los lechos. Estas configuraciones en capa de componentes de carbono y/o zeolita difieren de otra capa de material adsorbente similar en cuanto al tamaño de partículas. Estas configuraciones en capa de los materiales del lecho combinadas y los ciclos de AVP proporcionan un efecto sinérgico con una mejora general en la recuperación de hidrógeno y producción de 1-2 % en ciclos de AVP convencionales.

Breve descripción de las figuras

Los objetos y ventajas de la invención se entenderán mejor a partir de la siguiente descripción detallada de las realizaciones preferidas de la misma en relación con las figuras adjuntas, en donde:

La Figura 1 ilustra una configuración/estratificación de lechos avanzada según un aspecto de la invención; La Figura 2A es un gráfico de las velocidades de adsorción relativas de N_2 y CO frente a un diámetro de partículas para las capas de zeolita que se muestran en la Figura 1; La Figura 2B es un gráfico de las velocidades de adsorción relativas de CO_2 y CH_4 frente a un diámetro de partículas para las capas de carbono que se muestran en la Figura 1; y La Figura 3 es un sistema/patín ilustrativo de AVP de H_2 con seis lechos utilizado con los ciclos de la presente invención.

Descripción detallada de la Invención

La invención describe procesos/ciclos de AVP de alta eficiencia empleados en un sistema de AVP con seis lechos para alcanzar 20-50 millones de pies cúbicos estándar por día (MPCED) de producción de hidrógeno. Los ciclos consiguen potenciar la recuperación de hidrógeno a partir de un gas que contiene hidrógeno. La invención

proporciona las siguientes características:

Los ciclos innovadores y avanzados de AVP para sistemas de AVP con seis lechos que pueden funcionar en el modo con límite inferior de capacidad, y proporcionan una alta recuperación de hidrógeno.

5

El ciclo innovador de AVP con seis lechos tiene al menos cuatro etapas de igualación lecho a lecho; y

La eliminación de las etapas inactivas en los ciclos y sin necesidad de depósitos de almacenamiento segregados.

10 Otro aspecto de la invención está relacionado con los adsorbentes cargados en los lechos de AVP de hidrógeno para potenciar la recuperación del hidrógeno. Se ha descubierto que las tres capas de adsorbentes en las que cada capa se subdivide en dos capas contienen el mismo adsorbente, sin embargo, con un tamaño diferente de partículas, se alcanza la adsorción y cinética de desorción óptimas para impurezas específicas presentes en el gas de alimentación que contiene hidrógeno. Esta configuración de estratificación adsorbente avanzada da de este modo como resultado una mejora en la recuperación de hidrógeno.

15

El proceso de AVP de hidrógeno típico utiliza tres adsorbentes diferentes cargados en el recipiente desde la parte inferior a la parte superior en el orden tal como (1) alúmina; (2) carbón activado (3) y zeolita. Hay cinco impurezas principales que se eliminan por el proceso de adsorción. La alúmina adsorbe la humedad contenida en el gas de alimentación. La capa de carbón activado se diseña habitualmente para encargarse del dióxido de carbono y los hidrocarburos, tales como metano, etano y propano. La función de la zeolita es eliminar monóxido de carbono, nitrógeno, argón y metano residual no extraído por el carbón activado colocado aguas arriba de la zeolita. Detalles adicionales de las capas de adsorbentes en cada lecho de AVP se discuten en Baksh *et al.* (patente de Estados Unidos n.º 7.537.742 B2), que es co-propiedad del cesionario de la presente invención.

20

25

La Figura 1 es ilustrativa de las capas adsorbentes en cada uno de los lechos de AVP de la invención. Las propiedades de adsorción en las capas dos, tres, cuatro y cinco se ajustan mediante la optimización del tamaño de partículas del adsorbente utilizado para conseguir un rendimiento óptimo del proceso de AVP. Como ejemplo, las capas dos y tres son idénticas (por ejemplo, ambas tienen el mismo material de carbono), excepto por la diferencia de los tamaños de partículas. Del mismo modo, las capas cuatro y cinco son idénticas (es decir, ambas tienen el mismo material de zeolita), pero su tamaño de partículas es diferente. El diseño y la configuración del recipiente del adsorbente es tal que serán capaces de adsorber cinco componentes diferentes. Idealmente, la capa 1 adsorbe la humedad, la capa 2 adsorbe dióxido de carbono, la capa 3 adsorbe metano, la capa 4 adsorbe monóxido de carbono y la capa 5 adsorbe nitrógeno. Los expertos en la técnica reconocerán que el proceso de recuperación se maximizará cuando se utilicen plenamente adsorbentes. Utilizando un diseño de tres capas, el experto en la técnica tiene solo tres grados de libertad para el tamaño del adsorbente para la eliminación de cinco componentes. El enfoque inventivo añade dos grados más de libertad por lo que es posible conseguir una recuperación superior de hidrógeno en combinación con el nuevo ciclo 6-1-4 de esta invención.

30

35

El ajuste del tamaño de partículas del adsorbente afecta a la velocidad del proceso de adsorción y desorción - la capacidad de adsorción es independiente del tamaño de partículas. La resistencia a la difusión en un proceso de adsorción es la suma de todas las resistencias a la difusión dentro de la partícula del material adsorbente. El cambio en el tamaño de partículas puede o no puede afectar a la resistencia total a la difusión en función del nivel de contribución del fenómeno de difusión afectado por el tamaño de partículas.

40

45

En una realización, la zeolita CaX (2.3) se utiliza en las capas cuarta y quinta de la Figura 1. Las capas tienen varios tamaños de manera tal que la capa cuatro adsorbe preferiblemente monóxido de carbono y la capa cinco adsorbe preferiblemente nitrógeno. Con referencia a la Figura 2A, se muestra la dependencia de las velocidades de adsorción relativas en el diámetro de partículas para tanto nitrógeno como monóxido de carbono. La técnica de columna de longitud cero (CLC) se emplea para obtener los datos representados en la Figura 2A. Véase, J.A.C. Silva y A.E. Rodrigues, *Gas. Sep. Purif.*, vol. 10, n.º 4, págs. 207-224, 1996.

50

El valor de la velocidad de adsorción relativa es la relación de la velocidad de adsorción real y el valor de la velocidad estándar. El valor de la velocidad estándar corresponde a una velocidad mínima requerida necesaria para producir el rendimiento del proceso de AVP potenciado. Si se utiliza el mismo tamaño de partículas (p. ej., 2,5 mm) para ambas capas en el proceso, se satisface el requisito de velocidad de nitrógeno. No obstante, como se puede determinar a partir de la Figura 2A, la velocidad de adsorción relativa de CO es solo del 40 % del mínimo requerido. Por lo tanto, es deseable disminuir el tamaño de partículas de zeolita en la capa cuatro a fin de aumentar la velocidad de adsorción de monóxido de carbono. Un valor de 1,5 mm cumple con la especificación de diseño para la velocidad de monóxido de carbono en esta realización a modo de ejemplo particular. Resulta evidente que se podría aumentar la velocidad de nitrógeno, así como disminuir el tamaño de partículas en la capa cinco. Como resultado, solo se realizará una mejora insignificante del proceso ya que la velocidad de adsorción de nitrógeno supera ya el valor mínimo requerido. Por otra parte; el rendimiento del proceso puede verse afectado por el aumento de la caída de presión en el lecho. La estratificación preferida para este ejemplo particular tendrá tamaños de partículas mayores de 2 mm y menores de 3 mm para la capa cinco y tamaños de partículas mayores de 0,5 mm y menores de 2 mm para la capa cuatro.

55

60

65

Las capas de carbono dos y tres serán ocupadas también por las partículas de carbono de tamaño diferente. La técnica de CLC se emplea una vez más para medir las velocidades de adsorción de dióxido de carbono y metano en el material de carbono. La velocidad de transmisión de datos normalizada por la velocidad estándar se resume en la Figura 2B. La velocidad para el metano es satisfactoria en tamaños de partículas inferiores a 2,25 mm. Sin embargo, las partículas más pequeñas son necesarias para obtener velocidades razonables de dióxido de carbono. Mediante la inspección de los datos de la Figura 2B, el tamaño de partículas de carbono preferido para extraer dióxido de carbono es inferior a 1,5 mm y para metano inferior a 2 mm. Así, la estratificación para este ejemplo particular tendrá tamaños de partículas mayores de 1,0 mm y menores de 2,0 mm para la capa tres y tamaños de partículas mayores de 0,5 mm y menores de 1,5 mm para la capa dos.

