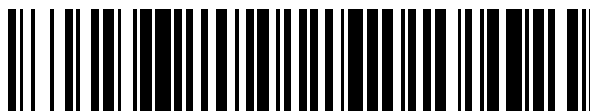


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 625 009**

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/US2012/020195**

87 Fecha y número de publicación internacional: **19.07.2012 WO12096814**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.01.2012 E 12700886 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.02.2017 EP 2663384**

54 Título: **Sistemas de adsorción por variación de presión a gran escala con ciclos de proceso que operan en modo normal y de reducción**

30 Prioridad:

11.01.2011 US 201113004719

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, S. A. y
SIMO, MARIAN**

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 625 009 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

Sistemas de adsorción por variación de presión a gran escala con ciclos de proceso que operan en modo normal y de reducción

Campo de la Invención

La presente invención se refiere a sistemas de adsorción por variación de presión (PSA por sus siglas en inglés) a gran escala (es decir, que varían entre doce y dieciséis lechos) que utilizan ciclos nuevos y avanzados para obtener una recuperación mejorada del hidrógeno de un gas de alimentación que contiene hidrógeno (es decir, gas de síntesis). Las plantas a gran escala producen de 2,8 a 5,4 millones de metros cúbicos estándar (100-190 millones de pies cúbicos estándar) por día de gas hidrógeno. Más específicamente, a través de los ciclos de proceso desarrollados recientemente, los sistemas de PSA con doce-dieciséis lechos proporcionan una mejor separación, tienen un menor requisito de adsorbente (es decir, un menor factor de tamaño de los lechos (BSF)), y menores costes de capital y operativos. Los ciclos de la presente invención están diseñados para sistemas de PSA que tienen de doce a dieciséis lechos. Sin embargo, también se proporcionan nuevos ciclos, donde el sistema de PSA con doce lechos se puede hacer funcionar en un modo de reducción donde se desconectan uno o más lechos, también denominado en la presente memoria como "modo de reducción". Además, la invención se refiere a una estratificación adsorbente novedosa que se emplea en los lechos de la PSA.

Antecedentes de la Invención

Aún existe la necesidad de obtener gases de alta pureza, tal como hidrógeno, procesados a partir de efluentes en las industrias de procesos químicos. Estos efluentes son mezclas de gases que contienen hidrógeno (es decir, gases de síntesis), procedentes de procesos como el reformado de metano a vapor de gas natural o nafta, reformado catalítico de hidrocarburos, procesos de isomerización, etc., que se encaminan a la PSA para un procesamiento adicional. Esta creciente demanda requiere la necesidad de desarrollar procesos de separación altamente eficientes (por ejemplo, PSA) para la producción de hidrógeno (H_2) a partir de diversas mezclas de alimentación. Para obtener procesos de separación por PSA altamente eficientes, se deben reducir tanto los costes de capital como operativos del sistema de PSA. Algunas maneras de reducir los costes del sistema de PSA incluyen reducir el inventario de adsorbente, reducir el número de lechos de PSA, y usar ciclos avanzados en los procesos de PSA. Las maneras mencionadas anteriormente de reducir los costes del sistema de PSA constituyen los elementos de la presente invención.

Son bien conocidos los sistemas de PSA convencionales para separar gases de mezclas de alimentación que contienen componentes con diferentes características de adsorción. Por ejemplo, en un sistema de PSA típico, se hace pasar un gas de múltiples componentes a través de al menos uno de múltiples lechos de adsorción a una presión elevada para adsorber al menos un componente sorbido fuertemente mientras que al menos un componente pasa. En el caso de la PSA del hidrógeno, el hidrógeno es el componente que se adsorbe más débilmente, y que se hace pasar a través del lecho. En un momento predeterminado, se interrumpe la etapa de alimentación y el lecho de adsorción se despresuriza a favor de la corriente en una o más etapas, se purga a contracorriente en una o más etapas, y se despresuriza a contracorriente en una más o más etapas para permitir que el producto de hidrógeno esencialmente puro salga del lecho con una alta recuperación. La secuencia de etapas no se limita a lo mencionado anteriormente, y se puede llevar a cabo una combinación de dos o más etapas como parte de una única etapa.

En la técnica relacionada, la Patente de Estados Unidos n.º 6.379.431 se refiere a un proceso de adsorción por variación de presión que incluye un aparato que tiene una pluralidad de lechos y purga a contracorriente de al menos dos de los lechos simultáneamente a lo largo de todo el proceso. Esta patente describe ciclos de proceso para sistemas de PSA de doce lechos, que tienen tres o cuatro lechos con alimentación simultánea, y tres o cuatro etapas de ecualización. Específicamente, estos son ciclos 12-3-3/4 y 12-4-4. En el ciclo 12-3-3/4, las etapas de ecualización 3/4 implican que la cuarta ecualización no es una verdadera etapa de ecualización (es decir, una etapa de ecualización donde dos lechos están comunicados). De hecho, la etapa de ecualización se superpone con la etapa de aporte de purga. El ciclo 12-4-4, por otro lado, presenta una etapa de retención, que típicamente degrada el rendimiento de la PSA. Además, la Patente de Estados Unidos n.º 6.379.431 no sigue el protocolo de reflujo secuencial durante las etapas de purga en el ciclo de PSA, lo que invariablemente da como resultado una degradación de la recuperación de hidrógeno.

La Patente de Estados Unidos n.º 6.210.466 describe un ciclo de PSA de 16-4-4 que supera las limitaciones históricas de la capacidad de unidades de PSA para una amplia variedad de separaciones de gas. Ahora se pueden alcanzar capacidades mayores de aproximadamente 110 miles de metros cúbicos normales por hora (100 millones de pies cúbicos estándar por día) en un único tren de proceso integrado. La reducción significativa del equipamiento correspondiente es resultado de apartarse del principio aceptado en la técnica de PSA de que la longitud de la etapa de purga debe ser igual o menor que la longitud de la etapa de adsorción. Esta patente describe que al aumentar el tiempo de purga con respecto a la etapa de adsorción combinada con el suministro del gas de purga para cualquier lecho de adsorción del tren desde uno o más de los otros lechos de adsorción y durante la etapa de aporte de purga, los otros lechos de adsorción proporcionan simultáneamente el gas de purga a esencialmente todos los lechos de adsorción que se someten a la etapa de purga, de modo que el único tren puede proporcionar aumentos significativos de la capacidad con una mínima pérdida de recuperación o rendimiento. El beneficio que se alega es

que ahora se pueden construir unidades de PSA a escala muy grande como un único tren de equipamiento por un coste significativamente menor que el coste de dos o más trenes de equipamiento en paralelo.

La Patente de Estados Unidos n.º 6.565.628 B2 se refiere a un procedimiento para reducir el tiempo del ciclo en un proceso de adsorción por variación de presión reduciendo el tiempo requerido para la ecualización de la presión. Este documento describe sistemas de PSA de catorce y dieciséis lechos que tienen, entre otros, ciclos 14-3-5, 14-3-4 y 14-4-4 para el sistema de catorce lechos, y ciclos 16-4-4, 16-4-4/5 y 16-4-5 para el sistema de dieciséis lechos. Todos estos ciclos tienen un menor rendimiento y recuperación en comparación con los ciclos del sistema de PSA de catorce lechos de la presente invención con cinco lechos paralelos en alimentación simultánea y cinco etapas de ecualización lecho a lecho. Además, para el sistema de PSA de dieciséis lechos, el ciclo de la presente invención tiene un mayor rendimiento y mayor recuperación en comparación con los ciclos de PSA anteriores.

Además de los ciclos, la técnica relacionada también analiza los materiales absorbentes convencionales utilizados como un medio para mejorar la recuperación de producto en los sistemas PSA de hidrógeno. Por ejemplo, la Patente de Estados Unidos n.º 6.814.787 está dirigida a un aparato y proceso de PSA para la producción de hidrógeno purificado a partir de una corriente de gas de alimentación que contiene hidrocarburos pesados (es decir, hidrocarburos que tienen al menos seis carbonos). 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 de baja área superficial (20 a 400 m²/g) que comprende entre el 2 al 20 % de la longitud total del lecho seguido de una capa de un adsorbente de área superficial intermedia (425 a 800 m²/g) que comprende del 25 al 40 % de la longitud total del lecho y una capa final de adsorbente de gran área superficial (825 a 2000 m²/g) que comprende del 40 al 78 % de la longitud total del lecho.

La Patente de Estados Unidos n.º 6.027.549, describe un proceso de PSA para la eliminación de dióxido de carbono y luego el uso de carbones activos con densidades aparente en el intervalo de 560-610 kg/m³ (35-38 lb/pie³) y tamaños de partícula en el intervalo de 1-3 mm de diámetro. Sin embargo, únicamente se obtiene una mínima ventaja en la recuperación (aproximadamente el 0,2 %) cuando se utiliza una densidad aparente en el intervalo de 35 a 38 lb/pie³ en un proceso de PSA con cinco lechos para producir hidrógeno.

La Patente de Estados Unidos n.º 6.340.382, tiene como objeto un proceso de PSA que purifica hidrógeno de una mezcla que se hace pasar a través de una capa de óxido de aluminio (Al₂O₃) para eliminar la humedad, luego a través de capa de carbón activo 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 del nitrógeno (N₂) para producir H₂ de alta pureza (>99,99 %). La CaX es al menos el 90 % de Ca intercambiado con SiO₂/Al₂O₃ = 2,0.

La Patente de Estados Unidos n.º 7.537.742 B2, del mismo propietario que la presente invención, se refiere a un conjunto óptimo de adsorbentes para su uso en sistemas de PSA de hidrógeno. Cada lecho adsorbente se divide en cuatro regiones. La primera región contiene un adsorbente para eliminar el agua. La segunda región contiene una mezcla de adsorbentes fuertes y débiles para eliminar impurezas voluminosas como el CO₂. La tercera región contiene un adsorbente de alta densidad aparente (>38 lbm/pie³) para eliminar el CO₂ remanente y la mayor parte del CH₄ y CO presentes en las mezclas de alimentación que contienen hidrógeno. La cuarta región contiene adsorbentes con altas constantes de la ley de Henry para la depuración final de N₂ y de las impurezas residuales para producir el hidrógeno de alta pureza que se desea.

La Patente de Estados Unidos n.º 6.402.813 B2 describe la purificación de una mezcla de gas por adsorción de las impurezas sobre un adsorbente de carbono formado por una combinación de varios carbones activos diferentes. En particular, se describe un proceso de PSA para purificar un gas, tal como hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, monóxido de carbono, argón, metano o mezclas de gases que contienen dichos componentes. La corriente de gas a purificar se hace pasar a través de capas de carbono, donde el orden de las capas de carbono es tales que se da al menos una de las siguientes condiciones:

(1) la densidad (D) es tal que D₁<D₂, (2) el área superficial específica (SSA) es tal que SSA₁>SSA₂, (3) el tamaño de poro medio (MPS) es tal que MPS₁>MPS₂, y (4) el volumen de poro es tal que PV₁>PV₂. Más específicamente, esta patente se refiere a un proceso en donde se utilizan al menos dos capas de carbones activos en donde el carbono de la primera capa tiene una menor densidad que el de la segunda, el primer carbono tiene una mayor área superficial específica, y también una mayor tamaño de poro medio que el segundo carbono.

