

PROCESO DE VPSA ENERGÉTICAMENTE EFICIENTE CON COMPRESORES

CENTRÍFUGOS DE ALTA VELOCIDAD DE ACCIONAMIENTO DIRECTO

CAMPO DE LA INVENCION

5

La presente invención se relaciona generalmente con procesos y sistemas energéticamente eficientes de separación de gas que utilizan compresores centrífugos variables de alta velocidad de accionamiento directo para presurizar y/o
10 evacuar recipientes adsorbentes y presurizar adicionalmente el gas de producto dentro de un sistema de separación de gas de tipo adsorción.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

15

Las separaciones de un gas de una mezcla con otros gases son procesos industriales importantes. En tales procesos, el objetivo puede ser para obtener un gas de producto mejorado en un gas o a partir del cual se ha eliminado
20 un constituyente no deseado de ese gas de producto. Por ejemplo, existen procesos a escala comercial para separar un aire en sus gases componentes para obtener nitrógeno, oxígeno y argón y para los procesos de prepurificación de aire para pretratar el aire antes de usarlo en otros procesos tales

como la separación criogénica de aire en sus gases componentes.

La separación de aire puede lograrse usando procesos de adsorción, en particular, procesos de tipo adsorción por oscilación de presión (PSA, por sus siglas en inglés) y adsorción por oscilación de presión al vacío (VPSA, por sus siglas en inglés). En los procesos de PSA y VPSA, el aire comprimido se bombea a través de un lecho fijo de un adsorbente que exhibe una preferencia adsorbente para uno de los constituyentes principales, por lo que se obtiene una corriente de producto efluente mejorada en el constituyente no adsorbido (o menos adsorbido). En comparación con los procesos de separación de aire criogénicos más tradicionales, los procesos de adsorción para separación de aire requieren un equipo relativamente simple y son relativamente fáciles de mantener. Sin embargo, los procesos de adsorción tienen típicamente una recuperación de producto menor que muchos procesos criogénicos. Por esta razón, las mejoras en la eficiencia de los procesos de adsorción siguen siendo un objetivo importante. Un medio principal de mejora es el descubrimiento y desarrollo de mejores adsorbentes. Algunos de tales adsorbentes han conducido a tiempos de ciclo reducidos dentro de un determinado proceso de adsorción. De

acuerdo con ello, se requieren equipos nuevos capaces de satisfacer las demandas de tiempos de ciclo reducidos.

También continúa existiendo una demanda de plantas PSA y VPSA con un menor consumo de energía. El proceso básico
5 usa un adsorbente selectivo para eliminar al menos un componente de una mezcla de gas, que usa cuatro etapas básicas de proceso: (1) adsorción, (2) despresurización, (3) purga y (4) represurización. La mezcla de gas que contiene el componente más fácilmente adsorbible y un componente menos
10 fácilmente adsorbible se pasa a través de al menos un lecho adsorbente capaz de adsorber selectivamente el componente más fácilmente adsorbible a una presión de adsorción predeterminada (superior). La corriente de gas que sale del lecho a esta presión superior ahora se concentra en el
15 componente menos fácilmente adsorbible y se elimina por ejemplo como producto. Cuando el lecho se satura con el componente fácilmente adsorbible, después de eso, el lecho se despresuriza a una presión de desorción más baja para la desorción del componente fácilmente adsorbible, con este gas
20 que después se descarga del sistema. Algunos procesos pueden incluir etapas adicionales tales como ecualización y presurización del producto.

Los procesos convencionales de PSA y VPSA usan sopladores de desplazamiento positivo de tipo giratorio para