Los ciclos innovadores de AVP de la presente invención se describirán ahora con referencia a varias realizaciones a modo de ejemplo. En una realización de la invención, el sistema innovador de AVP emplea un ciclo de AVP con seis lechos adsorbentes de dieciocho etapas con cuatro etapas de igualación, además de las etapas de purga, despresurización y presurización del producto (denominado en la presente memoria como "el ciclo 6-1-4 de AVP"). El sistema de AVP incluye un suministro continuo de gas de alimentación a al menos un lecho que se encuentra en adsorción. Este lecho separa el suministro de gas de alimentación presurizado que contiene uno o más componentes más fuertemente adsorbibles y permite que el gas producto de hidrógeno menos fuertemente adsorbible salga del lecho.

Según un aspecto adicional de la invención, el sistema de AVP puede utilizarse en el modo límite inferior de capacidad con cinco lechos. El ciclo de AVP para los cinco lechos incluiría quince etapas, en la que un lecho se encuentra en adsorción y tiene tres etapas de igualación además de las etapas de purga y presurización del producto (denominado en la presente memoria como "el ciclo 5-1-3 de AVP").

En una realización alternativa de la invención, el sistema de AVP que tiene seis lechos emplea un ciclo de dieciocho etapas en las que dos de los lechos se encuentran simultáneamente en la fase de adsorción, y cada lecho tiene al menos tres etapas de igualación, además de las etapas de purga y presurización del producto (denominado en la presente memoria como "el ciclo 6-2-3 de AVP").

Con referencia a la Figura 3 y a las Tablas 2 y 3, se ilustra el modo de funcionamiento del ciclo 6-1-4 de AVP. Específicamente, la secuencia de las etapas del ciclo 6-1-4 de AVP se realiza en el orden enumerado en cada uno de los recipientes de adsorción sucesivamente.

Tabla 2: Gráfica del ciclo 6-1-4 de AVP

Etapas:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
N.º de lecho																		
1	A1	A2/PP1A3/PP2	PP2	I1	I2	I2	I3	PGP	I4/D1	D2	PG	I4'	I3'	I2'	I2'	I1'	PP11	PP2
2	I1'	PP1	PP2	A1	A2/PP1A3/PP2	PP2	I1	I2	I2	I3	PGP	I4/D1	D2	PG	I4'	I3'	I2'	I2'
3	I3'	I2'	I2'	I1'	PP1	PP2	A1	A2/PP1A3/PP2	PP2	I1	I2	I2	I3	PGP	I4/D1	D2	PG	I4'
4	D2	PG	I4'	I3'	I2'	I2'	I1'	PP1	PP2	A1	A2/PP1A3/PP2	I1	I2	I2	I3	PGP	PGP	I4/D1
5	I3	PGP	I4/D1	D2	PG	I4'	I3'	I2'	I2'	I1'	PP1	PP2	A1	A2/PP1A3/PP2	I1	I2	I2	I2
6	I1	I2	I2	I3	PGP	I4/D1	D2	PG	I4'	I3'	I2'	I2'	I1'	PP1	PP2	A1	A2/PP1A3/PP2	I2

5 Se entenderá que la nomenclatura proporcionada para este ciclo 6-1-4 de AVP es la misma para todos los ciclos

discutidos en la presente memoria, en la que:

- A1 = Primera etapa de adsorción
- A2/PP1 = Segunda etapa de adsorción/primera presurización del producto
- A3/PP2 = Tercera etapa de adsorción/segunda presurización del producto
- I1 = Primera igualación descendente
- I2 = Segunda igualación descendente
- I3 = Tercera igualación descendente
- PGP = Proporcionar gas de purga
- I4/D1 = Cuarta igualación descendente/primera despresurización
- D2 = Segunda despresurización
- PG = Purga
- I4' = Igualación ascendente (utilizando gas de la etapa I4)
- I3' = Igualación ascendente (utilizando gas de la etapa I3)
- I2' = Igualación ascendente (utilizando gas de la etapa I2)
- I1' = Igualación ascendente (utilizando gas de la etapa I1)
- PP1 = Primera presurización del producto
- PP2 = Segunda presurización del producto.

En algunos de los ciclos, como puede requerir el ciclo, se empleará la siguiente nomenclatura adicional:

- A2 = Segunda etapa de adsorción
- A3 = Tercera etapa de adsorción
- A4 = Cuarta etapa de adsorción
- A5 = Quinta etapa de adsorción
- PP = Presurización del producto
- A3/PP1 = Tercera etapa de adsorción/primera etapa de presurización del producto
- I3/D1 = Tercera igualación descendente/primera etapa de despresurización.

En la Tabla 2, las filas corresponden a un lecho particular en el proceso de AVP, mientras que las columnas representan el número de etapas. La duración de una secuencia de ciclo (una fila) se refiere al tiempo de ciclo total o tiempo de ciclo (TC). El tiempo de ciclo es constante para cada lecho. El cambio relativo en las etapas de ciclo entre los lechos puede deducirse asimismo de la Tabla 2. Este cambio es igual a 1/6 de TC puesto que hay seis lechos en este ciclo particular. A fin de que el ciclo 6-1-4 de AVP se defina por completo, han de asignarse los tiempos de etapa para la etapa 1, 2 y 3 - tal como t_1 , t_2 y t_3 . La duración del bloque básico, también denominado como el tiempo de alimentación, se define entonces como $t_1+t_2+t_3$. Empleando la periodicidad del ciclo descrito anteriormente, el $TC = 6*(t_1+t_2+t_3)$ y esto es consecuencia de que la duración de las etapas 1, 4, 7, 10, 13 y 16 (es decir, t_1); las etapas 2, 5, 8, 11, 14 y 17 (es decir, t_2) y las etapas 3, 6, 9, 12, 15 y 18 (es decir, t_3) son iguales en tiempo. Por ende, hay dieciocho etapas en el ciclo, el modo de funcionamiento para cada lecho se compensa con tres etapas.

La secuencia de ciclo 6-1-4 de AVP se describe ahora con respecto a un lecho que se somete a un ciclo de AVP completo. Un sistema de patín/línea de producción de AVP representativo que tiene seis lechos en paralelo se representa en la Figura 3, y se emplea en la presente memoria para ilustrar esta realización. El sistema incluye 30 válvulas de apertura/cierre, y 14 válvulas de control, 6 colectores (aunque el sexto colector está marcado como "7" en la Figura 3 con el fin de designar los componentes de patín de AVP con nomenclatura consistente, como se expone más adelante) y tuberías y empalmes asociados. Las válvulas de control se utilizan para controlar el caudal o la presión durante ciertas etapas del proceso mientras que las válvulas de apertura/cierre permiten la comunicación entre los diversos lechos en el sistema de AVP. La secuenciación de las válvulas que representa las etapas en el ciclo 6-1-4 de AVP de la Figura 3 se ilustra en la Tabla 3, a continuación, en el que la gráfica de la válvula define la posición o acción para cada válvula (es decir, abierto = A, cerrado = C, y VC = válvula de control) en una etapa particular del ciclo de AVP.