Para superar las desventajas de los sistemas de PSA de la técnica relacionada, un objeto de la presente invención es introducir ciclos de PSA nuevos y avanzados para PSA con doce lechos durante la operación normal, así como en el modo de reducción. Dichos ciclos para el sistema de PSA con doce lechos incluyen un mayor número de alimentaciones en paralelo (es decir, lechos en adsorción) y/o etapas de ecualización lecho a lecho que ofrecen, al menos en parte, una mejor recuperación de hidrógeno y un mejor rendimiento. Un objeto adicional de la invención es diseñar los ciclos para incluir el uso de un protocolo de reflujo secuencial con el fin de mejorar las etapas de regeneración, dando como resultado de este modo un rendimiento superior. La invención proporciona las siguientes características: (1) no hay necesidad de disponer de un tanque de almacenamiento adicional; (2) no hay etapas

inactivas; (2) flujo continuo de gases de cola de la PSA (gas de salida); y (4) mayor recuperación que con los ciclos de la técnica relacionada.

Otro objeto de la invención es modificar el sistema de adsorción en cada lecho para que contenga al menos tres capas de adsorbentes (por ejemplo, alúmina, carbón activo y zeolita), en donde los componentes de carbón activo y zeolita se estratifican en base a su tamaño de partícula y permiten mejorar adicionalmente la recuperación de hidrógeno. Por lo tanto, se ha descubierto un proceso eficiente de separación por PSA con alta recuperación de hidrógeno, menores requisitos de adsorbente, (es decir, con un menor factor de tamaño de los lechos (BSF)), y menores costes de capital y operativos. Adicionalmente, el proceso debe operar eficientemente cuando se desconectan uno o más lechos debido a razones operativas tales como el fallo de una válvula o debido a una reducción de la demanda (denominada en la presente memoria como "reducción" o "modo de reducción").

Aún otro objeto de la invención es proporcionar un ciclo alternativo de PSA con doce lechos, así como ciclos operativos novedosos para sistemas de PSA de catorce y dieciséis lechos para aumentar la recuperación de hidrógeno y el rendimiento.

Compendio de la Invención

La invención proporciona un proceso de adsorción por variación de presión para separar un gas de alimentación de suministro presurizado que contiene uno o más componentes fuertemente adsorbibles y al menos un componente de gas de producto fuertemente adsorbible en menor medida en un sistema de adsorción por variación de presión de once lechos. El gas de alimentación se suministra a un extremo de alimentación de un lecho adsorbente que contiene un material o materiales adsorbentes sólidos, que adsorben preferiblemente el componente o componentes más fuertemente adsorbibles. Los componentes del producto fuertemente adsorbible en menor medida se extrae de un extremo de salida del lecho adsorbente. Esto se realiza en uno o más ciclos de PSA compuestos por etapas en donde el gas de alimentación continua fluye secuencialmente y a favor de la corriente a través cada uno de los lechos adsorbentes para producir un producto gaseoso usando un gas de alimentación continua, etapas de presurización, una o más etapas de ecualización de la presión, una o más etapas de despresurización, y una o más etapas de purga.

El gas de producto del proceso es preferiblemente hidrógeno, aunque el proceso se puede extender a otros procesos de separación tales como la purificación de helio, mejoramiento del gas natural, producción de CO₂ a partir de gas de síntesis u otra fuente que contenga CO₂ en la alimentación de suministro o en otros procesos de PSA para la coproducción de H₂ y CO₂. El ciclo se puede modificar para operar el sistema de PSA en un modo de reducción con una reducción del rendimiento relativamente pequeña, permitiendo de este modo que el sistema de PSA funcione con tan poco como cinco lechos. Además, los nuevos ciclos del proceso de PSA aprovechan el protocolo de reflujo secuencial para mejorar las etapas de regeneración, y el rendimiento total del sistema de PSA.

Otra característica novedosa de la invención es el adsorbente estratificado, que se puede utilizar en los lechos. Dichas configuraciones estratificadas de componentes de carbono y/o zeolita difieren de otra capa de material adsorbente similar en cuanto al tamaño de partícula. Estas configuraciones estratificadas de los materiales del lecho combinadas y los ciclos de PSA proporcionan un efecto sinérgico con una mejora global de la recuperación de hidrógeno y el rendimiento del 1-2 % sobre los ciclos de PSA convencionales.

El sistema de adsorción por variación de presión puede operarse en modo de reducción con únicamente nueve, ocho, siete, seis o cinco lechos en línea y en producción. Los ciclos de proceso se describen en la presente memoria.

Breve descripción de las figuras

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

La Figura 1 ilustra una configuración/estratificación avanzada del lecho según un aspecto de la invención; la Figura 2A es un gráfico de las tasas de adsorción relativas de N₂ y CO frente al diámetro de partícula para las capas de zeolita que se muestran en la Figura 1; la Figura 2B es un gráfico de las tasas de adsorción relativas de CO₂ y CH₄ frente al diámetro de partícula para las capas de carbono que se muestran en la Figura 1; y la Figura 3 es una ilustración de un sistema/patín de PSA de H₂ con doce lechos utilizado con los ciclos de la presente invención.

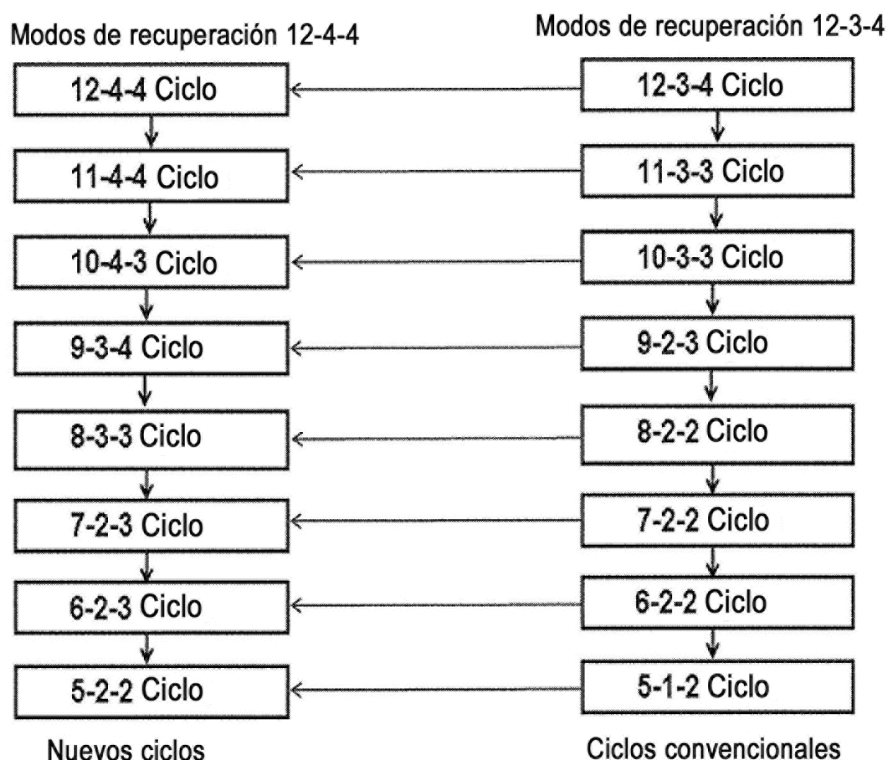
Descripción detallada de la Invención

Se describe en la presente memoria un conjunto completo de procesos/ciclos de PSA de alta eficiencia empleados en un sistema de PSA con doce lechos tanto en modo normal como de reducción. Al operar en modo normal (es decir, hay doce lechos en línea), este sistema de PSA a gran escala consigue aproximadamente de 2,8 a 5,4 millones de metros cúbicos estándar por día (100-190 millones de pies cúbicos estándar por día (MMSCFSD por sus siglas en inglés)) de producción de hidrógeno. Aunque los procesos/ciclos de PSA que se describen en la presente memoria son con respecto a la producción de hidrógeno, se entenderá por los expertos en la técnica que estos

ciclos se aplican a cualquier proceso de separación de de hidrógeno a partir de diversas mezclas de alimentación independientemente de la fuente.

Con referencia a la tabla 1, a continuación, los nuevos y avanzados ciclos para el sistema de PSA de doce lechos se comparan con los ciclos convencionales para un sistema de PSA de doce lechos en condiciones operativas normales y en el modo de reducción. Estos últimos incluyen naturalmente un sistema de PSA con doce lechos en un modo de reducción. En la nomenclatura utilizada en la presente memoria para hacer referencia a los ciclos, y a modo ejemplo en un ciclo 12-4-4, el primer número se refiere al número de lechos en el sistema de PSA, el segundo número se refiere al número de lechos en alimentación en paralelo (es decir, en cualquier alimentación de procesamiento inmediato) y el último número se refiere al número de lechos que se someten a la ecualización lecho a lecho en un ciclo en particular.

Tabla 1



Como se puede ver en la Tabla 1, el ciclo 12-3-4 convencional de PSA define una secuencia de proceso que utiliza doce lechos, con alimentación de procesamiento de tres lechos en cualquier momento y con cuatro etapas de ecualización lecho a lecho. El ciclo propuesto en la presente memoria es un ciclo 12-4-4 que presenta cuatro alimentaciones en paralelo que dan como resultado un mayor rendimiento del hidrógeno. Los ciclos restantes que se presentan en la Tabla 1 corresponden a los denominados modos operativos de reducción o excepcionales, donde es necesario operar el proceso con una menor cantidad de lechos. Todos los ciclos de reducción de la presente invención ofrecen un mejor rendimiento del proceso debido al mayor número de alimentaciones en paralelo y/o etapas de ecualización lecho a lecho. Los diversos ciclos y su modo operativo se describen en detalle más adelante.

Otro aspecto de la invención se refiere a los adsorbentes cargados en los lechos de la PSA de hidrógeno para mejorar la recuperación de hidrógeno. Se ha descubierto que las tres capas de adsorbentes, donde cada capa está subdividida en dos capas que contienen el mismo adsorbente, aunque con diferente tamaño de partícula, se obtiene una óptima cinética de adsorción y desorción para las impurezas específicas que están presentes en el gas de alimentación que contiene hidrógeno. Así, esta avanzada configuración de estratificación del adsorbente da como resultado una mejora de la recuperación de hidrógeno.

Un proceso típico de PSA de hidrógeno utiliza tres adsorbentes diferentes cargados en el recipiente desde el fondo hacia arriba en un orden tal como (1) alúmina; (2) carbón activo y (3) zeolita. Hay cinco impurezas principales a eliminar por el proceso de adsorción. La alúmina adsorbe la humedad contenida en el gas de alimentación. La capa de carbón activo usualmente está diseñada para encargarse del dióxido de carbono e hidrocarburos tales como metano, etano y propano. La función de la zeolita es eliminar el monóxido de carbono, nitrógeno, argón y el metano residual que no es extraído por el carbón activo dispuesto aguas arriba de la zeolita. Se analizan detalles adicionales

de las capas de adsorbentes en cada lecho de PSA en Baksh *et al* (Patente de Estados Unidos n.º 7.537.742 B2), del mismo propietario que la presente invención.

La Figura 1 ilustra las capas de adsorbentes en cada uno de los lechos de PSA de la invención. Las propiedades de la adsorción en las capas dos, tres, cuatro y cinco se ajustan óptimamente optimizando el tamaño de partícula del adsorbente que se utiliza para obtener un óptimo rendimiento del proceso de PSA. A modo de ejemplo, las capas dos y tres son idénticas (es decir, ambas están hechas del mismo material de carbono) excepto por la diferencia en los tamaños de partícula. Asimismo, las capas cuatro y cinco son idénticas (es decir, ambas son del mismo material de zeolita), pero su tamaño de partícula es diferente. El diseño y la configuración del recipiente del adsorbedor son tales que será capaz de adsorber cinco componentes diferentes. Idealmente, la capa 1 adsorbe la humedad, la capa 2 adsorbe el dióxido de carbono, la capa 3 adsorbe el metano, la capa 4 adsorbe el monóxido de carbono y la capa 5 adsorbe el nitrógeno. Los expertos en la técnica reconocerán que la recuperación del proceso se maximizará cuando se utilizan por completo los adsorbentes. Al usar un diseño de tres capas, el experto en la técnica tiene únicamente tres grados de libertad para dimensionar el adsorbedor para la eliminación de cinco componentes. El enfoque de la invención añade otros dos grados de libertad más haciendo posible de este modo conseguir una mayor recuperación de hidrógeno en combinación con los ciclos de la presente invención.