la presurización o evacuación de gas en un lecho adsorbente. Estos sopladores de lóbulo giratorio convencionales tienen típicamente eficiencias menores y costos de mantenimiento mayores que los compresores centrífugos, pero sí se adaptan bastante bien a la naturaleza oscilante de los ciclos de oscilación de presión. Una característica atractiva de los sopladores de lóbulo giratorio pertenecientes a un proceso de adsorción es que el consumo de energía es proporcional a los requisitos de presión del sistema. El consumo teórico de energía del soplador es directamente proporcional al diferencial de presión del sistema (es decir, tiene una relación lineal entre la presión y el consumo de energía). Esta respuesta de energía lineal a los requisitos de presión del sistema ha hecho que los sopladores del lóbulo giratorio sean los equipos de compresión de elección para la industria de PSA y VPSA. Sin embargo, los sopladores de lóbulo giratorio crean fuertes pulsaciones de presión en el sistema. Sin una mitigación adecuada, se conoce que las pulsaciones de presión de los sopladores de lóbulo giratorio causan un daño estructural severo en el equipo de proceso corriente abajo. Aunque los recipientes amortiguadores de pulsaciones se usan normalmente con sopladores de lóbulo giratorio, no eliminan completamente la falta de coincidencia, y siempre hay un nivel considerable de pulsación de presión presente en el sistema.

En el pasado, los compresores centrífugos a velocidades fijas con y sin álabes guía de entrada (IGV, por sus siglas en inglés) y con un accionador de frecuencia variable (VFD, por sus siglas en inglés) se han considerado para procesos de PSA y VPSA debido a su mayor eficiencia en comparación con los sopladores de lóbulo giratorio convencionales. Los compresores centrífugos necesitan típicamente ser capaces de funcionar a velocidades altas y seguir ciclos de oscilación de presión altamente dinámicos mientras mantienen la eficiencia óptima para aprovechar una eficiencia alta de la máquina adiabática. Es necesario usar un control de velocidad variable y/o IGV, o una combinación de los dos para satisfacer las condiciones de presión variable. A medida que la presión del ciclo de PSA o VPSA se desvía de la condición de presión de diseño de un compresor centrífugo de velocidad fija, la eficiencia de la etapa se deteriora sustancialmente, especialmente cuando funciona a relaciones de presión cercanas a 1 (estrangulación). Esto da como resultado un mayor consumo promedio de energía y un deterioro de la eficiencia general promedio del compresor durante el ciclo de PSA o VPSA.

Aun así, esta tecnología no pudo usarse exitosamente en el pasado. El uso de compresores centrífugos de velocidad fija convencionales con y sin IGV no es ideal debido a su

incapacidad de seguir el aumento y disminución rápidos de velocidad requeridos por el proceso de adsorción por oscilación de presión cíclica. Un compresor centrífugo de velocidad variable convencional puede tener un rango de funcionamiento mejorado y ahorro de energía mejorado durante el uso de IGV con una reducción en el flujo, pero es incapaz de adaptarse rápidamente a las condiciones de flujo transitorio del ciclo de PSA o VPSA (debido a las grandes inercias de los engranajes y al motor de inducción convencional de gran funcionamiento lento).

En los últimos años se han realizado varios avances hacia los procesos de PSA y VPSA. Algunos de estos avances incluyen: (a) una reducción significativa en la relación de las presiones de adsorción superior a desorción inferior, y (b) reducciones en el tiempo de ciclo (típicamente menos de un minuto) que conducen a inventarios de adsorbentes reducidos. Un factor significativo para el requerimiento de energía total de un proceso de PSA o VPSA es esta relación de presiones de adsorción a desorción. La presión de suministro durante el período de adsorción de un lecho por el dispositivo de compresión de aire de alimentación, así como la presión de succión durante el período de desorción por un dispositivo de evacuación, cambia constantemente a medida que avanza el ciclo. Para lograr el menor consumo de energía total posible para un

ciclo tal como este, se prefiere que los dispositivos de compresión y evacuación de alimentación se operen a la máxima eficiencia en un amplio rango de relaciones de presión.

Las plantas de VPSA se diseñan y dimensionan típicamente para cumplir con el requerimiento máximo de producción en condiciones de temperatura ambiente más alta. Sin embargo, las plantas de VPSA funcionan frecuentemente a una capacidad de diseño menor debido a los cambios en la demanda del cliente y en las condiciones ambientales. La función típica de reducción de VPSA se logra a través de la extensión del tiempo de etapa del ciclo sin cambiar el rango de flujo de alimentación y presión de adsorción y desorción. Además, se usa una corriente de recirculación del producto para asegurar la operación de la máquina. Por lo tanto, la operación de VPSA en modo de reducción no es tan energéticamente eficiente como en el punto de diseño. El objetivo de la presente invención es mejorar la energía y la eficiencia de capital de la planta de VPSA a través de la optimización de los compresores de alimentación, vacío y producto centrífugos de velocidad variable de accionamiento directo para minimizar la inversión inicial de capital de la planta y alcanzar bajos costos de producción por unidad durante la vida útil de la planta.