Tabla 3. Gráfica de válvulas del ciclo 6-1-4 de AVP

Nº Etapa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
XV-007	C	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV
XV-002	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV	CV
XV-011	O	O	O	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
XV-012	O	O	O	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
XV-013	C	C	C	C	C	C	C	O	O	C	O	O	C	C	C	C	C	C

ES 2 625 016 T3

Nº Etapa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
XV-014	C	C	C	C	C	C	C	C	CV	CV	CV	C	C	C	C	C	C	C
XV-015	C	C	C	C	O	O	O	C	C	C	C	CV	C	O	O	C	C	C
XV-017	C	C	C	O	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	O	O	O
XV-018	C	C	C	CV	CV	CV	CV	CV	CV	C	C	O	O	O	O	O	O	O
XV-021	C	C	C	O	O	O	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
XV-022	C	C	C	O	O	O	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
XV-023	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	O	O	C	O	O	C	C	C
XV-024	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	CV	CV	CV	C	C	C	C
XV-025	C	C	C	C	C	C	C	O	O	O	C	C	C	C	C	O	O	O
XV-027	O	O	O	C	C	C	O	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
XV-028	O	O	O	C	C	C	CV	CV	CV	CV	CV	CV	C	O	O	O	O	O
XV-031	C	C	C	C	C	C	O	O	O	C	C	C	C	C	C	C	C	C
XV-032	C	C	C	C	C	C	O	O	O	C	C	C	C	C	C	C	C	C
XV-033	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	O	O	C	O	O
XV-034	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	CV	CV	CV	C
XV-035	O	O	O	C	C	C	C	C	C	C	O	O	O	C	C	C	C	C
XV-037	C	C	C	O	O	O	C	C	C	O	C	C	C	C	C	C	C	C
XV-038	O	O	O	O	O	O	C	C	C	CV	CV	CV	CV	CV	CV	C	O	O
XV-041	C	C	C	C	C	C	C	C	C	O	O	O	C	C	C	C	C	C
XV-042	C	C	C	C	C	C	C	C	C	O	O	O	C	C	C	C	C	C
XV-043	C	O	O	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	O	O
XV-044	CV	CV	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	CV
XV-045	C	C	C	O	O	O	C	C	C	C	C	C	C	O	O	O	C	C
XV-047	C	C	C	C	C	C	O	O	O	C	C	C	O	C	C	C	C	C
XV-048	C	O	O	O	O	O	O	O	O	C	C	C	CV	CV	CV	CV	CV	CV
XV-051	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	O	O	O	C	C	C
XV-052	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	O	O	O	C	C	C
XV-053	C	O	O	C	O	O	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
XV-054	C	C	CV	CV	CV	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
XV-055	O	C	C	C	C	C	O	O	O	C	C	C	C	C	C	C	O	O
XV-057	C	C	C	C	C	C	C	C	C	O	O	O	C	C	C	O	C	C
XV-058	CV	CV	CV	C	O	O	O	O	O	O	O	O	C	C	C	CV	CV	CV
XV-061	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	O	O	O
XV-062	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	O	O	O
XV-063	C	C	C	C	O	O	C	O	O	C	C	C	C	C	C	C	C	C
XV-064	C	C	C	C	C	CV	CV	CV	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
XV-065	C	O	O	O	C	C	C	C	C	O	O	O	C	C	C	C	C	C
XV-067	O	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	O	O	O	C	C	C
XV-068	CV	CV	CV	CV	CV	CV	C	O	O	O	O	O	O	O	O	C	C	C

Etapa n.º 1 (A1): La mezcla de gas de alimentación se introduce en la parte inferior del lecho 1 desde el colector de alimentación a alta presión. Ambas válvulas 011 (es decir, XV-011) y 012 (es decir, XV-012) están abiertas mientras que todas las demás válvulas del lecho 1 (XV-01x) están cerradas. En lo sucesivo, se hará referencia a los números de etiqueta de las válvulas sin utilizar el prefijo XV. La mezcla de alimentación fluye desde la parte inferior a la parte superior del lecho. Esta dirección de flujo ascendente en el recipiente se denomina como flujo en co-corriente con respecto a la alimentación. Durante esta etapa de adsorción, las impurezas se adsorben y se recoge y dirige el hidrógeno de alta pureza a través del colector número 2 del producto. La válvula de control 002 se utiliza para controlar la presión en el lecho de las etapas (A1), (A2) o (A3) (es decir, etapas de alimentación/producción).

Etapas n.º 2 y 3 (A2/PP1 y A3/PP2): Estas etapas son idénticas excepto por su respectiva duración t_2 y t_3 . Las válvulas 011 y 012 permanecen abiertas, y el lecho 1 continúa la etapa de alimentación/producción. Además, la válvula de control 007 se utiliza para controlar la velocidad de las etapas de presurización del producto (PP1) y (PP2). Como se muestra anteriormente en la Tabla 2, es el lecho 2 el que está recibiendo el gas de presurización

del producto del lecho 1 en las etapas n.º 2 y 3 a través de las válvulas 007, 027 y 028. Todas las demás válvulas asociadas con el lecho 2 están cerradas. Es importante que las presiones en el lecho 1 y en el lecho 2 sean iguales al final de la etapa (A3/PP2) de modo que el lecho 2 pueda entrar en el etapa de alimentación/producción (A1) de la etapa 4. También es deseable que los caudales de las etapas (PP1) y (PP2) estén regulados por la válvula 007 para que sean lo más bajos posible con el fin de prevenir la fluidización y mantener la presión en el lecho 1 lo más alta posible.

Etapa n.º 4 (E1): el lecho 1 se somete a la primera etapa de igualación lecho a lecho, mientras que el lecho 3 se encuentra en contracorriente recibiendo el gas de igualación - etapa (I1'). La etapa (I1) se suele referir como una etapa de despresurización en co-corriente. Las válvulas 017, 018 del lecho 1 y las válvulas 037 y 038 del lecho 3 están abiertas mientras que todas las demás válvulas del lecho 1 y lecho 3 (es decir, 01x y 03x) están cerradas. La velocidad de las etapas (I1)-(I1') está controlada por la válvula de control 018.

Etapas n.º 5 y 6 (I2): el lecho 1 se somete a la segunda igualación (I2) para la duración de estas dos etapas. Específicamente, la presión en el lecho 1 cae debido al flujo del gas en co-corriente que se somete en la etapa (I2') del lecho 1 al lecho 4 durante estas etapas. Las presiones en los dos lechos son iguales al final de la etapa n.º 6. Las válvulas 015, 045 y 048 están completamente abiertas mientras que la válvula 018 controla la velocidad de las etapas (I2)-(I2').

Etapa n.º 7 (I3): el lecho 1 ejecuta la tercera etapa de igualación (I3). Esta etapa utiliza el mismo colector de igualación al igual que en la etapa (I2) previa. Las válvulas 015, 055 y 058 están completamente abiertas mientras que la válvula 018 controla la velocidad de las etapas (I3)-(I3'). Es evidente que la nomenclatura de la válvula del lecho 5 está en comunicación con el lecho 1 utilizando el colector número 5.

Etapa n.º 8 (PGP): el lecho 1 en co-corriente proporciona gas de purga al lecho 6, que está siendo purgado. Para ello, esta válvula de extremo 013 está abierta y la válvula de control 018 se utiliza para controlar la velocidad de la etapa (PGP). El gas de purga fluye del colector número 3 de purga al lecho 6 mientras que las válvulas 063 y 068 están completamente abiertas. La etapa de purga en contracorriente utiliza una corriente rica en hidrógeno para ayudar a la regeneración de los adsorbentes en los recipientes. Las impurezas desorbidas dejan el lecho 6 a través de la válvula de control 064 y, finalmente, se recogen en un depósito de compensación (no mostrado). Desde el punto de vista operativo, cuanto más tiempo se encuentren en la etapa de purga mejor será la regeneración del adsorbente y en consecuencia mejor la capacidad de trabajo del proceso. Esto significa que el tiempo de etapa de purga (t_2) debe ser largo y como se menciona anteriormente, el tiempo de etapa de presurización del producto (t_2+t_3) debe ser largo también, si lo permite el proceso. Esta condición se satisface con facilidad para el ciclo 6-1-4 ciclo mostrado en la Tabla 2 ya que las etapas (PG) y (PP1) se superponen; su tiempo de etapa es t_2 .

Etapa n.º 9 (I4/D1): esta etapa es la cuarta etapa de igualación (I4) acoplada con una etapa de despresurización (D1) ejecutada secuencialmente. Al comienzo de la etapa 9, las válvulas 013, 063 y 068 están abiertas y la válvula 018 se utiliza para controlar la velocidad de la cuarta etapa de igualación. La gestión apropiada de los procesos de adsorción/desorción que tienen lugar en esta etapa es esencial para el rendimiento superior del ciclo 6-1-4. El gas utilizado para la etapa de despresurización en co-corriente (I4) ha de ser rico en hidrógeno. Esto se consigue mediante la tecnología de estratificación avanzada (es decir, el uso del adsorbente zeolita de tipo CaX mientras que las partículas más grandes se localizan en la parte superior del recipiente y las partículas más pequeñas en la parte inferior), discutido con detalle anteriormente. Una vez que el lecho 1 y el lecho 6 hayan alcanzado la igualación de presión (es decir, se complete IG4), las válvulas mencionadas anteriormente asociadas con la etapa IG4 están cerradas y la válvula 014 se abre para permitir la etapa de despresurización, en la que una porción del gas en el lecho 1 se dirige al depósito de compensación (no mostrado). El caudal de (D1) es controlado por la válvula 014. Como consecuencia, esta etapa 9 de ciclo 6-1-4 no genera ningún gas de escape para la duración de la etapa IG4. El gas de escape se genera solo durante la parte de D1 de la etapa 9. La duración de esta etapa de igualación de presión más baja y despresurización (es decir, IG4/D1) es inferior al 15 % del tiempo de alimentación (es decir, $(t_1+t_2+t_3)$).