El ajuste del tamaño de partícula del adsorbente afecta la velocidad del proceso de adsorción y desorción - la capacidad de adsorción es independiente del tamaño de partícula. La resistencia a la difusión en un proceso de adsorción es la suma de todas las resistencias a la difusión en el interior de la partícula del material adsorbente. El cambio en el tamaño de partícula puede afectar o no a la resistencia global a la difusión dependiendo del nivel de contribución de los fenómenos de difusión afectados por el tamaño de partícula.

En una realización, la zeolita CaX(2.3) se utiliza en la cuarta y la quinta capas de la Figura 1. Las capas están dimensionadas de tal manera que la capa cuatro preferiblemente adsorbe el monóxido de carbono y la capa cinco preferiblemente adsorbe el nitrógeno. Con referencia a la Figura 2A, se muestra la dependencia de las velocidades de adsorción relativas sobre el diámetro de partícula tanto para el nitrógeno como para el monóxido de carbono. Para obtener los datos representados en el gráfico en la Figura 2A se emplea la técnica de la Columna de Longitud Cero (ZLC por sus siglas en inglés). Véase, J.A.C. Silva & A.E. Rodrigues, Gas. Sep. Purif., Vol. 10, n.º 4, págs. 207-224, 1996.

El valor de la velocidad de adsorción relativa es la proporción entre la verdadera velocidad de adsorción y el valor de la velocidad estándar. El valor de la velocidad estándar corresponde a una mínima velocidad requerida que es necesaria para producir el rendimiento mejorado del proceso de PSA. Si se usa el mismo tamaño de partícula (por ejemplo, 2,5 mm) para ambas capas en el proceso, se satisface el requisito para la velocidad de adsorción del nitrógeno. Sin embargo, como se puede determinar a partir de la Figura 2A, la relación entre la velocidad del CO y la velocidad de adsorción estándar es de únicamente un 40 % de la mínima requerida. Por lo tanto, es deseable reducir el tamaño de partícula de la zeolita en la capa cuatro para aumentar la velocidad de adsorción del monóxido de carbono. En esta realización ejemplar, un valor de 1,5 mm satisface las especificaciones de diseño para la velocidad del monóxido de carbono. Es obvio que se puede aumentar la velocidad del nitrógeno, así como reducir el tamaño de partícula en la capa cinco. Como resultado, únicamente se obtendrá una mejora del proceso insignificante ya que la velocidad de adsorción del nitrógeno ya era anteriormente un valor mínimo requerido. Por otro lado; el rendimiento del proceso puede verse afectado por la mayor caída de presión en el lecho. La estratificación preferida para este ejemplo en particular será con tamaños de partícula mayores de 2 mm y menores de 3 mm para la capa cinco y tamaños de partícula mayores de 0,5 mm y menores de 2 mm para la capa cuatro.

Las capas de carbono dos y tres estarán ocupadas por las partículas de carbono de diferente tamaño. Una vez más, se emplea la técnica de ZLC para medir las velocidades de adsorción para el dióxido de carbono y el metano sobre el material de carbono. En la Figura 2B se resumen los datos sobre velocidades normalizados por la velocidad estándar. La velocidad para el metano es satisfactoria en tamaños de partícula menores de 2,25 mm. Sin embargo, las partículas de menor tamaño son necesarias para obtener velocidades razonables para el dióxido de carbono. Al estudiar los datos de la Figura 2B, el tamaño de partícula de carbono preferido para la extracción del dióxido de carbono es menor de 1,5 mm y para el metano es menor de 2,0 mm. Por lo tanto, la estratificación para este ejemplo en particular será con tamaños de partícula mayores de 1,0 mm y menores de 2,0 mm para la capa tres y tamaños de partícula mayores de 0,5 mm y menores de 1,5 mm para la capa dos.

Ahora se describirán los novedosos ciclos de PSA de la presente invención con referencia a diversas realizaciones ejemplares. El sistema de PSA emplea un ciclo de PSA de doce lechos adsorbentes de veinticuatro etapas que tiene cuatro etapas de equalización, además de las etapas de purga, vaciado, y presurización del producto (denominado en la presente memoria como "el ciclo 12-4-4 de PSA"). El sistema de PSA incluye un suministro continuo del gas de alimentación al menos a cuatro lechos que se encuentran simultáneamente en la fase de adsorción. Estos cuatro lechos separan el gas de alimentación de suministro presurizado que contiene uno o más componentes fuertemente adsorbibles y permiten que el gas de producto de hidrógeno menos fuertemente adsorbible (es decir, gas de salida) salga de los lechos.

Según la invención, el sistema de PSA se puede utilizar en un modo de reducción con once lechos. El ciclo de PSA

para los once lechos incluye veintidós etapas, donde cuatro lechos se encuentran en fase de adsorción, y tiene cuatro etapas de ecualización lecho a lecho además de las etapas de purga y presurización del producto (denominado en la presente memoria como "el ciclo 11-4-4 de PSA").

- 5 En un modo de reducción adicional, el sistema de PSA utiliza diez lechos y emplea veinte etapas en el ciclo, donde cuatro de los lechos se encuentran simultáneamente en la fase de adsorción, y cada lecho tiene al menos tres etapas de ecualización con otro lecho además de las etapas de purga y presurización del producto (denominado en la presente memoria como "el ciclo 10-4-3 de PSA").
- 10 El sistema de PSA puede utilizarse en un modo de reducción adicional con nueve lechos. El ciclo de PSA para los nueve lechos incluirá dieciocho etapas, donde tres lechos se encuentran en fase de adsorción, y tiene cuatro etapas de ecualización además de las etapas de purga y presurización del producto (denominado en la presente memoria como "el ciclo 9-3-4 de PSA").
- 15 En un modo de reducción adicional, el sistema de PSA utiliza ocho lechos y emplea dieciséis etapas en el ciclo, donde tres de los lechos se encuentran simultáneamente en la fase de adsorción, y cada lecho tiene al menos tres etapas de ecualización con otro lecho además de las etapas de purga y presurización del producto (denominado en la presente memoria como "el ciclo 8-3-3 de PSA").
- 20 Aún en otro modo de reducción, el sistema de PSA utiliza siete lechos y emplea veintiún etapas en el ciclo, donde dos de los lechos se encuentran simultáneamente en la fase de adsorción, y cada lecho tiene al menos tres etapas de ecualización (es decir, con otro lecho en el sistema) además de las etapas de purga y presurización del producto (denominado en la presente memoria como "el ciclo 7-2-3 de PSA").
- 25 En otro modo de reducción, el sistema de PSA utiliza seis lechos y emplea dieciocho etapas en el ciclo, donde dos de los lechos se encuentran simultáneamente en la fase de adsorción, y cada lecho tiene al menos tres etapas de ecualización lecho a lecho con otro lecho además de las etapas de purga y presurización del producto (denominado en la presente memoria como "el ciclo 6-2-3 de PSA").
- 30 En un modo de reducción adicional, el sistema de PSA utiliza cinco lechos y emplea quince etapas en el ciclo, donde dos de los lechos se encuentran simultáneamente en la fase de adsorción, y cada lecho tiene al menos dos etapas de ecualización lecho a lecho con otro lecho además de las etapas de purga y presurización del producto (denominado en la presente memoria como "el ciclo 5-2-2 de PSA").
- 35 Con referencia a la Figura 3 y las Tablas 2 y 3, se ilustra el modo operativo para el ciclo 12-4-4 de PSA. Específicamente, la secuencia de etapas para el ciclo 12-4-4 de PSA se realiza a su vez en el orden que se indica en cada uno de los recipientes de adsorción.

Tabla 2: Tabla del ciclo de PSA 12-4-4

Etapas:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Lecho n.º:																								
1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	PPG3 BD1	BD2	PG3	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP
2	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	PPG3 BD1	BD2	PG3	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'
3	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	PPG3 BD1	BD2	PG3	PG2	PG1	E4'
4	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	PPG3 BD1	BD2	PG3	PG2
5	PG3	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	PPG3 BD1	BD2
6	PPG3 BD1	BD2	PG3	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2
7	PPG1	PPG2	PPG3 BD1	BD2	PG3	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4
8	E3	E4	PPG1	PPG2	PPG3 BD1	BD2	PG3	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2
9	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	PPG3 BD1	BD2	PG3	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
10	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	PPG3 BD1	BD2	PG3	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6
11	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	PPG3 BD1	BD2	PG3	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4
12	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	PPG3 BD1	BD2	PG3	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2

Se comprenderá que la nomenclatura que se proporciona para este ciclo 12- 4-4 de PSA es la misma que para

todos los ciclos analizados en la presente memoria, donde:

- 5 A1 = Primera etapa de adsorción
- A2 = Segunda etapa de adsorción
- A3 = Tercera etapa de adsorción
- A4 = Cuarta etapa de adsorción
- A5 = Quinta etapa de adsorción
- A6 = Sexta etapa de adsorción
- A7 = Séptima etapa de adsorción
- 10 A8 = Octava etapa de adsorción
- E1 = Primera ecualización descendente
- E2 = Segunda ecualización descendente
- E3 = Tercera ecualización descendente
- E4 = Cuarta ecualización descendente
- 15 PPG1 = Primera aportación de gas de purga
- PPG2 = Segunda aportación de gas de purga
- PPG3/BD1 = Tercera aportación de gas de purga/Primer vaciado
- BD2 = Segundo vaciado
- 20 PG3 = Purga usando gas de la etapa PPG3
- PG2 = Purga usando gas de la etapa PPG2
- PG1 = Purga usando gas de la etapa PPG1
- E4' = Ecualización ascendente (usando gas de la etapa E4)
- E3' = Ecualización ascendente (usando gas de la etapa E3)
- E2' = Ecualización ascendente (usando gas de la etapa E2)
- 25 E1' = Ecualización ascendente (usando gas de la etapa E1)
- PP = Presurización del producto

En algunos de los ciclos, y según el ciclo en particular pueda requerirlo, se empleará la siguiente nomenclatura adicional:

- 30 E5 = Quinta etapa de ecualización descendente
- E6 = Sexta etapa de ecualización descendente
- E5' = Quinta ecualización ascendente (usando gas de la etapa E5)
- E6' = Sexta ecualización ascendente (usando gas de la etapa E6)
- 35

En la tabla 2, las filas corresponden a un lecho en particular en el sistema de PSA, mientras que las columnas representan el número de etapa. La duración de una secuencia del ciclo (una fila) se denomina como el tiempo total del ciclo o tiempo del ciclo (CT por sus siglas en inglés). El tiempo del ciclo es constante para cada lecho. Además, el desfase relativo en las etapas del ciclo entre los lechos se puede inferir también a partir de la Tabla 2. Este desfase es igual a $1/12^{\circ}$ del CT porque hay doce lechos en este ciclo en particular. Para definir por completo el ciclo 12-4-4 de PSA se deben asignar los tiempos de etapa para las etapas 1 y 2 - tal como t_1 y t_2 ya que el ciclo tiene veinticuatro etapas. La duración de bloque básico queda se define entonces como $t_1 + t_2$. Al emplear la periodicidad del ciclo descrita anteriormente, el $CT = 12 \cdot (t_1 + t_2)$ y de esto se desprende que la duración de las etapas con numeración impar es igual en tiempo a t_1 y para las etapas de numeración par es igual a t_2 . Por lo tanto, hay veinticuatro etapas en el ciclo, y el modo operativo para cada lecho se desfasa en dos etapas.