La patente de los EE. UU. núm. 4.197.096 describe un método para suministrar producto variable a la presión requerida al cliente por medio de un compresor de desplazamiento constante a través de una línea de recirculación y una válvula reguladora.

La patente de los EE. UU. núm. 4.197.096 describe que puede mejorarse el consumo de energía del sistema de VPSA a demanda de producción reducida mediante la regulación de la velocidad de la bomba de vacío a través de una máquina de desplazamiento positivo o una máquina centrífuga accionada por motor de velocidad variable. La pérdida inercial por la operación del compresor centrífugo de velocidad variable después del ciclo de VPSA es significativa, y reduce el peso de la ganancia de eficiencia de la máquina de desplazamiento positivo. La patente de los EE. UU. núm. 4197096 no cambia la presión superior de adsorción de VPSA para alcanzar la menor demanda de producción. El nuevo método propuesto de reducción de presión de adsorción superior menor simplemente no funcionaría en el esquema de la invención de la patente de los EE. UU. núm. 4.197.096 descrita, ya que el compresor de desplazamiento positivo usado no sería capaz de tomar una menor presión de adsorción superior del VPSA y suministrar la presión final requerida sin la línea de recirculación. La menor producción se logra a través de la línea de

recirculación para el compresor del producto, en consecuencia, el compresor del producto siempre consumirá la misma cantidad de energía para el flujo reducido que para el flujo total. La presión superior de adsorción de VPSA para una producción reducida se mantiene igual que la producción total, no hay ahorros de energía esperados para el compresor de alimentación. Por ello, se espera que la reducción del consumo de energía proveniente de la patente de EE. UU. núm. 4.197.096 sea significativamente mayor que la presente invención del nuevo método de reducción.

La patente de los EE. UU. núm. 5.258.056 describe un proceso y sistema de adsorción por oscilación de presión para elaborar una demanda de producción variable al ajustar la velocidad de flujo de alimentación para un nivel de impureza dado. La reducción de la producción se logra al variar solamente el flujo de alimentación a través de una válvula de control basada en la retroalimentación de la pureza del producto medida. No hay cambio en la relación de presiones de adsorción y/o de presión de adsorción y desorción. Esto es diferente del método de reducción propuesto en donde el flujo de alimentación, la relación de presión de adsorción, la presión de adsorción y desorción se ajustan para lograr la menor potencia de separación de

energía en la producción reducida mientras se cumple con el requisito de pureza del producto.

La patente de los EE. UU. núm. 6.030.435 establece un método de regulación para un proceso de adsorción por oscilación de presión para lograr un rendimiento óptimo de PSA. La invención principal busca regular la temperatura del flujo de alimentación de manera que el sistema de adsorción mantenga la temperatura óptima para el máximo rendimiento. Un enfoque para regular la temperatura de alimentación es variar la presión de adsorción mientras se mantiene la misma demanda de producción. El método de regulación de US6030435 ilustra que el ajuste de la presión de adsorción podría tener una mejora menor para el rendimiento de PSA. Sin embargo, variar solamente la presión de adsorción superior proporciona una eficiencia energética limitada para la demanda de producción reducida mientras que se cumple con el requisito de pureza del producto. La propuesta de ajustar simultáneamente el flujo de alimentación, la relación de presión de adsorción, la presión de adsorción y desorción proporciona una eficiencia de energía significativamente más mejorada.

La patente de los EE. UU. núm. 7.641.716 describe una metodología de estrangulación para mantener una alimentación constante. Esto consiste en válvulas ubicadas antes del sistema para mantener la velocidad de flujo a la velocidad óptima para

lograr el rendimiento máximo del sistema. Esta patente establece una práctica operativa general en (V)PSA de control de flujo de alimentación constante en el sistema para mantener un desempeño óptimo.