Etapa n.º 10 (D2): esta etapa en el lecho 1 se lleva a cabo para deshacerse del recipiente de las impurezas adsorbidas durante las etapas en co-corriente (AD, IG, PGP) a través de la parte inferior del recipiente. En este punto del ciclo, la presión en el recipiente es demasiado baja para que se adhieran las impurezas. Como resultado, se desorben y dirigen en contracorriente al depósito de compensación a través de la válvula 014. Todas las demás válvulas asociadas con el lecho 1 están cerradas durante esta etapa.

Etapa n.º 11 (PG): el lecho 1 está recibiendo el gas de purga procedente del lecho 2. Las válvulas 018, 013, 023 están completamente abiertas; la velocidad de la etapa (PGP) y la presión en el lecho 1 se controlan a través de válvulas 028 y 014, respectivamente.

Etapa n.º 12 (I4'): la primera etapa designada como igualación ascendente hace referencia al lecho que recibe el gas. Los lechos en las etapas (I4/D1) e (I4') están interactuando de manera tal que el contenido del lecho 2 se transfiere al lecho 1 hasta que las presiones en los dos lechos se iguala. Las válvulas 023, 013 y 018 están completamente abiertas y la acción de la válvula de control 028 proporciona medios para controlar la velocidad de esta etapa.

Etapa n.º 13 (I3'): el lecho 1 está recibiendo el gas procedente del lecho 3. Las válvulas 015, 035 y 018 están completamente abiertas y la acción de la válvula de control 038 proporciona medios para controlar la velocidad.

Etapas n.º 14 y 15 (I2'): el lecho 1 está recibiendo el gas procedente del lecho 4. Las válvulas 015, 045 y 018 están completamente abiertas y la acción de la válvula de control 048 proporciona medios para controlar la velocidad.

Etapa n.º 16 (I1'): la última etapa de igualación en la que el lecho 1 recibe el gas procedente del lecho 5. Las

válvulas 017, 057 y 018 están completamente abiertas y la acción de la válvula de control 058 proporciona medios para controlar la velocidad.

Etapas n.º 17 y 18 (PP1 y PP2): las dos últimas etapas en la descripción del ciclo con respecto al lecho 1 son las etapas (PP1) y (PP2) que ya se han descrito anteriormente.

5 La funcionalidad básica del ciclo puede describirse de la misma manera para cualquier lecho. Sin embargo, una vez que se define la secuencia de etapa para un lecho, las secuencias de etapa para otros lechos seguirán el mismo orden y el cambio temporal relativo será 1/6 del tiempo de ciclo (TC), (por ejemplo, el lecho 2 inicia la adsorción (A1) en el etapa número 4, en comparación con el lecho n.º 1 que pasa por (A1) en la etapa número 1).

10 Durante el funcionamiento de una planta que emplea un proceso de AVP con seis lechos, puede ser deseable operar la planta en el modo con límite inferior de capacidad durante un periodo de tiempo limitado. En el caso de un sistema de AVP de recipiente/seis lechos, este modo permite la producción continua con solo cinco recipientes en línea, mientras que uno de los lechos o válvulas asociadas con un lecho dado falla y necesita ser reparado. A menudo se observa en la industria que el rendimiento de la planta se deteriora significativamente cuando funciona en modo excepcional. Con referencia a la Tabla 4, a continuación, se describe el modo de funcionamiento del nuevo ciclo 5-1-3 de AVP.

Tabla 4: Gráfica del ciclo 5-1-3 de AVP

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Etapa: N.º de lecho	1	A1	A2	A3/PP	I1	I1	I2	PPG	I3/D1	D2	PG	I3'	I2'	I1'	I1'	PP
	2	I1'	I1'	PP	A1	A2	A3/PP	I1	I1	I2	PPG	I3/D1	D2	PG	I3'	I2'
	3	PG	I3'	I2'	I1'	I1'	PP	A1	A2	A3/PP	I1	I1	I2	PPG	I3/D1	D2
	4	PPG	I3/D1	D2	PG	I3'	I2'	I1'	I1'	PP	A1	A2	A3/PP	I1	I1	I2
	5	I1	I1	I2	PPG	I3/D1	D2	PG	I3'	I2'	I1'	I1'	PP	A1	A2	A3/PP

20 A fin de que el ciclo 5-1-3 de AVP se defina por completo, han de designarse los tiempos de etapa para las

- etapas 1, 2 y 3 - tal como t_1 , t_2 y t_3 . La duración de bloque básico se define entonces como $t_1+t_2+t_3$. Mediante el uso de la periodicidad del ciclo total, el $CT = 5*(t_1+t_2+t_3)$ y esto es consecuencia de que la duración de las etapas 1, 4, 7, 10, 13 son iguales a t_1 ; las etapas 2, 5, 8, 11, 14 son iguales a t_2 y las etapas 3, 6, 9, 12, 15 son iguales a t_3 . La secuencia de ciclo se describirá a continuación con detalle con respecto al lecho 1 para fines de ilustración suponiendo que el lecho 6 está fuera de línea y completamente aislado del resto del proceso. La funcionalidad del ciclo se explica utilizando el patín de la válvula del proceso de AVP de hidrógeno mostrado en la Figura 3. La secuencia de ciclo 5-1-3 de AVP se describe ahora con respecto a un lecho que se somete a un ciclo de AVP completo (es decir, TC).
- 5
- 10 Etapas 1 y 2 (A1 y A2): el lecho 1 comienza el ciclo de proceso en las etapas de adsorción (A1) y (A2). Ambas válvulas 011 y 012 están abiertas mientras que todas las demás válvulas del lecho 1 (01x) están cerradas; el hidrógeno de alta pureza se recoge y se envía a través del colector número 2 del producto. La válvula de control 002 se utiliza para controlar la presión en el lecho en las etapas (A1), (A2) o (A3) (es decir, todas las etapas de alimentación/producción).
- 15 Etapa 3 (A3/PP1): las válvulas 011 y 012 permanecen abiertas, el lecho 1 continúa en la etapa de alimentación/producción. Además, la válvula de control 007 se utiliza para controlar la velocidad de la etapa de presurización del producto (PP1). Por lo tanto, el lecho 2 está recibiendo el gas de presurización del producto precedente del lecho 1 a través de las válvulas 007, 027 y 028. Todas las demás válvulas asociadas con el lecho 2 están cerradas.
- 20 Etapas 4 y 5 (I1): el lecho 1 se somete a la primera etapa de igualación lecho a lecho (I1), mientras que el lecho 3 se encuentra en contracorriente recibiendo el gas de igualación - etapa (I1'). Las válvulas 017, 018 del lecho 1 y las válvulas 037 y 038 del lecho 3 están abiertas mientras que todas las demás válvulas del lecho 1 y lecho 3 (01x) y (03X) están cerradas. La velocidad de las etapas (I1)-(I1') está controlada por la válvula de control 018.
- 25 Etapa 6 (I2): la presión en el lecho 1 cae debido al flujo de gas que se somete a la etapa del lecho 1 al lecho 4 (I2'). Las presiones en los dos lechos son iguales al final de la etapa 6. Las válvulas 015, 045 y 048 están completamente abiertas mientras que la válvula 018 controla la velocidad de las etapas (I2)-(I2').
- 30 Etapa 7 (PGP): el lecho 1 envía gas de purga al lecho 5 en la etapa de purga (PG). La válvula 013 está abierta y la válvula de control 018 se utiliza para controlar la velocidad de la etapa (PGP). El gas de purga fluye a través del colector número 3 de purga al lecho 5 mientras que las válvulas 053 y 058 están completamente abiertas. Las impurezas desorbidas dejan el lecho 5 a través de la válvula de control 054 y, eventualmente, se recogen en el depósito de compensación (no mostrado).
- 35 Etapa 8 (I3/D1): en el lecho 1, la etapa (I3) se acopla con una etapa de despresurización (D1). Ambos extremos del lecho 1 están abiertos. La válvula 014 se abre para permitir la etapa de despresurización en la que una porción de gas en el lecho 1 se dirige al depósito de compensación. Mientras tanto, las válvulas 015, 055 y 058 están abiertas y la válvula 018 se utiliza para controlar la velocidad de la tercera etapa de igualación. La duración de esta etapa de igualación de presión más baja y despresurización (I3/D1) es inferior al 15 % del tiempo de alimentación.
- 40 Etapa 9 (D2): el fin de esta etapa es deshacerse del recipiente de las impurezas adsorbidas durante las etapas en co-corriente (AD, IG, PGP) a través de la parte inferior del recipiente a través de la válvula 014. Todas las demás válvulas asociadas con el lecho 1 están cerradas durante esta etapa.
- 45 Etapa 10 (PG): es una etapa de purga en la que el lecho 1 está recibiendo el gas de purga procedente del lecho 2. Las válvulas 018, 013, 023 están completamente abiertas. La velocidad de la etapa (PGP) y la presión en el lecho 1 se controlan a través de válvulas 028 y 014, respectivamente.
- 50 Etapa 11 (I3'): esta primera etapa de igualación ascendente designa que el lecho está recibiendo el gas. Los lechos en las etapas (I3) e (I3') están interactuando de manera tal que el contenido del lecho 2 se transfiere al lecho 1 hasta que las presiones en los dos lechos se igualan. Las válvulas 025, 015 y 018 están completamente abiertas y la acción de la válvula de control 028 proporciona medios para controlar la velocidad.
- 55 Etapa 12 (I2'): el lecho 1 está recibiendo el gas procedente del lecho 3. Las válvulas 015, 035 y 018 están completamente abiertas y la acción de la válvula de control 038 proporciona medios para controlar la velocidad.
- 60 Etapas 13 y 14 (I1'): el lecho 1 recibe el gas procedente del lecho 4. Las válvulas 017, 047 y 018 están completamente abiertas y la acción de la válvula de control 048 proporciona medios para controlar la velocidad de la etapa de igualación de las etapas 13 y 14.
- 65 Etapa 15 (PP1): la última etapa en la descripción del ciclo con respecto al lecho 1 en el que se produce la presurización del producto, como se describe anteriormente.
- El sistema de AVP con cinco lechos puede ser deseable para operar aún más la planta en un modo con límite inferior de capacidad con solo cuatro lechos/recipientes en línea. En tal caso, se utiliza el ciclo 4-1-2 de AVP de Baksh *et al.* (patente de Estados Unidos n.º 6.340.382).