Ahora se describe la secuencia de los ciclos 12-4-4 de PSA con respecto a un lecho que es sometido al ciclo completo de PSA (es decir, CT). En la Figura 3 se muestra un sistema representativo de PSA en tren/patín que tiene doce lechos en paralelo, y se emplea en la presente memoria para ilustrar esta realización. El sistema incluye 72 válvulas de conexión/desconexión, y 26 válvulas de control, 7 colectores y las cañerías y equipos asociados. Las válvulas de control se utilizan para controlar el caudal o la presión durante ciertas etapas de proceso mientras que las válvulas de conexión/desconexión permiten la comunicación entre los diversos lechos del sistema de PSA. La nomenclatura de las válvulas que se utiliza es tal que los primeros dos dígitos en el número de la etiqueta de la válvula corresponde al número del lecho y el último dígito designa el número del colector. Por referencia cruzada, la designación del lecho y el colector de cada válvula tiene un número de etiqueta único - dichas válvulas se denominan válvulas cíclica. Con fines de claridad, los números de etiqueta de la válvula que comienzan con dos ceros tal como la válvula de control de la presión de producto 002 o la válvula de control de la represurización 007, no están asociados a ninguno de los lechos - válvulas del proceso.

La secuencia de válvulas que representa las etapas en el ciclo 12-4-4 de PSA de la Figura 3 se ilustra en la Tabla 3 a continuación, donde la tabla de válvulas define la posición o acción para cada válvula (es decir, abierta = O, cerrada = C, y CV = válvula de control en posición abierta cuya posición se emplea para variar el caudal) en una etapa particular del ciclo de PSA.

Tabla 3: Tabla de válvulas del ciclo de PSA 12-4-4

[illegible]

Etapas n.º 1-8 (A1-A8): El Lecho 1 comienza el ciclo de proceso en la primera etapa de adsorción (A1). La mezcla de gases de alimentación se introduce al fondo del Lecho 1 desde el primer colector (es decir, 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 (por ejemplo, 01x) están cerradas. En lo sucesivo en la presente memoria,

los números de etiqueta de la válvula se denominarán sin utilizar el prefijo XV. Además del Lecho 1, el Lecho 10, el Lecho 11 y el Lecho 12 procesan la alimentación en la primera etapa. Como resultado, las válvulas 101, 102, 111, 112, 121 y 122 también se abrirán. La mezcla de alimentación fluye desde el fondo hacia arriba del Lecho 1 (aunque este es también el caso para el Lecho 9 y el Lecho 10 en la etapa 1). A lo largo de esta solicitud, esta dirección de flujo ascendente en el recipiente se denominará como flujo a favor de la corriente con respecto a la alimentación. Durante la etapa de adsorción, las impurezas se adsorben sobre los adsorbentes y se recolecta hidrógeno de alta pureza en el segundo colector de producto. La válvula de control 002 se utiliza para controlar la presión en los lechos en la etapa de adsorción o alimentación/producción. El Lecho 1 permanece en la etapa de adsorción durante las etapas uno a ocho del ciclo 12-4-4.

Etapa n.º 9 (E1): El Lecho 1 se somete a la primera etapa de ecualización lecho a lecho (E1) mientras que el Lecho 6 recibe a contracorriente el gas de ecualización - etapa (E1') a través del primer colector. Véase la Figura 3. Esta etapa de ecualización lecho a lecho se denomina a veces como una etapa de despresurización a favor de la corriente. Las válvulas del Lecho 1 017, 018, y las válvulas del Lecho 6 067 y 068 quedan abiertas mientras que todas las otras válvulas del Lecho 1 y del Lecho 6 (01x) y (05x) quedan cerradas. La velocidad de las etapas (E1)-(E1') se controla por la válvula de control 018.

Etapa n.º 10 (E2): El Lecho 1 se somete a la segunda etapa de ecualización (E2). La presión del Lecho 1 desciende debido al flujo de gas a favor de la corriente del Lecho 1 al Lecho 7 sometido a la etapa (E2') a través del sexto colector. Las presiones en ambos lechos son iguales al final de esta Etapa n.º 10. Las válvulas 016, 076 y 078 se abren por completo mientras que la válvula 018 controla la velocidad de las etapas (E2)-(E2').

Etapa n.º 11 (E3): El Lecho 1 ejecuta la tercera etapa de ecualización descendente (E3). Esta etapa utiliza el colector de ecualización número seis dedicado para la segunda y tercera etapas de ecualización del ciclo 12-4-4. Las válvulas 016, 086 y 088 se abren por completo mientras que la válvula 018 controla la velocidad de las etapas (E3)-(E3').

Etapa n.º 12 (E4): El Lecho 1 ejecuta la cuarta etapa de ecualización (E4) enviando al gas al Lecho 9 a través del quinto colector. Las válvulas 015, 095 y 098 se abren por completo mientras que la válvula 018 controla la velocidad de las etapas (E4)-(E4').

Etapa n.º 13 (PPG1): En esta etapa, el Lecho 1 envía a favor de la corriente el gas de purga al lecho en la etapa de purga (PG1). Como se muestra en la Tabla 2, anteriormente, el lecho que se se purga durante esta etapa es el Lecho 10 que utiliza el colector número 5. De esto se desprende que la válvula 015 del Lecho 1 está abierta y la válvula de control 018 controla la velocidad de la etapa (PPG1).

La etapa (PPG3) y la etapa (PPG1) se realizan simultáneamente durante las etapas de ciclo impares (es decir, las etapas 1, 3, 5, etc.). Por lo tanto, se deben utilizar colectores separados para cada gas de PPG1 y PPG3 para cumplir con el protocolo de reflujo secuencial. Los gases de purga no se pueden mezclar, para mantener el gas de purga rico en hidrógeno (PPG1) separado del gas de purga pobre en hidrógeno (PPG3). Dado que el gas de (PPG1) proviene del lecho a una mayor presión que el gas de (PPG2) o el (PPG3), éste contiene un bajo nivel de impurezas - gas de purga rico en hidrógeno. Para maximizar la regeneración del adsorbente, el gas pobre en hidrógeno se debería utilizar primero (Etapa n.º 17 - Etapa (PG3)) y después los gases más ricos en hidrógeno, tales como el gas de PPG2 en la etapa n.º 18 - etapa (PG2) y gas de PPG1 en último término en la etapa n.º 19 - etapa (PG1). Este concepto conocido como protocolo de reflujo secuencial siempre producirá la mayor fuerza impulsora para la transferencia de masa, dando como resultado un proceso de regeneración más eficiente.

Etapa n.º 14 (PPG2): En esta etapa, el Lecho 1 envía a favor de la corriente el gas de purga al Lecho 11, que está en la etapa de purga (PG2). Ambas etapas PPG2 y PPG3 utilizan el tercer colector. La válvula 013 está abierta y la válvula de control 018 se utiliza para controlar la velocidad de estas etapas de aportación de purga PPG2 y PPG3 (estando estas últimas en la Etapa n.º 15).

Etapa n.º 15 (PPG3/BD1): El propósito de esta etapa es proporcionar gas de purga para el Lecho 12 usando el colector número tres y al mismo tiempo desalojar del recipiente las impurezas adsorbidas durante las etapas a favor de la corriente (AD, EQ, PPG) a través el fondo del recipiente. Para realizar estas dos etapas superpuestas, la válvula 013 se abre, la válvula 018 se utiliza para controlar la velocidad de la etapa (PPG3) y la válvula 014 controla la velocidad de la etapa (BD1). Los flujos relativos durante la etapa (PPG3) y la etapa superpuesta (BD1) se controlan de manera que el requisito de gas de purga mínimo se satisface en el proceso de PSA.

Etapa n.º 16 (BD2): En este punto del ciclo, la presión en el recipiente es demasiado baja para mantener en el mismo las impurezas. Como resultado, se desorben y se dirigen a contracorriente al tambor de compensación a través de la válvula 014. Todas las demás válvulas asociadas al Lecho 1 están cerradas durante esta etapa.

Etapa n.º 17 (PG3): Como se designa en la Tabla 2, esta es la etapa de purga (PG3). El Lecho 1 recibe el gas de purga procedente del lecho de la etapa (PPG3) (es decir, el Lecho 2) a través del tercer colector. Las válvulas 013, 018 se abren por completo, y la presión sobre el lecho durante la etapa de purga se controla por la válvula 014.

Etapa n.º 18 (PG2): En esta etapa, el Lecho 1 recibe gas de purga procedente del Lecho 3, que se encuentra en la etapa PPG2 a través del tercer colector. Las válvulas 013 y 018 se abren por completo, mientras que la presión sobre el lecho durante la etapa de purga se controla por la válvula 014.

5 Etapa n.º 19 (PG1): En esta etapa, el Lecho 1 recibe gas de purga procedente del lecho de la etapa (PPG1) a través del quinto colector (es decir, el Lecho 4). Las válvulas 015 y 018 se abren por completo, mientras que la presión sobre el lecho durante la etapa de purga se controla por la válvula 014.

10 Etapa n.º 20 (E4'): Es la primera ecualización ascendente que se designa etapa (E4') para hacer referencia al lecho que recibe el gas. Los lechos de las etapas (E4) y (E4') interactúan de manera tal que el contenido del Lecho 5 se transfiere al Lecho 1 hasta igualar la presión en ambos lechos. Las válvulas 055, 015 y 018 se abren por completo y la acción de la válvula de control 058 proporciona un medio para controlar la velocidad.

15 Etapa n.º 21 (E3'): En esta segunda etapa de ecualización ascendente, etapa (E3'), el Lecho 1 recibe gas procedente del Lecho 6. Las válvulas 016, 066 y 018 se abren por completo y la acción de la válvula de control 068 proporciona un medio para controlar la velocidad.

20 Etapa n.º 22, (E2'): En esta etapa, el Lecho 1 recibe gas del Lecho 7, mientras que las válvulas 016, 076 y 018 se abren por completo y la acción de la válvula de control 078 proporciona un medio para controlar la velocidad.

25 Etapa n.º 23 (E1'): Este es la última etapa de ecualización ascendente, donde el Lecho 1 recibe el gas procedente del Lecho 8. Las válvulas 017, 087 y 018 se abren por completo y la acción de la válvula de control 088 proporciona un medio para controlar la velocidad.

30 Etapa n.º 24 (PP): La última etapa en la descripción del ciclo con respecto al Lecho 1 es la etapa de presurización del producto "PP". Una porción del gas de producto procedente del segundo colector se utiliza para elevar adicionalmente la presión en el lecho usando la válvula de control 007. Las válvulas 017 y 018 se abren por completo durante esta etapa.

35 La funcionalidad básica del ciclo se puede describir de la misma manera para cada uno de los doce lechos del sistema de PSA. Sin embargo, una vez que se define la secuencia de etapas para un lecho, las secuencias de etapas para otros lechos seguirán en el mismo orden y el desfase en el tiempo relativo será de $1/12^{\circ}$ del CT o $(t_1 + t_2)$ (es decir, el Lecho 2 inicia la primera adsorción (A1) en la tercera etapa en comparación con el Lecho 1 que se somete a la primera adsorción (A1) en la primera etapa).

40 Una manera alternativa de describir una tabla del ciclo es proporcionar información sobre todos los lechos durante la duración del bloque unitario. Por ejemplo, definiendo todas las etapas del ciclo en la Etapa n.º 1 y la Etapa n.º 2 para el ciclo 12-4-4 de PSA en la Tabla 2 se definen de manera cuantitativa todas las interacciones posibles entre lechos, válvulas y colectores. La misma secuencia se repetirá periódicamente con un período igual a $t_1 + t_2$.