5

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

La presente invención se relaciona con un método y sistema para mejorar la energía de la planta de VPSA a una
10 capacidad de producción y eficiencia de capital reducidas mediante la optimización de compresores de productos de alimentación, vacío y centrífugos para lograr un menor consumo de energía y un menor costo de producción de productos de gas unitarios. Más específicamente, la presente invención se
15 relaciona con un nuevo proceso y sistema de reducción de VPSA energéticamente eficiente que usa un compresor de producto centrífugo de accionamiento directo de alta velocidad para lograr la producción deseada. Puede lograrse un consumo de energía significativamente menor mediante el uso de un flujo
20 menor y una presión superior de adsorción menor en el rango de producción menor.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS FIGURAS

La Figura 1 representa un diagrama de flujo de proceso de VPSA.

La Figura 2 muestra un mapa de compresor para un compresor de producto de oxígeno.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

La tecnología centrífuga está basada en la compresión dinámica. En un compresor dinámico, el gas, tal como aire, oxígeno, nitrógeno u otros gases, es extraído entre las paletas de un impulsor que gira rápidamente y acelera a alta velocidad. Después, el aire se descarga a través de un difusor donde la energía cinética se transforma en presión estática. La mayoría de los compresores dinámicos son compresores turbo con un patrón de flujo axial o radial y están diseñados para mayores velocidades de flujo de volumen. El rendimiento de un compresor dinámico depende mucho de las condiciones ambientales tales como:

- 1) Temperatura de entrada
- 2) Presión de entrada
- 3) Humedad relativa (HR)
- 4) Temperatura de enfriamiento del agua

La disminución de la temperatura de entrada del aire aumenta la densidad del aire, lo que resulta en un mayor suministro de aire libre (pies cúbicos reales por minuto, ACFM), mayor consumo de energía del compresor y mayor rango de reducción disponible. Del mismo modo, aumentar la temperatura de entrada del aire disminuye la densidad del aire, lo que resulta en un menor suministro de aire libre

(ACFM), menor consumo de energía del compresor y menor rango de reducción disponible.

Una disminución en la presión de entrada reducirá la densidad del aire en la entrada del compresor. Al igual que con
5 temperaturas más altas, resultará en un menor suministro de aire libre, un menor consumo de energía y una menor reducción disponible. Y el aumento en la presión de entrada aumentará la densidad del aire en la entrada del compresor, lo que resulta en un mayor suministro de aire libre, mayor consumo de energía
10 y mayor reducción disponible.

La adición de vapor de agua al aire hace que el aire se humedezca y reduce la densidad del aire. Esto se debe a que la masa molar de agua es menor que la del aire. En consecuencia, un aumento en la humedad relativa reduce el
15 flujo y la potencia, y una disminución en la HR aumentará el flujo y la potencia.

Finalmente, las temperaturas de enfriamiento del agua afectan la entrada de tal manera que el agua más fría aumenta el flujo y la potencia, y el agua más caliente reduce
20 el flujo y la potencia.

Las plantas de PSA/VPsA se diseñan y dimensionan típicamente para cumplir con el requerimiento máximo de producción en condiciones de temperatura ambiente más alta. Sin embargo, las plantas de PSA/VPsA funcionan frecuentemente a una

capacidad de diseño menor debido a los cambios en la demanda del cliente y en las condiciones ambientales, reduciendo la eficiencia de la función de reducción.

Para mejorar la eficiencia energética de la planta
5 cuando la demanda del cliente es menor que la capacidad de diseño, la presente invención propone un nuevo método de reducción por el cual el flujo y la presión de adsorción superior se reducen para lograr un menor consumo de energía por unidad. Con el menor flujo y la menor presión de succión
10 de entrada al compresor del producto, la presión del producto final deseada puede lograrse a través de una o más relaciones de velocidad del motor creciente y presión de etapa creciente con compresor centrífugo de velocidad variable accionado por motor de imán permanente de alta velocidad o por motor de
15 inducción. El proceso y sistema propuestos son beneficiosos para las plantas de PSA/VPsA que usan ya sea compresores de alimentación y/o vacío centrífugos o de tipo Roots, pero se espera la mayoría de los beneficios de las plantas que usan máquinas centrífugas.