Un ejemplo, un proceso de AVP con los ciclos descritos en la presente memoria se simuló en las condiciones del proceso enumeradas en la Tabla 5, a continuación. El modelo asume la siguiente composición de gas de alimentación para todos los ciclos: 73,87 % de hidrógeno, 0,23 % de nitrógeno, 3,31 % de monóxido de carbono, 16,37 % de dióxido de carbono, 5,94 % de metano y 0,3 % de agua. La temperatura del gas de alimentación era de 37,8 °C (100 °F) y la presión de gas de alimentación era de 2.583 kPa (360 Psig).

Tabla 5: Ciclos de AVP de H₂ y el rendimiento del proceso correspondiente

Ciclo de AVP	6-1-4	5-1-3	4-1-2 (técnica relacionada)
Tiempo del ciclo [min]	10,6	9,17	9,0
[t ₁ , t ₂ , t ₃] [s]	[25, 65, 15]	[55, 15, 40]	[35, 65, 35]
Presión alta [kPa (Psig)]	2.583 (360)	2.583 (360)	2.583 (360)
Presión baja [kPa (Psig)]	136 (5,0)	136 (5,0)	136 (5,0)
Temperatura [K]	310	310	310
ID del lecho [m (ft)]	3,8 (12,5)	3,8 (12,5)	3,8 (12,5)
Velocidad de alimentación [10 ⁶ estándar m ³ por día (MPCED)]	1,76 (62)	1,76 (62)	1,76 (62)
Velocidad del producto de H ₂ [10 ⁶ estándar m ³ por día (MPCED)]	1,14 (40,3)	1,11 (39,15)	1,05 (37,1)
FTL total [kg/t H ₂ /d (lbs/TPD H ₂)]	2,81 (5.618)	2,41 (4.820)	2,03 (4.069)
Pureza de H₂ [%]	99,999	99,999	99,999
Recuperación de H₂ [%]	88,0	85,5	81,0

Nota 1: 10⁶ estándar m³ por día (MPCED) representa millones de pies cúbicos estándar (pies cúbicos) por día de gas en el que las condiciones estándar asumidas son 1 atmósfera de presión y una temperatura de 21,1 °C (70 °F);

Nota 2: 1 Psig es una unidad de presión correspondiente a 6.894,757 pascales; 1 lbs es una unidad de masa correspondiente a 0,4535924 kg; K corresponde al SI de unidades para una temperatura de 1 Kelvin; ft representa la distancia de 1 pie igual a 0,3048 metros;

Nota 3: TPD de H₂ representa toneladas (2.000 lbs) de hidrógeno por día;

Nota 4: FTL (factor de tamaño del lecho) es la relación de la masa total de adsorbentes en todos los lechos y la producción diaria de hidrógeno en toneladas por día (véase Nota 3);

Nota 5: El ciclo 4-1-2 de AVP ha sido modificado para fines de la simulación para incluir la estratificación del adsorbente de la presente invención. Esto proporciona una comparación individual de los ciclos.

5 Como se muestra en la Tabla 5, los nuevos ciclos que tienen una etapa de igualación adicional, sin la necesidad de etapas inactivas o de otra manera depósitos de almacenamiento fuera de línea proporcionan una recuperación de hidrógeno tan alta como 88,0 %. Por otro lado, en el modo con límite inferior de capacidad con cinco y cuatro lechos en línea, la recuperación del hidrógeno cae a 85,5 % y 81,0 %, respectivamente.

10 Una realización alternativa de la presente invención es un sistema de AVP con seis lechos que tiene una doble alimentación. Uno de los beneficios del uso de un ciclo de doble alimentación es una mayor producción y un menor factor de tamaño del lecho (FTL). Como se discute con respecto a los ciclos anteriores, FTL es una medida de la productividad del proceso por tonelada de hidrógeno producido por día. Este ciclo de AVP alternativo tiene dieciocho etapas, dos lechos se encuentran simultáneamente en la etapa de alimentación/proceso y tres etapas del ciclo se dedican a la igualación lecho a lecho. Este ciclo 6-2-3 de AVP tiene una mayor capacidad de rendimiento para producir 1,13-1,98 x 10⁶ estándar m³ por día (40-70 MPCED) de hidrógeno frente a 0,57-1,14 x 10⁶ estándar m³ por día (20-50 MPCED) para un ciclo 6-1-4 de AVP. El resto de las características innovadoras del ciclo 6-2-3 de AVP son las mismas que las discutidas con respecto a los ciclos 6-1-4 y 5-1-3 recién diseñados de AVP.

20 El ciclo 6-2-3 de AVP tiene dieciocho etapas con dos alimentaciones paralelas y tres etapas de igualación lecho a lecho. Puesto que se utilizan seis lechos con una etapa de dieciocho ciclos (18 ÷ 6), las etapas de tres ciclos y sus tiempos (t₁, t₂, t₃) han de describirse para la definición completa del ciclo. Una forma alternativa para la descripción de una gráfica de ciclo es proporcionar información sobre todos los lechos para la duración del bloque unitario en lugar de describir la secuencia completa para un lecho individual. Por ejemplo, mediante la definición de todas las etapas del ciclo en las etapas 1, 2 y 3 para el ciclo 6-2-3 de AVP en la Tabla 6, se han definido cualitativamente todas las posibles interacciones entre lechos, válvulas y colectores. La misma secuencia se repetirá periódicamente con un periodo igual a t₁+t₂+t₃. Este nuevo método se utilizará para explicar el funcionamiento del ciclo 6-2-3 de AVP con referencia a la Tabla 6, a continuación, junto con la Figura 3.