45 Este nuevo procedimiento se utilizará para explicar la funcionalidad del ciclo 11-4-4 de PSA de la presente invención. Éste es el primer modo de reducción para el proceso de PSA de H_2 con doce lechos. Si para propósitos de mantenimiento es necesario dar servicio a uno de los lechos, éste se aislará del proceso y la producción de hidrógeno continuará usando un ciclo de proceso que opera con once lechos. Este nuevo ciclo 11-4-4 ofrece mejor rendimiento en cuando a rendimiento y recuperación en comparación con el ciclo 11-3-3 de la técnica relacionada (no se muestra).

50 Dado que el ciclo 11-4-4 de PSA tiene veintidós etapas y utiliza once lechos, el bloque unitario estará definido por la duración de dos etapas $t_1 + t_2$ donde el tiempo total del ciclo es $CT = 11 \cdot (t_1 + t_2)$. Al describir todos los eventos e interacciones para las dos primeras etapas, el ciclo se define por completo. Para propósitos ilustrativos, la Figura 3 se debe utilizar junto con la siguiente Tabla 4.

Tabla 4: Tabla del ciclo 11-4-4
(Reducción del sistema de PSA de H₂ de 12 lechos en modo operativo de 11 lechos)

Etapas:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Lecho n.º:																						
1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP
2	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'
3	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E4'
4	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	BD	PG2
5	BD	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2
6	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4
7	E3	E4	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2
8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
9	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6
10	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4
11	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2

Etapa n.º 1: Cuatro lechos procesan la alimentación (etapa de adsorción), concretamente, el Lecho 1, el Lecho 9, el Lecho 10 y el Lecho 11. De esto se desprende que las válvulas 011, 012, 091, 092, 101, 102, 111 y 112 se encuentran en posición abierta. El Lecho 8 y el Lecho 2 interactúan de manera tal que el Lecho 8 envía gas de ecualización al Lecho 2 a través del séptimo colector. Para conseguir las etapas (E1)-(E1'), las válvulas 087, 027, 028 quedan abiertas y la válvula 088 se utiliza para controlar la velocidad. El Lecho 7 que se somete a la tercera etapa de ecualización descendente (E3) envía gas hacia el Lecho 3 a través del sexto colector. Las válvulas 076, 036 y 038 se abren por completo mientras que la válvula 078 controla la velocidad de las etapas (E3)-(E3'). El Lecho 6 suministra el gas de purga para purgar el Lecho 4. La velocidad de la etapa (PPG1) se controla por la válvula 068, mientras que las válvulas 063, 043, 048 se abren por completo. La válvula 044 controla la presión en el Lecho 4. El Lecho 5 se encuentra en la etapa de vaciado (BD por sus siglas en inglés) en la Etapa n.º 1 del ciclo 11-4-4 de PSA. Las impurezas desorbidas salen del lecho a través de la válvula de control 054.

Etapa n.º 2: Cuatro lechos procesan la alimentación (es decir, etapa de adsorción), concretamente, el Lecho 1, el Lecho 9, el Lecho 10 y el Lecho 11. De esto se desprende que las válvulas 011, 012, 091, 092, 101, 102, 111 y 112 se encuentran en posición abierta. El Lecho 2 se encuentra en la etapa de presurización del producto (PP) (es decir, parte del gas de producto se recicla de retorno al proceso a través del séptimo colector para elevar la presión en el Lecho 2). Las válvulas 027 y 028 quedan abiertas, mientras que la válvula 007 controla la velocidad de esta etapa. El Lecho 8 y el Lecho 3 interactúan de manera tal que el Lecho 8 envía gas de ecualización al Lecho 3 a través del sexto colector para alcanzar las etapas (E2) - (E2'). Las válvulas 086, 036, 038 quedan abiertas y la válvula 088 se utiliza para controlar el caudal. El Lecho 7 y el Lecho 4 se someten a las etapas (E4) - (E4') utilizando el quinto colector. Las válvulas 075, 045, 048 quedan abiertas y la válvula 078 se utiliza para controlar el caudal. El Lecho 6 suministra el gas de purga para purgar el Lecho 5. La velocidad de la etapa (PPG2) se controla por la válvula 068, mientras que las válvulas 063, 053, 058 se abren por completo y la válvula 054 controla la presión en el Lecho 5. Como se analiza con respecto al ciclo 12-4-4 de PSA, en este ciclo también se sigue el protocolo de reflujo secuencial, donde se utiliza en primer lugar el gas pobre en hidrógeno (PPG2) y el gas rico en hidrógeno (PPG1) se emplea en la última etapa de purga con vistas a cualquiera de los lechos de la Tabla 4.

Etapa n.º 3: Presenta las mismas interacciones del lecho, válvula y colector que la Etapa n.º 1, y la secuencia avanzará en un bloque unitario. Por lo tanto, las válvulas que quedan abiertas en la Etapa n.º 3 serán: Etapa de adsorción Lecho 2, Lecho 10, Lecho 11 y Lecho 1 - válvulas 021, 022, 101, 102, 011, 012, 021 y 022. En las etapas (E1)-(E1'), el Lecho 9 y el Lecho 3 están en comunicación - las válvulas 097, 037, 038 quedan abiertas y la válvula 098 se utiliza para controlar el caudal. En las etapas (E3) - (E3'), el Lecho 8 y el Lecho 4 están en comunicación - las válvulas 086, 046, 048 quedan abiertas y la válvula 088 controla la velocidad. En las etapas (PPG1) - (PG1), comunicación entre el Lecho n.º 7 y el Lecho 5 - válvulas 078; 073, 053, 058 y válvula de control 054. Mientras tanto, el Lecho 6 se encuentra en la etapa de vaciado, utilizando la válvula de control 064.

En el caso en que el operador de la planta necesite aislar un lecho adicional del sistema de PSA (es decir, realizar una reducción del sistema de PSA), se puede utilizar el ciclo 10-4-3 de PSA de la presente invención. Este ciclo presenta cuatro alimentaciones en paralelo y tres etapas de ecualización lecho a lecho. Es un ciclo en veinte etapas, y dado que utiliza diez lechos, el bloque unitario se definirá por la duración de dos etapas $t_1 + t_2$ y $CT = 10 \cdot (t_1 + t_2)$. Al

describir todos los eventos e interacciones para las dos primeras etapas, el ciclo se definirá por completo. Para propósitos ilustrativos, la Figura 3 se debe utilizar junto con la siguiente Tabla 5.

Tabla 5: Tabla del ciclo 10-4-3
(Reducción del sistema de PSA de H₂ de 12 lechos en modo operativo de 10 lechos)

Etapas:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Lecho n.º																				
1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E3'	E2'	E1'	PP
2	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E3'	E2'
3	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1
4	PG2	PG1	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	PPG1	PPG2	BD
5	PPG2	BD	PG2	PG1	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	PPG1
6	E3	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2
7	E1	E2	E3	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
8	A7	A8	E1	E2	E3	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6
9	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4
10	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2

5 Etapa n.º 1: Cuatro lechos procesan la alimentación (es decir, etapa de adsorción), concretamente, el Lecho 1, el Lecho 8, el Lecho 9 y el Lecho 10. De esto se desprende que las válvulas 011, 012, 081, 082, 091, 092, 101 y 102
10 estarán abiertas. El Lecho 7 y el Lecho 2 interactúan de manera tal que el Lecho 7 envía gas de ecualización al Lecho 2 a través del séptimo colector. Para conseguir las etapas (E1)-(E1'), las válvulas 077, 027, 028 quedan en la posición abierta y la válvula 078 se utiliza para controlar la velocidad. El Lecho 6 se somete a la tercera etapa de
15 ecualización descendente (E3) enviando el gas hacia el Lecho 3 a través del sexto colector. Las válvulas 066, 036 y 038 se abren por completo mientras que la válvula 068 se usa para controlar la velocidad de las etapas (E3)-(E3'). El Lecho 5 suministra el gas de purga pobre en hidrógeno para purgar el Lecho 4. La velocidad de la etapa (PPG2) se controla por la válvula 058, mientras que las válvulas 053, 043, 048 se abren por completo y la válvula 044 controla la presión en el Lecho 4.

20 Etapa n.º 2: Cuatro lechos procesan la alimentación (etapa de adsorción), concretamente, el Lecho 1, el Lecho 8, el Lecho 9 y el Lecho 10. De esto se desprende que las válvulas 011, 012, 081, 082, 091, 092, 101 y 102 se encuentran en posición abierta. El Lecho 2 se encuentra en la etapa de presurización del producto (PP) (es decir, parte del gas de producto se recicla de retorno al proceso para elevar la presión del Lecho 2). Las válvulas 027 y 028 quedan abiertas, mientras que la válvula 007 controla la velocidad de esta etapa. El Lecho 7 y el Lecho 3
25 interactúan de manera tal que el Lecho 7 envía gas de ecualización al Lecho 3 a través del sexto colector. Para conseguir las etapas (E2)-(E2'), las válvulas 076, 036, 038 quedan abiertas y la válvula 078 se utiliza para controlar la velocidad. El Lecho 6 suministra el gas de purga rico en hidrógeno para el Lecho 4. La velocidad de la etapa (PPG1) se controla por la válvula 068, mientras que las válvulas 063, 043, 048 se abren por completo y la válvula 044 controla la presión en el Lecho 4. El Lecho 5 se encuentra en la etapa de vaciado (BD) donde las impurezas desorbidas salen del lecho a través de la válvula de control 054. Como se muestra en la Tabla 5, el ciclo 10-4-3 sigue el protocolo de reflujo secuencial.

30 El ciclo 12-3-5 de PSA alternativo y novedoso tiene veinticuatro etapas y utiliza doce lechos. Por lo tanto, el bloque unitario estará definido por la duración de dos etapas $t_1 + t_2$ y el tiempo total del ciclo $CT = 12 \cdot (t_1 + t_2)$. Este ciclo presenta tres alimentaciones en paralelo y cinco ecualizaciones lecho a lecho. Al describir todos los eventos e interacciones para las dos primeras etapas, el ciclo quedará completamente definido con referencia a la Figura 3 y la tabla del ciclo que se da en la Tabla 6.

35

Tabla 6: Tabla del ciclo 12-3-5 (Funcionamiento del sistema de PSA de H₂ de 12 lechos alternativo)

Etapas:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Lecho n.º																								
1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP
2	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'
3	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'
4	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1
5	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3
6	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3
7	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1
8	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	E1	E2	E3	E4
9	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	E1	E2
10	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6
11	A5	A6	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4
12	A3	A4	A5	A6	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2

Etapa n.º 1: Tres lechos procesan la alimentación (etapa de adsorción), concretamente, el Lecho 1, el Lecho 11 y el Lecho 12. De esto se desprende que las válvulas 011, 012, 111, 112, 121, 111 y 122 se encuentran en una posición abierta. El Lecho 10 y el Lecho 2 interactúan de manera tal que el Lecho 10 envía gas de equalización al Lecho 2 a través del séptimo colector. Para conseguir las etapas (E1)-(E1'), las válvulas 107, 027, 028 quedan en una posición abierta y la válvula 108 se utiliza para controlar la velocidad. El Lecho 9 se somete a la tercera etapa de equalización descendente (E3) enviando gas hacia el Lecho 3 a través del sexto colector. Las válvulas 096, 036 y 038 se abren por completo mientras que la válvula 098 se usa para controlar la velocidad de las etapas (E3)-(E3'). El Lecho 8 se somete a la quinta etapa de equalización descendente (E5) enviando el gas hacia el Lecho 4 a través del quinto colector. Las válvulas 085, 045 y 048 están en una posición abierta, y la válvula 088 controla la velocidad de las etapas (E5)-(E5'). El Lecho 7 proporciona el gas de purga al Lecho 5, y la velocidad de la etapa (PPG2) se controla por la válvula 078. Las válvulas 073, 053, 058 quedan abiertas completamente y la válvula 054 se utiliza para controlar la presión en el Lecho 5. Mientras tanto, el Lecho 6 se encuentra en la etapa de vaciado (BD), y las impurezas desorbidas salen del lecho a través de la válvula de control 064.

Etapa n.º 2: Tres lechos procesan la alimentación (etapa de adsorción), concretamente, el Lecho 1, el Lecho 11 y el Lecho 12. De esto se desprende que las válvulas 011, 012, 111, 112, 121, 111 y 122 se encuentran en una posición abierta. El Lecho 2 se encuentra en la etapa de presurización del producto (PP) (es decir, parte del gas de producto se recicla de retorno al proceso para elevar la presión del Lecho 2). Las válvulas 027 y 028 quedan abiertas, mientras que la válvula 007 controla la velocidad de esta etapa. El Lecho 10 y el Lecho 3 interactúan de manera tal que el Lecho 10 envía gas de equalización al Lecho 3 a través del sexto colector. Para conseguir las etapas (E2)-(E2'), las válvulas 106, 036, 038 quedan abiertas y la válvula 108 se emplea para controlar la velocidad. El Lecho 9 se somete a la cuarta etapa de equalización descendente (E4) enviando el gas hacia el Lecho 4 a través del quinto colector. Las válvulas 095, 045 y 048 se abren por completo mientras que la válvula 098 controla la velocidad de las etapas (E4)-(E4'). El Lecho 8 y el Lecho 7 proporcionan el gas de purga al Lecho 5 y al Lecho 6. La velocidad de las etapas (PPG) se controla por las válvulas 078 y 088. Las válvulas 083, 073, 063, 053, 068, 058 se abren por completo y las válvulas 054 y 064 se utilizan para controlar las presiones en el Lecho 5 y el Lecho 6, respectivamente. Cuando se utiliza el ciclo 12-3-5 con el proceso/patín que se muestra en la Figura 3, los gases de las etapas PPG1 y PPG3 se mezclan en el tercer colector, de manera que en este caso no se estará siguiendo un reflujo secuencial. Sin embargo, se puede evitar la mezcla de los gases de las etapas PPG1 y PPG3 añadiendo otro colector de purga al sistema de PSA para reforzar el protocolo de reflujo secuencial.

Aunque el rendimiento de los sistemas de PSA que se analizaron anteriormente concerniente a ciclos de PSA con doce lechos en operación normal y de reducción, se puede aumentar la escala de la planta para aumentar las capacidades de producción a aproximadamente 150 MMSCFD de hidrógeno. En tal sistema de PSA, el número de lechos se puede aumentar a catorce. El ciclo novedoso e inventivo proporcionado en la presente memoria es un ciclo 14-5-5 de PSA que tiene veintiocho etapas. El bloque unitario del ciclo estará definido por la duración de dos etapas $t_1 + t_2$ y el tiempo total del ciclo $CT = 14 \cdot (t_1 + t_2)$. Al describir todos los eventos e interacciones para las dos primeras etapas, el ciclo se definirá por completo. La tabla del ciclo de la Tabla 7 muestra las etapas del ciclo. La Figura 3, aunque es un proceso de doce lechos, se utiliza en la presente memoria para propósitos de ilustración del sistema de catorce lechos, suponiendo que se añaden dos lechos adicionales al diseño del proceso, junto con la nomenclatura empleada anteriormente.

Tabla 7: Tabla del ciclo 14-5-5 de planta grande
(Funcionamiento del sistema de PSA de H₂ de 14 lechos)

Etapas:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Lecho n.º																												
1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP
2	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'
3	E2'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'
4	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1
5	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3
6	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3
7	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1
8	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	E1	E2	E3	E4
9	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	E1	E2
10	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
11	A9	A10	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
12	A7	A8	A9	A10	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6
13	A5	A6	A7	A8	A9	A10	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4
14	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	E1	E2	E3	E4	E5	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2

Etapa n.º 1: Cinco lechos procesan la alimentación (etapa de adsorción), concretamente, el Lecho 1, el Lecho 11, el Lecho 12, el Lecho 13 y el Lecho 14. De esto se desprende que las válvulas 011, 012, 111, 112, 121, 122, 131, 132, 141 y 142 se encuentran en una posición abierta. El Lecho 10 y el Lecho 2 interactúan de manera tal que el Lecho 10 envía gas de ecualización al Lecho 2 a través del séptimo colector. Para conseguir las etapas (E1)-(E1'), las válvulas 107, 027, 028 quedan abiertas y la válvula 108 se utiliza para controlar la velocidad. El Lecho 9 que se somete a la tercera etapa de ecualización descendente (E3) envía el gas hacia el Lecho 3 a través del sexto colector. Las válvulas 096, 036 y 038 están en una posición abierta y la válvula 098 se emplea para controlar la velocidad de las etapas (E3)-(E3'). El Lecho 8 se somete a la quinta etapa de ecualización descendente (E5) enviando el gas hacia el Lecho 4 a través del quinto colector. Las válvulas 085, 045 y 448 están en una posición abierta, y la válvula 088 controla la velocidad de las etapas (E5)-(E5'). El Lecho 7 suministra el gas al Lecho 5. La velocidad de la etapa (PPG2) se controla por la válvula 078. Las válvulas 073, 053, 058 quedan abiertas completamente y la válvula 054 se utiliza para controlar la presión en el Lecho 5. El Lecho 6 se encuentra en la etapa de vaciado (BD) en esta Etapa n.º 1, y las impurezas desorbidas salen del lecho a través de la válvula de control 064.

Etapa n.º 2: Cinco lechos procesan la alimentación, concretamente, el Lecho 1, el Lecho 11, el Lecho 12, el Lecho 13 y el Lecho 14. De esto se desprende que las válvulas 011, 012, 111, 112, 121, 122, 131, 132, 141 y 142 se encuentran en la posición abierta. El Lecho 2 se encuentra en la etapa de presurización del producto (PP) (es decir, parte del gas de producto se recicla de retorno al proceso para elevar la presión del Lecho 2). Las válvulas 027 y 028 están en la posición abierta, mientras que la válvula 007 controla la velocidad de esta etapa. El Lecho 10 y el Lecho 3 interactúan de manera tal que el Lecho 10 envía gas de ecualización al Lecho 3 a través del sexto colector. Para realizar las etapas (E2)-(E2'), las válvulas 106, 036, 038 quedan en la posición abierta y la válvula 108 se utiliza para controlar la velocidad. El Lecho 9 se somete a la cuarta etapa de ecualización descendente (E4) enviando el gas hacia el Lecho 4 a través del quinto colector. Las válvulas 095, 045 y 048 se abren por completo mientras que la válvula 098 controla la velocidad de las etapas (E4)-(E4'). El Lecho 8 y el Lecho 7 proporcionan el gas de purga al Lecho 5 y al Lecho 6. La velocidad de las etapas (PPG1) y (PPG3) se controla por las válvulas 078 y 088, mientras que las válvulas 073, 083, 063, 053, 068, 058 se abren por completo y las válvulas 054 y 064 se utilizan para controlar las presiones en el Lecho 5 y el Lecho 6, respectivamente. En este escenario, las etapas (PPG1) y (PPG3) comparten el tercer colector y, por lo tanto, no se sigue el protocolo de reflujo secuencial. Sin embargo, se entenderá que puede emplearse un colector adicional para cumplir el protocolo de reflujo secuencial.

Aún en otra forma de realización ejemplar, es posible aumentar la escala de la planta aún adicionalmente hasta un sistema de PSA de dieciséis lechos, a través del ciclo innovador de la presente invención, aumentando de este modo las capacidades de producción a aproximadamente 200 MMSCFD de hidrógeno. El novedoso ciclo 16-6-6 de PSA tiene treinta y dos etapas, presenta seis alimentaciones en paralelo y seis etapas de ecualización lecho a lecho. El bloque unitario del ciclo estará definido por la duración de dos etapas $t_1 + t_2$ para un tiempo total del ciclo $CT=$

16*($t_1 + t_2$). Al describir todos los eventos e interacciones para las dos primeras etapas, el ciclo se define por completo. La tabla del ciclo de la Tabla 8 muestra las etapas del ciclo. La Figura 3, aunque es un proceso de doce lechos, se utiliza en la presente memoria para propósitos de ilustración del sistema de dieciséis lechos, donde al diseño del proceso se le añadirán cuatro lechos adicionales y un colector más (que se denominará en la presente memoria como el noveno colector). Se puede aplicar la nomenclatura de las válvulas que se utilizó anteriormente.

En resumen; el proceso con dieciséis lechos necesita 16 lechos, 2 colectores en el extremo de la alimentación, 6 colectores en el extremo del producto de los lechos, y nueve válvulas por lecho. La tabla del ciclo de la Tabla 8 muestra las etapas del ciclo.

Tabla 8: Tabla del ciclo 16-6-6 de planta grande (Funcionamiento del sistema de PSA de H₂ de 16 lechos)

Etapas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Lecho n.º																																
1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	E1	E2	E3	E4	E5	E6	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E6'	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP
2	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	E1	E2	E3	E4	E5	E6	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E6'	E5'	E4'	E3'	E2'
3	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	E1	E2	E3	E4	E5	E6	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E6'	E5'	E4'
4	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	E1	E2	E3	E4	E5	E6	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E6'
5	PG1	E6'	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	E1	E2	E3	E4	E5	E6	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2
6	PG3	PG2	PG1	E6'	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	E1	E2	E3	E4	E5	E6	PPG1	PPG2	PPG3	BD
7	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E6'	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	E1	E2	E3	E4	E5	E6	PPG1	PPG2
8	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E6'	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	E1	E2	E3	E4	E5	E6
9	E5	E6	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E6'	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	E1	E2	E3	E4
10	E3	E4	E5	E6	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E6'	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	E1	E2
11	E1	E2	E3	E4	E5	E6	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E6'	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
12	A11	A12	E1	E2	E3	E4	E5	E6	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E6'	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
13	A8	A9	A10	A11	A12	E1	E2	E3	E4	E5	E6	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E6'	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
14	A7	A8	A9	A10	A11	A12	E1	E2	E3	E4	E5	E6	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E6'	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6
15	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	E1	E2	E3	E4	E5	E6	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E6'	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4
16	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	E1	E2	E3	E4	E5	E6	PPG1	PPG2	PPG3	BD	PG3	PG2	PG1	E6'	E5'	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2

Etapa n.º 1: Seis lechos procesan la alimentación (etapa de adsorción), concretamente, el Lecho 1, el Lecho 12, el Lecho 13, el Lecho 14, el Lecho 15 y el Lecho 16. De esto se desprende que las válvulas 011, 012, 121, 122, 131, 132, 141, 142, 151, 152, 161 y 162 se encuentran en la posición abierta. El Lecho 11 y el Lecho 2 interactúan de manera tal que el Lecho 11 envía gas de ecualización al Lecho 2 a través del séptimo colector. Para realizar las etapas (E1)-(E1'), las válvulas 117, 027, 028 quedan en la posición abierta y la válvula 118 se utiliza para controlar la velocidad. El Lecho 10 se somete a la tercera etapa de ecualización descendente (E3) enviando gas hacia el Lecho 3 a través del sexto colector. Las válvulas 106, 036 y 038 se abren por completo mientras que la válvula 108 se usa para controlar la velocidad de las etapas (E3)-(E3'). El Lecho 9 se somete a la quinta etapa de ecualización descendente (E5) enviando el gas hacia el Lecho 4 a través del quinto colector. Las válvulas 095, 045 y 048 están en la posición abierta, y la válvula 098 controla la velocidad de las etapas (E5)-(E5'). El Lecho 8 proporciona el gas de purga al Lecho 5 a través del noveno colector. La velocidad de la etapa (PPG1) se controla por la válvula 088. Las válvulas 089, 059, 058 quedan abiertas completamente y la válvula 054 se utiliza para controlar la presión en el Lecho 5. En la etapa (PPG3), el Lecho 7 purga el Lecho 6 a través del nuevo colector número tres. Las válvulas 073, 063, 068 quedan abiertas, la válvula 078 controla la velocidad de la etapa (PPG3) y la válvula 064 controla la presión en el Lecho 6.