Tabla 6: Gráfica del ciclo 6-2-3 de AVP

Etapa:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
N.º de lecho																			
1	A1	A2	A3	A4	A5	A6/PP	I1	I1	I2	PPG	I3/D1	D2	PG	I3'	I2'	I1'	I1'	PP	
2	I1'	I1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6/PP1	I1	I1	I2	PPG	I3/D1	D2	PG	I3'	I2'	
3	PG	I3'	I2'	I1'	I1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6/PP	I1	I1	I2	PPG	I3/D1	D2	
4	PPG	I3/D1	D2	PG	I3'	I2'	I1'	I1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6/PP	I1	I1	I2	
5	I1	I1	I2	PPG	I3/D1	D2	PG	I3'	I2'	I1'	I1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6/PP	
6	A4	A5	A6/PP	I1	I1	I2	PPG	I3/D1	D2	PG	I3'	I2'	I1'	I1'	PP	A1	A2	A3	

Etapa n.º 1: dos lechos están procesando la alimentación (etapa de adsorción), a saber, lecho 1 y lecho 6. De ello se deduce que las válvulas 011, 012, 061 y 062 estarán abiertas. El lecho 5 y el lecho 2 están en comunicación ejecutando las etapas (I1)-(I1'), en el que las válvulas 057, 027, 028 están abiertas y la válvula 058 se utiliza para

controlarse la velocidad. El lecho 4 está proporcionando el gas de purga (PG) para el lecho 3. La velocidad de la etapa (PGP) es controlada por la válvula 048, mientras que las válvulas 043, 033, 038 están completamente abiertas y la válvula 034 se utiliza para controlar la presión en el lecho 3.

5 Etapa n.º 2: dos lechos están procesando la alimentación (etapa de adsorción), a saber, lecho 1 y lecho 6. Por consiguiente, se deduce que las válvulas 011, 012, 061 y 062 están abiertas. El lecho 5 y el lecho 2 continúan las etapas de igualación (I1)-(I1'), las válvulas 057, 027, 028 están abiertas y la válvula 058 se utiliza para controlar la velocidad. El lecho 4 y el lecho 3 se someten a las etapas de (I3/D1)-(I3') (es decir, la superposición de las etapas de igualación de baja presión y despresurización - (D1). La duración de esta etapa de igualación de presión más baja y despresurización (es decir, I3/D1) es inferior al 15 % del tiempo de alimentación. Las válvulas 045, 035, 038 están abiertas y la válvula 048 se utiliza para controlar el caudal de gas al lecho 3. Al mismo tiempo, el lecho 4 se despresuriza a través de la válvula 044 y el gas de la etapa (D1) se dirige hacia el depósito de compensación a través del colector número 4.

10 Etapa n.º 3: dos lechos están procesando la alimentación (etapa de adsorción), a saber, lecho 1 y lecho 6. Por consiguiente, se deduce que las válvulas 011, 012, 061 y 062 estarán abiertas. El lecho 2 se encuentra en la etapa de presurización del producto (PP). Las válvulas 027 y 028 están abiertas mientras que la válvula 007 controla la velocidad de esta etapa. El lecho 5 y el lecho 3 están en comunicación ejecutando las etapas (I2)-(I2'), las válvulas 055, 035, 038 están abiertas y la válvula 058 se utiliza para controlar la velocidad. El lecho 4 se encuentra en la etapa de despresurización cuando el lecho se despresuriza en contracorriente y su contenido se libera al depósito de compensación a través de la válvula 044 y el colector número 4.

15 El rendimiento para el ciclo 6-2-3 de AVP se obtuvo a través del modelado matemático de los procesos de AVP de hidrógeno. Los resultados se resumen en la Tabla 7. El modelo asumido sigue la composición de gas de alimentación para todos los ciclos: 73,87 % de hidrógeno, 0,23 % de nitrógeno, 3,31 % de monóxido de carbono, 16,37 % de dióxido de carbono, 5,94 % de metano y 0,3 % de agua. La temperatura del gas de alimentación era de 37,8 °C (100 °F) y la presión del gas de alimentación era de 2.583 kPa (360 Psig). La configuración de los recipientes y adsorbentes utilizados fue exactamente igual que la considerada para los ciclos de alimentación individuales (es decir, véase Tabla 5).

30 **Tabla 7: Ciclos de AVP de H₂ con seis lechos de doble alimentación y rendimiento del proceso correspondiente**

	6-2-2	6-2-3
Tiempo del ciclo [min]	10,1	9,8
[t ₁ , t ₂ , t ₃] [s]	[56, 45, 0]	[50, 15, 33]
Presión alta [kPa (Psig)]	2.583 (360)	2.583 (360)
Presión baja [kPa (Psig)]	136 (5,0)	136 (5,0)
Temperatura [K]	310	310
ID del lecho [m (ft)]	3,8 (12,5)	3,8 (12,5)
Velocidad de alimentación [10 ⁶ estándar m ³ por día (MPCED)]	2,19 (77,3)	2,19 (77,9)
Velocidad del producto de H ₂ [10 ⁶ estándar m ³ por día (MPCED)]	1,38 (48,8)	1,40 (49,4)
FTL total [kg/t H ₂ /d (lbs/TPD H ₂)]	2,32 (4.639)	2,29 (4.583)
Pureza de H₂ [%]	99,999	99,999
Recuperación de H₂ [%]	85,0	86,0

Nota 1: 10⁶ estándar m³ por día (MPCED) representa millones de pies cúbicos estándar (pies cúbicos) por día de gas en el que las condiciones estándar asumidas son 1 atmósfera de presión y una temperatura de 21,1 °C (70 °F);

Nota 2: 1 Psig es una unidad de presión correspondiente a 6.894,757 pascales; 1 lbs es una unidad de masa correspondiente a 0,4535924 kg; K corresponde al SI de unidades para una temperatura de 1 Kelvin; ft representa la distancia de 1 pie igual a 0,3048 metros;

Nota 3: TPD de H₂ representa toneladas (2.000 lbs) de hidrógeno por día;

Nota 4: FTL (factor de tamaño del lecho) es la relación de la masa total de adsorbentes en todos los lechos y la producción diaria de hidrógeno en toneladas por día (véase Nota 3);

Nota 5: El ciclo 6-2-2 de AVP ha sido modificado para fines de la simulación para incluir la estratificación del adsorbente de la presente invención. Esto proporciona una comparación individual de los ciclos.

35 Los resultados de simulación muestran que el beneficio de un nuevo ciclo 6-2-3 de AVP es un punto adicional en la recuperación de hidrógeno. Por consiguiente, en ambos ciclos notificados en la Tabla 7, la estratificación de adsorbente de la presente invención se ha incorporado en los ciclos. Por consiguiente, el rendimiento del ciclo 6-2-2 de la Tabla 7 no se corresponde con el rendimiento de la técnica anterior. La recuperación del proceso de AVP de H₂ de la técnica anterior utilizando el ciclo 6-2-2 sin la estratificación avanzada de los adsorbentes se encuentra en el intervalo del 82 al 83 %.

40 La principal ventaja del ciclo 6-2-3 frente al ciclo 6-1-4 es el factor de tamaño del lecho (FTL) menor. El FTL es 2,81 kg/t H₂/d (5618 lbs/TPDH₂) para el ciclo 6-1-4 de AVP (Tabla 5) y 2,29, 2,81 kg/t H₂/d (4583 lbs/TPDH₂) para el ciclo 6-2-3 de AVP (Tabla 7), respectivamente. Como resultado, el ciclo 6-2-3 de AVP puede producir una

mayor cantidad de hidrógeno utilizando una menor cantidad de adsorbentes.