Etapa n.º 2: Seis lechos procesan la alimentación, concretamente, el Lecho 1, el Lecho 12, el Lecho 13, el Lecho 14, el Lecho 15 y el Lecho 16. De esto se desprende que las válvulas 011, 012, 121, 122, 131, 132, 141, 142, 151, 152, 161 y 162 se encuentran en la posición abierta. El Lecho 2 se encuentra en la etapa de presurización del producto (PP) (es decir, parte del gas de producto se recicla de retorno al proceso para elevar la presión del Lecho 2). Las válvulas 027 y 028 quedan abiertas, mientras que la válvula 007 controla la velocidad de esta etapa. El Lecho 11 y el Lecho 3 interactúan de manera tal que el Lecho 11 envía gas de ecualización al Lecho 3 a través del sexto colector. Para conseguir las etapas (E2)-(E2'), las válvulas 116, 036, 038 quedan en la posición abierta y la válvula 118 se utiliza para controlar la velocidad. El Lecho 10 se somete a la cuarta etapa de ecualización descendente (E4) enviando el gas hacia el Lecho 4 a través del quinto colector. Las válvulas 105, 045 y 048 están en la posición abierta, y la válvula 108 controla la velocidad de las etapas (E4)-(E4'). El Lecho 9 y el Lecho 5 interactúan de manera tal que el Lecho 9 envía gas de ecualización al Lecho 5 a través del noveno colector. Para realizar las etapas (E6)-(E6'), las válvulas 099, 059, 058 quedan abiertas y la válvula 098 se utiliza para controlar la velocidad. El Lecho 8

suministra el gas de purga al Lecho 6. La velocidad de la etapa (PPG2) se controla por la válvula 088. Las válvulas 083, 063, 068 quedan abiertas completamente y la válvula 064 se emplea para controlar la presión en el Lecho 6. El Lecho 5 se encuentra en la etapa de vaciado "BD" en esta Etapa n.º 2, mientras que las impurezas desorbidas salen del lecho a través de la válvula de control 054.

El rendimiento para los grandes sistemas de PSA (es decir, con doce o más lechos) que operan en los ciclos 12-4-4, 14-5-5 y 16-6-6 recientemente diseñados se obtuvo a través de modelado matemático. El resultado para cada ciclo se resume en la Tabla 9. El modelo asumió la siguiente composición del 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 2583 kPa (360 psig).

Tabla 9: Ciclos de PSA de H₂ y rendimiento del proceso correspondiente

	12-4-4	14-5-5	16-6-6
Tiempo del ciclo [min]	6,6	6,30	5,6
[t ₁ , t ₂] [s]	[16,17]	[13, 14]	[10, 11]
Alta presión [kPa (Psig)]	2583 (360)	2583 (360)	2583 (360)
Baja presión [kPa (Psig)]	136 (5,0)	136 (5,0)	136 (5,0)
Temperatura [K]	310	310	310
ID del lecho [m (pie)]	3,8 (12,5)	3,8 (12,5)	3,8 (12,5)
Velocidad de alimentación [10 ⁶ m ³ estándar por día (MMSCFD)]	5,52 (195)	6,80 (240)	7,93 (280)
Velocidad del producto de H ₂ [10 ⁶ m ³ estándar por día (MMSCFD)]	3,68 (130)	4,62 (163)	5,38 (190)
BSF total [kg/t H ₂ /d (lbs/TPD H ₂)]	1,74 (3,484)	1,62 (3,239)	1,59 (3,181)
Pureza de H₂ [%]	99,999	99,999	99,999
Recuperación de H₂ [%]	90,3	92	92
Nota 1: 10 ⁶ m ³ estándar (MMSCFD) representa millones de pies cúbicos estándar (pies cúbicos) por día de gas donde las condiciones estándar que se asumen 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 6894,757 Pascal; 1 lbs es una unidad de masa correspondiente a 0,4535924 kg; K corresponde a las unidades del SI para la temperatura de 1 Kelvin; pies representa la distancia donde 1 pie es igual a 0,3048 metros; Nota 3: TPD H ₂ representa toneladas (2000 lbs) de hidrógeno por día; y Nota 4: El BSF (factor de tamaño de los lechos) es la proporción de masa total de adsorbentes en todos los lechos y la producción diaria de hidrógeno en toneladas cortas día (véase la Nota 3)			

Como se muestra en la Tabla 9, la recuperación para los ciclos de PSA 12-4-4, 14-5-5 y 16-6-6 PSA es de más del 90,0 %. Este es un porcentaje dos o más puntos mayor en comparación con el ciclo 12-4-4 de la técnica anterior analizada en Xu *et al* (Patente de Estados Unidos n.º 6.379.431 B1). Véase la Tabla 9. Esta mejor recuperación del hidrógeno se traduce en millones de dólares de gas adicional que se produce y se vende en una base anual.

Aunque la invención se ha descrito en detalle con referencia a una realización específica de la misma, será evidente para un experto en la técnica que se pueden hacer diversos cambios y modificaciones, y emplear equivalentes, sin apartarse del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un proceso de adsorción por variación de presión para separar un gas de alimentación de suministro presurizado que contiene uno o más componentes más fuertemente adsorbibles de al menos un componente de gas de producto menos fuertemente adsorbible en un sistema de adsorción por variación de presión de once lechos para producir una corriente continua de gas de producto enriquecido en el componente menos fuertemente adsorbible y una corriente continua de gas de salida que se enriquece en componentes fuertemente adsorbibles, en donde el ciclo de proceso tiene cuatro etapas de ecualización lecho a lecho, mientras que cuatro de los lechos están en producción, y utilizan gas de purga de concentraciones en aumento del gas de producto menos fuertemente adsorbible durante las etapas de purga, en función de la siguiente tabla de ciclos:

Etapas:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Lecho n.º																						
1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP
2	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'
3	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E4'
4	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	BD	PG2
5	BD	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2
6	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4
7	E3	E4	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2
8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
9	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4	A5	A6
10	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2	A3	A4
11	A3	A4	A5	A6	A7	A8	E1	E2	E3	E4	PPG1	PPG2	BD	PG2	PG1	E4'	E3'	E2'	E1'	PP	A1	A2

donde:

A1 = Primera etapa de adsorción
 A2 = Segunda etapa de adsorción
 A3 = Tercera etapa de adsorción
 A4 = Cuarta etapa de adsorción
 A5 = Quinta etapa de adsorción
 A6 = Sexta etapa de adsorción
 A7 = Séptima etapa de adsorción
 A8 = Octava etapa de adsorción
 E1 = Primera ecualización descendente
 E2 = Segunda ecualización descendente
 E3 = Tercera ecualización descendente
 E4 = Cuarta ecualización descendente
 PPG1 = Primera aportación de gas de purga
 PPG2 = Segunda aportación de gas de purga
 BD = Vaciado
 PG2 = Purga usando gas de la etapa PPG2
 PG1 = Purga usando gas de la etapa PPG1
 E4' = Ecualización ascendente (usando gas de la etapa E4)
 E3' = Ecualización ascendente (usando gas de la etapa E3)
 E2' = Ecualización ascendente (usando gas de la etapa E2)
 E1' = Ecualización ascendente (usando gas de la etapa E1)
 PP = Presurización del producto

2. El proceso de adsorción por variación de presión según la reivindicación 1, en donde dicho gas de producto menos fuertemente adsorbible es hidrógeno.

3. El proceso de adsorción por variación de presión según la reivindicación 1, en donde el gas de alimentación de suministro que contiene uno o más componentes fuertemente adsorbibles se selecciona del grupo que consiste en hidrocarburos, dióxido de carbono, monóxido de carbono, argón, nitrógeno, helio y vapor de agua.

4. El proceso de adsorción por variación de presión según la reivindicación 1, en donde cada lecho adsorbente contiene material de alúmina, carbono y zeolita configurado en capas dispuestas en este orden particular para el procesamiento de gas de alimentación.
- 5 5. El proceso de adsorción por variación de presión según la reivindicación 4, donde las capas de carbono y zeolita están cada una subdivididas en dos capas con diferente tamaño de partícula.
6. El proceso de adsorción por variación de presión según la reivindicación 5, donde la primera de las capas de carbono subdivididas encontradas por el gas de alimentación de suministro tiene un tamaño de partícula de 0,5 a 1,5 mm y una afinidad para la impureza de dióxido de carbono.
- 10 7. El proceso de adsorción por variación de presión según la reivindicación 5, donde la segunda de las capas de carbono subdivididas encontradas por el gas de alimentación de suministro tiene un tamaño de partícula de 2,0 a 3,0 mm y una afinidad para las impurezas de metano.
- 15 8. El proceso de adsorción por variación de presión según la reivindicación 5, donde la primera de las capas de zeolita subdivididas encontradas por el gas de alimentación de suministro tiene un tamaño de partícula de 0,5 a 2,0 mm y una afinidad para la impureza de monóxido de carbono.
- 20 9. El proceso de adsorción por variación de presión según la reivindicación 5, donde la segunda de las capas de zeolita subdivididas encontradas por el gas de alimentación de suministro tiene un tamaño de partícula de 2,0 a 3,0 mm y una afinidad para la impureza de nitrógeno.

Configuración del lecho/estratificación avanzada

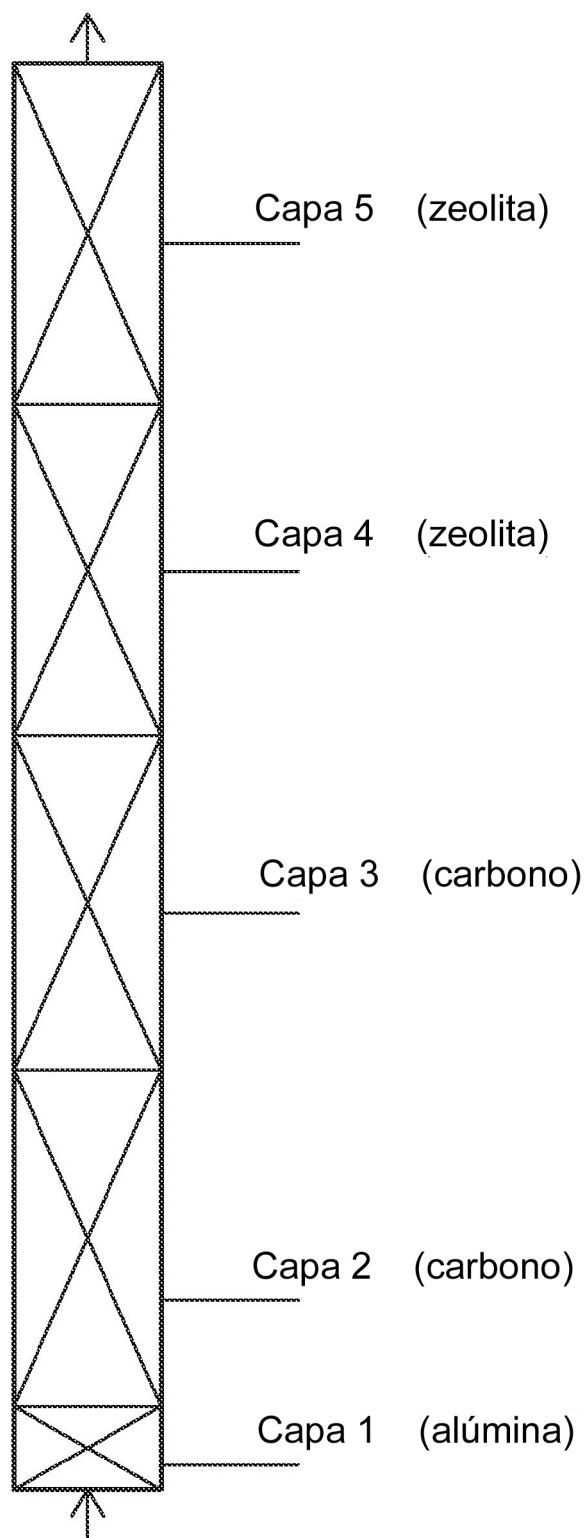


FIG. 1

Tasas de adsorción relativas de N_2 y CO frente al diámetro de partícula

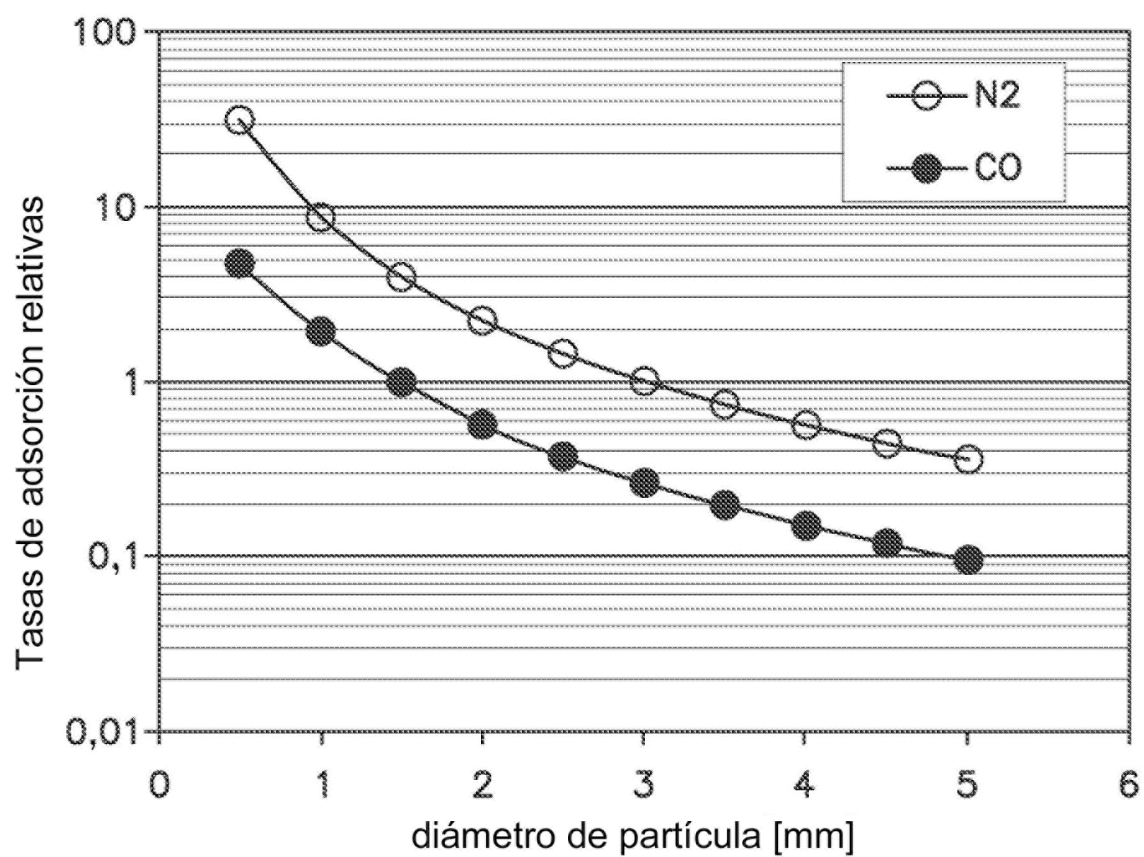
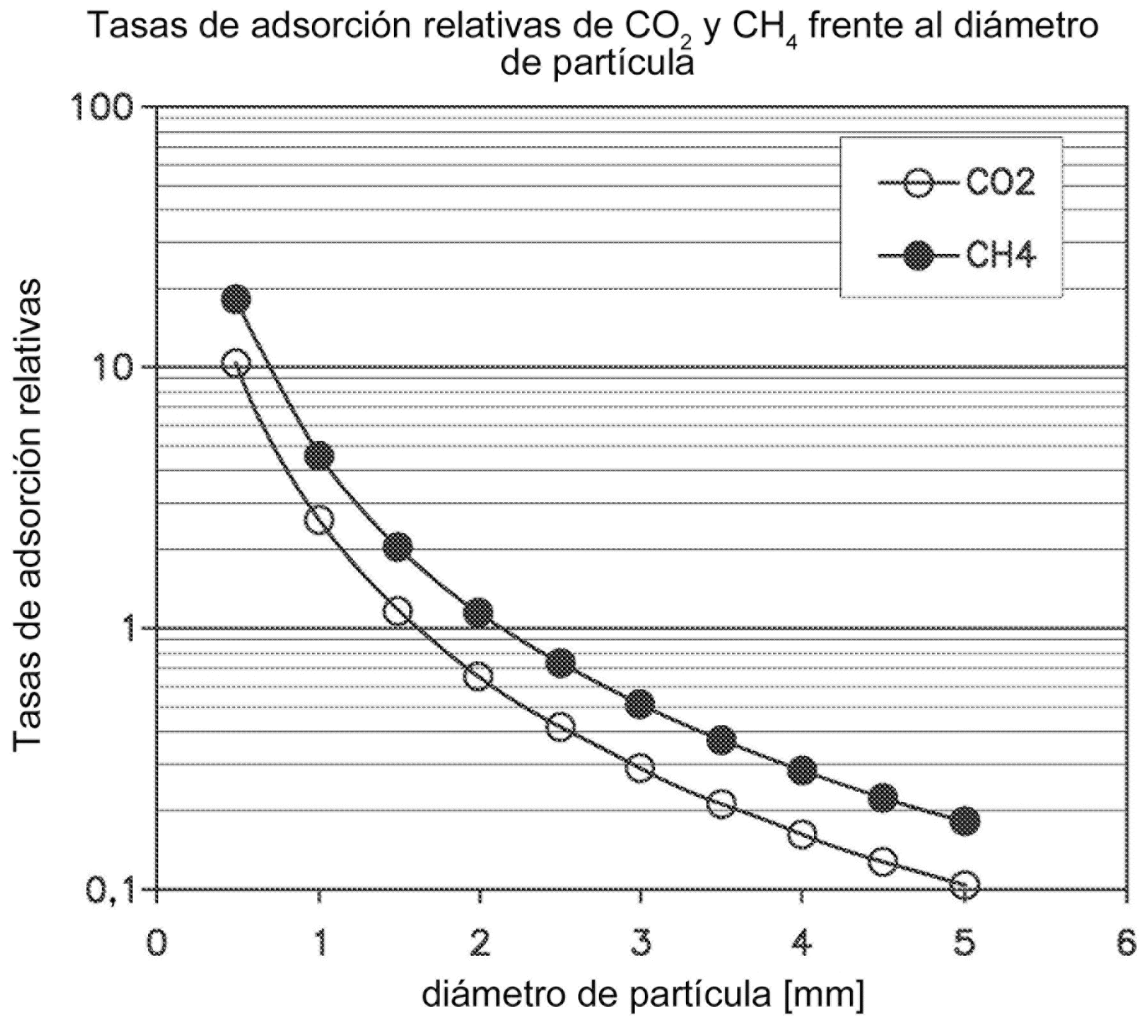


FIG. 2A

**FIG. 2B**

Sistema PSA de H₂ de doce lechos

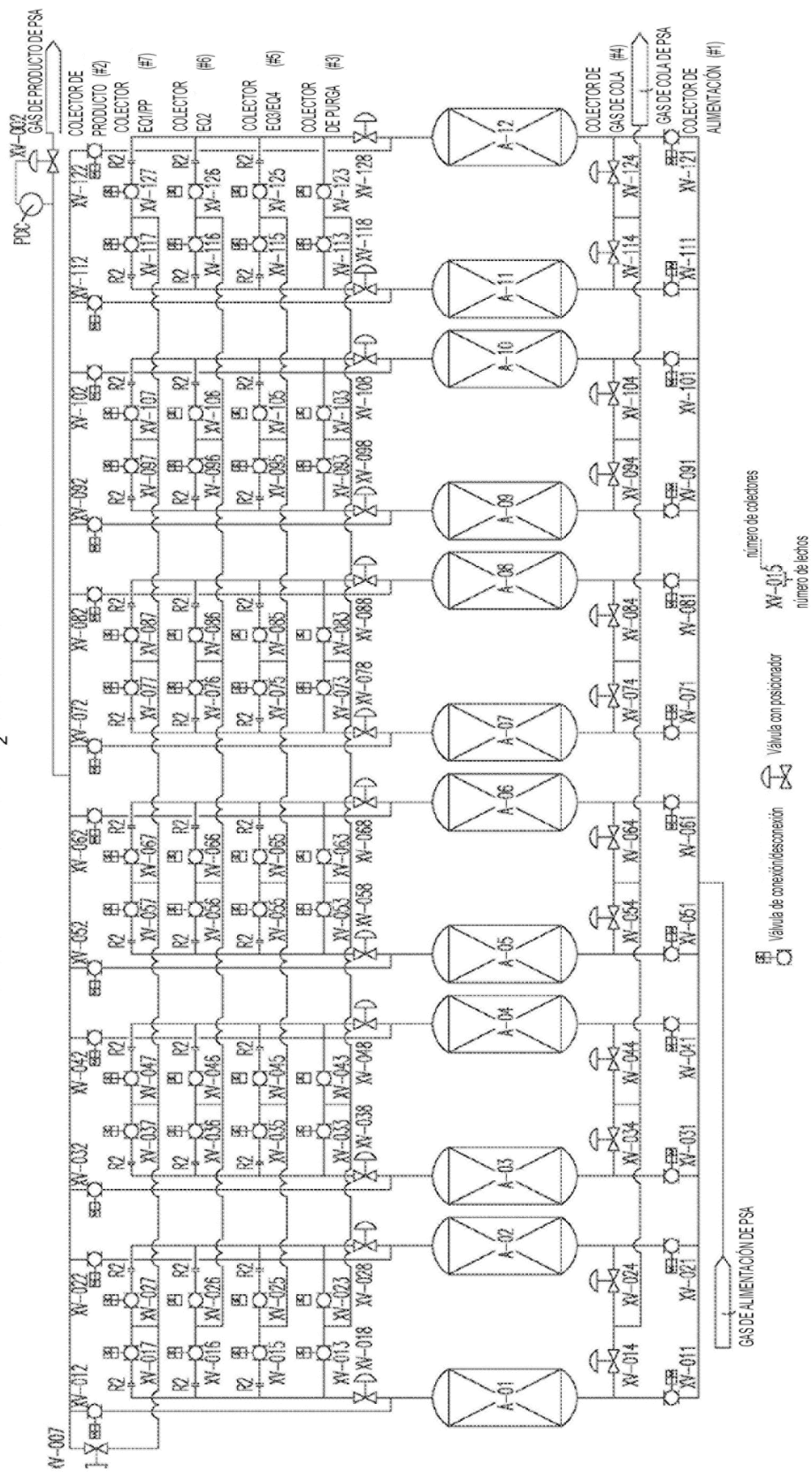


FIG. 3