5 Si bien la invención ha sido descrita en detalle con referencia a la realización específica de la misma, resultará evidente para un experto en la técnica que varios cambios y modificaciones pueden realizarse, y emplearse equivalentes, sin apartarse del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un proceso de adsorción por variación de presión para la separación de un suministro de gas de alimentación de presurizado que contiene uno o más componentes fuertemente adsorbibles de al menos un componente de gas producto menos fuertemente adsorbible en un sistema adsorbente con seis lechos para producir una corriente continua de gas producto enriquecido en el componente menos fuertemente adsorbible y una corriente de gas de escape que está enriquecida en componentes fuertemente adsorbibles, en donde la duración de igualación descendente de presión más baja y de la primera etapa de despresurización es inferior al 15 % del tiempo de alimentación, y el ciclo del proceso tiene dieciocho etapas que incluyen cuatro etapas de igualación lecho a lecho según la siguiente gráfica del ciclo:

Etapas:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
N.º de lecho																		
1	A1	A2/PPA3/PP1	A2/PPA3/PP2	I1	I2	I2	I3	PGP	I4/D1	D2	PG	I4'	I3'	I2'	I2'	I1'	PP11	PP2
2	I1'	PP1	PP2	A1	A2/PPA3/PP1	A2/PPA3/PP2	I1	I2	I2	I3	PGP	I4/D1	D2	PG	I4'	I3'	I2'	I2'
3	I3'	I2'	I2'	I1'	PP1	PP2	A1	A2/PPA3/PP1	A2/PPA3/PP2	I1	I2	I2	I3	PGP	I4/D1	D2	PG	I4'
4	D2	PG	I4'	I3'	I2'	I2'	I1'	PP1	PP2	A1	A2/PPA3/PP1	A2/PPA3/PP2	I1	I2	I2	I3	PGP	I4/D1
5	I3	PGP	I4/D1	D2	PG	I4'	I3'	I2'	I2'	I1'	PP1	PP2	A1	A2/PPA3/PP1	A2/PPA3/PP2	I1	I2	I2
6	I1	I2	I2	I3	PGP	I4/D1	D2	PG	I4'	I3'	I2'	I2'	I1'	PP1	PP2	A1	A2/PPA3/PP1	A2/PPA3/PP2

en donde:

A1 = Primera etapa de adsorción
 A2/PP1 = Segunda etapa de adsorción/primer presurización del producto
 A3/PP2 = Tercera etapa de adsorción/segunda presurización del producto
 I1 = Primera igualación descendente
 I2 = Segunda igualación descendente
 I3 = Tercera igualación descendente
 PGP = Proporcionar gas de purga
 I4/S1 = Cuarta igualación descendente/primer despresurización
 S2 = Segunda despresurización
 PG = Purga
 I4' = Igualación ascendente (utilizando gas de la etapa I4)
 I3' = Igualación ascendente (utilizando gas de la etapa I3)
 I2' = Igualación ascendente (utilizando gas de la etapa I2)
 I1' = Igualación ascendente (utilizando gas de la etapa I1)
 PP1 = Primera presurización del producto
 PP2 = Segunda presurización del producto.

- 5
2. El proceso de adsorción por variación de presión de la reivindicación 1, en donde el sistema con seis lechos se encuentra en modo límite inferior de capacidad con cinco lechos en línea, el ciclo del proceso tiene quince etapas que incluyen tres etapas de igualación lecho a lecho, mientras que uno de los lechos se encuentra en producción.
- 10
3. El proceso de adsorción por variación de presión de la reivindicación 1, en donde dicho gas producto menos fuertemente adsorbible es hidrógeno.
4. El proceso de adsorción por variación de presión de la reivindicación 1, en donde el suministro de gas de alimentación contiene uno o más componentes fuertemente adsorbibles seleccionados del grupo que consiste en hidrocarburos, dióxido de carbono, monóxido de carbono, argón, nitrógeno y vapor de agua.
- 15
5. El proceso de adsorción por variación de presión de la reivindicación 1, en donde cada lecho adsorbente contiene alúmina, carbono y un material zeolítico configurados en capas en este orden particular.
6. El proceso de adsorción por variación de presión de la reivindicación 5, en el que las capas de carbono y zeolita están cada una subdivididas en dos capas con un tamaño de partículas diferente.
- 20
7. El proceso de adsorción por variación de presión de la reivindicación 6, en el que la primera de las capas de carbono subdivididas encontrada por el suministro de gas de alimentación tiene un tamaño de partículas de 0,5 a 1,5 mm y una afinidad para las impurezas de dióxido de carbono.
8. El proceso de adsorción por variación de presión de la reivindicación 6, en el que la segunda de las capas de carbono subdivididas encontrada por el suministro de gas de alimentación tiene un tamaño de partículas de 2,0 a 3,0 mm y una afinidad para las impurezas de metano.
- 25
9. El proceso de adsorción por variación de presión de la reivindicación 6, en el que la primera de las capas de zeolita subdivididas encontrada por el suministro de gas de alimentación tiene un tamaño de partículas de 0,5 a 2,0 mm y una afinidad para las impurezas de monóxido de carbono.
- 30
10. El proceso de adsorción por variación de presión de la reivindicación 6, en el que la segunda de las capas de zeolita subdivididas encontrada por el suministro de gas de alimentación tiene un tamaño de partículas de 2,0 a 3,0 mm y una afinidad para las impurezas de nitrógeno.
- 35
11. Un proceso de adsorción por variación de presión para la separación de un suministro de gas de alimentación presurizado que contiene uno o más componentes fuertemente adsorbibles de al menos un gas producto menos fuertemente adsorbible en un sistema adsorbente con seis lechos en el que el ciclo del proceso tiene dieciocho etapas que incluyen tres etapas de igualación lecho a lecho, mientras dos de los lechos se encuentran en producción, en el que duración de igualación descendente de presión más baja y de la primera etapa de despresurización es inferior al 15 % del tiempo de alimentación, según la siguiente gráfica del ciclo:
- 40
- 45

Etapa:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
N.º de lecho																		
1	A1	A2	A3	A4	A5	A6/PP	I1	I1	I2	PPG	I3/D1	D2	PG	I3'	I2'	I1'	I1'	PP
2	I1'	I1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6/PP1	I1	I1	I2	PPG	I3/D1	D2	PG	I3'	I2'
3	PG	I3'	I2'	I1'	I1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6/PP	I1	I1	I2	PPG	I3/D1	D2
4	PPG	I3/D1	D2	PG	I3'	I2'	I1'	I1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6/PP	I1	I1	I2
5	I1	I1	I2	PPG	I3/D1	D2	PG	I3'	I2'	I1'	I1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6/PP
6	A4	A5	A6/PP	I1	I1	I2	PPG	I3/D1	D2	PG	I3'	I2'	I1'	I1	PP	A1	A2	A3

en donde:

- A1 = Primera etapa de adsorción
- A2 = Segunda etapa de adsorción
- A3 = Tercera etapa de adsorción
- A4 = Cuarta etapa de adsorción
- 5 A5 = Quinta etapa de adsorción
- A6/PP = Sexta etapa de adsorción/presurización del producto
- I1 = Primera igualación descendente
- I2 = Segunda igualación descendente
- PGP = Proporcionar gas de purga
- 10 I3/S1 = Tercera igualación descendente/primera despresurización
- S2 = Segunda despresurización
- PG = Purga
- I3' = Igualación ascendente (utilizando gas de la etapa I3)
- I2' = Igualación ascendente (utilizando gas de la etapa I2)
- 15 I1' = Igualación ascendente (utilizando gas de la etapa I1)
- PP = Presurización del producto.

Configuración del lecho/estratificación avanzada

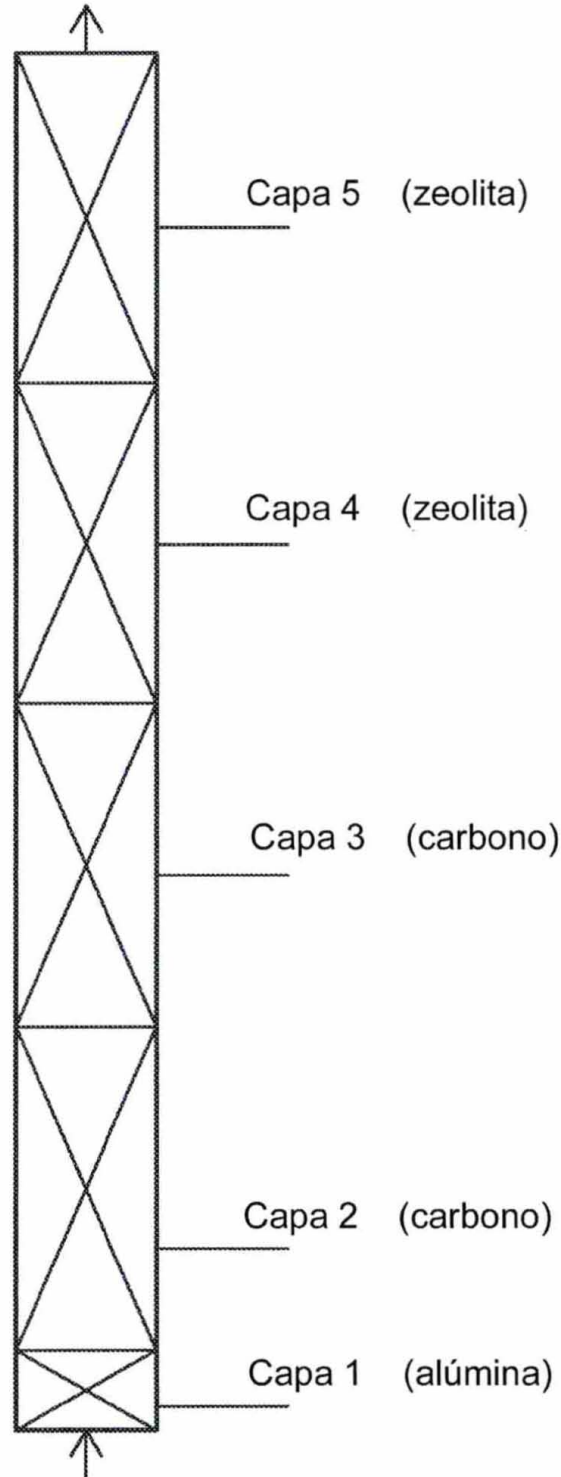


FIG. 1

Tasas de adsorción relativas de N₂ y CO frente al diámetro de partícula

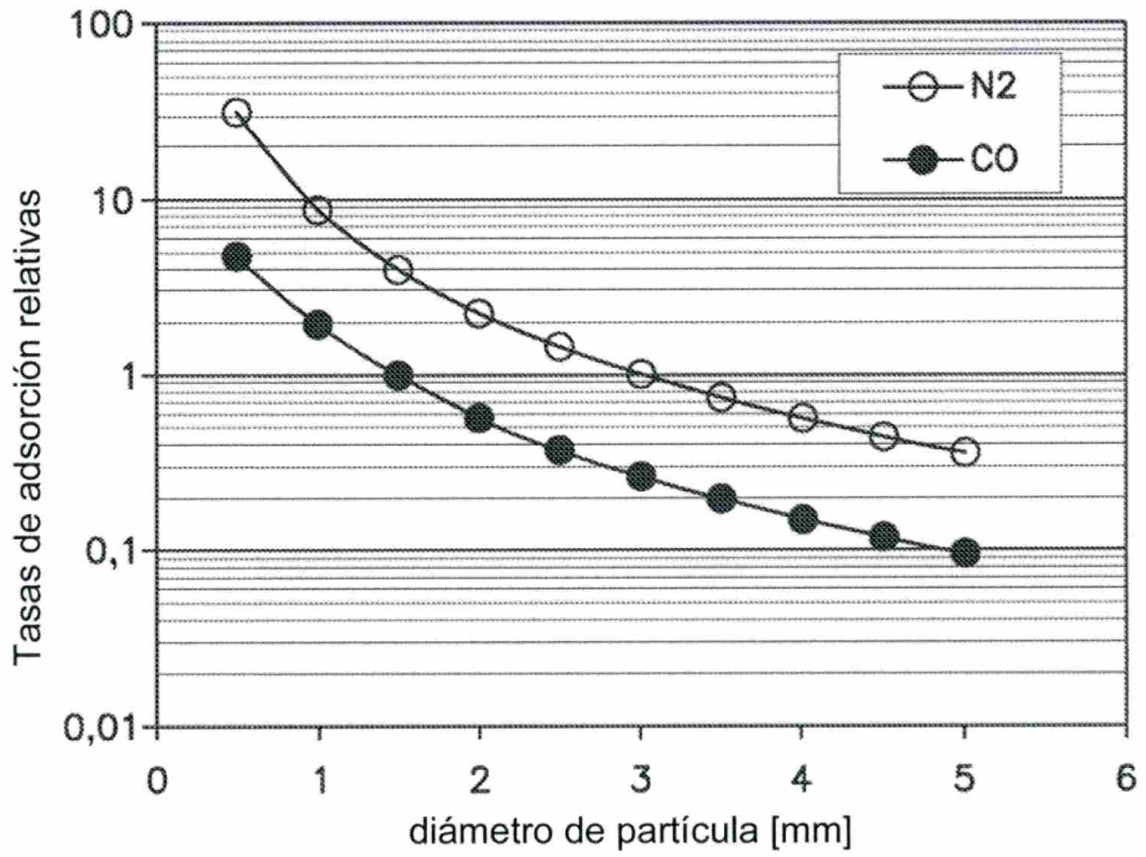


FIG. 2A

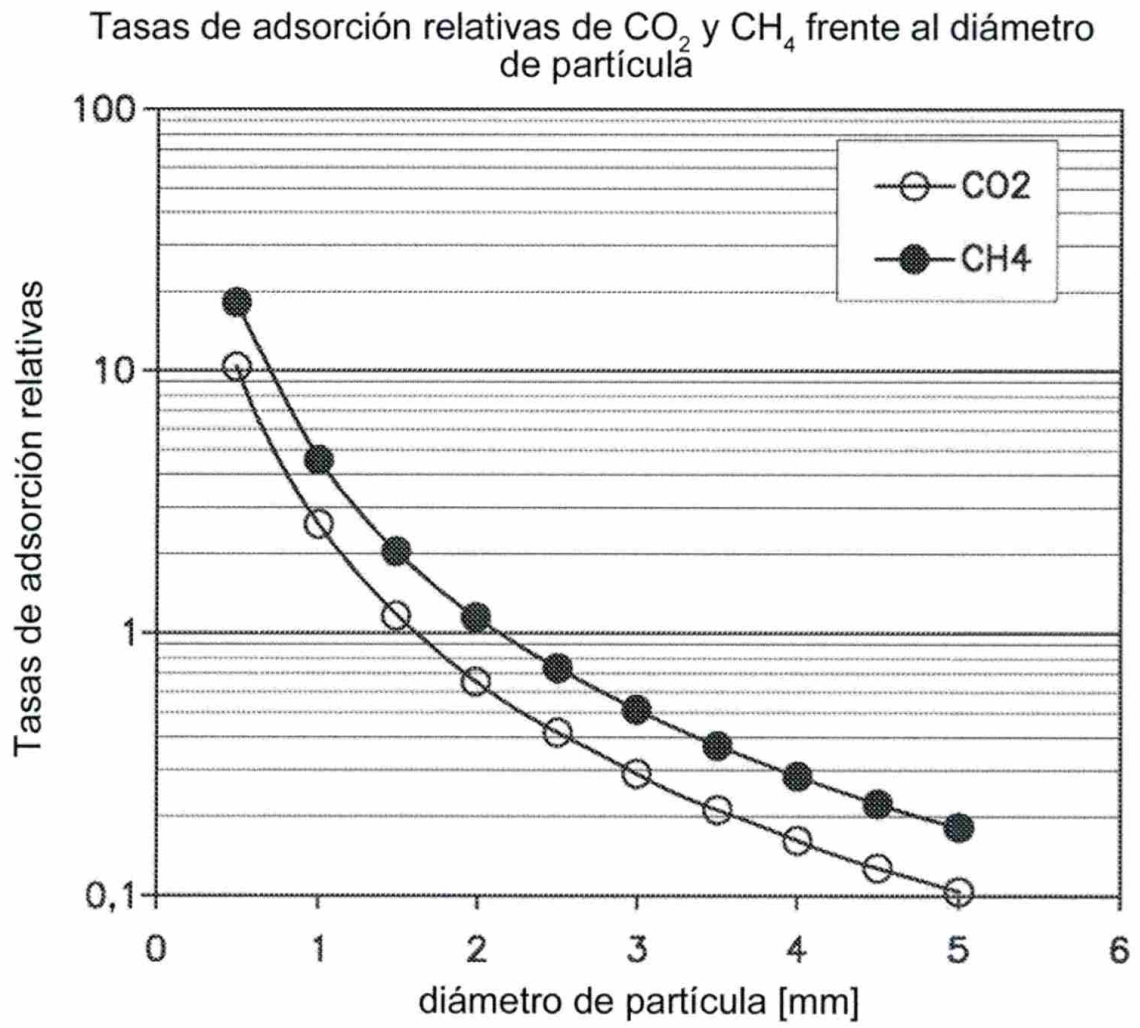


FIG. 2B