20 En una modalidad, la invención reivindicada se relaciona con un método para mejorar la eficiencia energética del sistema de separación de gas adsorbente durante los tiempos de demanda reducida del producto, en donde el sistema comprende:

- a. al menos un recipiente que contiene al menos un lecho de adsorción que comprende al menos un material de adsorción, y
 - b. al menos un compresor,
- 5 en donde el al menos un lecho de adsorción se configura para la presurización y despresurización cíclicas durante el funcionamiento para la separación de componentes de una mezcla de gas de alimentación en al menos un primer componente y un segundo componente mediante la adsorción selectiva de dicho
- 10 primer componente en dicho lecho de adsorción que comprende al menos un adsorbente, dicho método comprende las siguientes etapas de forma cíclica:
- I. aumentar la presión de un gas de alimentación en dicho lecho durante las etapas de adsorción del
 - 15 ciclo a una presión de adsorción que permita la adsorción de dicho primer componente por dicho adsorbente, dicho adsorbente exhibe un coeficiente de transferencia de masa de $\geq 12/s$ y una difusividad intrínseca de N_2 de $3,5 \times 10^{-6} m^2/s$
 - 20 a 1,5 bar (150 kPa) y 300 K,
 - II. despresurizar dicho lecho durante las etapas de desorción de dicho ciclo a una presión de desorción para desorber dicho primer componente de dicho adsorbente, la relación de presiones de

dicha presión de adsorción a dicha presión de desorción en un rango de aproximadamente 1,5 a 6,0;

5 en donde durante tiempos de demanda reducida del producto, dicho método comprende reducir la presión de adsorción superior a un rango de aproximadamente 75 % a 90 % de presión de operación máxima de diseño de dicho al menos un recipiente de adsorción para reducir la capacidad de producción mientras se logra una mayor eficiencia de energía.

10 A partir de la Tabla 1 puede observarse que reducir la presión superior al 90 % de la presión superior operativa del diseño reduce la producción al 80 % de la producción normal. La producción normal se refiere a la producción de oxígeno especificada por contrato del sistema.

15 La presión superior operativa del diseño se define como la presión máxima lograda por cualquier recipiente durante un ciclo para lograr la producción de oxígeno especificada por contrato (dentro de un margen del 5 %) en el consumo de energía especificado por contrato (dentro de un margen del 5 %) durante
20 las condiciones ambiente especificadas por contrato (temperatura $\pm$ 2C ($\pm$ 275,15K), presión $\pm$ 0,05 bar ($\pm$ 5 kPa) , humedad($\pm$ 15 %, etc.). Esto corresponde usualmente al costo de producción de oxígeno más bajo con un conjunto dado de equipos. En esta invención, el beneficio novedoso es que

durante los momentos de consumo reducido, el método reivindicado reduce el consumo relativo de energía del sistema mediante la utilización total del capital del sistema. Los costos operativos son ahora menores con este nuevo método y
5 sustancialmente menores que los métodos tradicionales para operar con reducción de la producción en comparación con el caso del diseño del contrato.

El tiempo de descarga de alimentación es el tiempo que el compresor de alimentación ventila a la atmósfera. La
10 etapa de descarga de alimentación es la etapa donde el compresor de alimentación se ventila a la atmósfera. En el funcionamiento común, los recipientes adsorbentes típicamente se acoplan en una etapa de ecualización en este momento donde el gas de un recipiente se pasa a un segundo recipiente o a un tanque que
15 puede contener el gas.

La relación de presión para el VPSA es 2,3 a 6 con un rango típico de 2,5 a 3,5. La relación de presión para el PSA es de 3 a 8 con un rango típico de 4-6.

En algunas modalidades, al menos un lecho adsorbente
20 está cíclicamente presurizado por al menos un compresor de alimentación y a veces está evacuado por al menos un compresor de vacío, con al menos un compresor de alimentación o el al menos un compresor de vacío siendo un compresor centrífugo accionado por un motor de inducción de alta velocidad asociado

diseñado para una operación de alta velocidad variable. En tales modalidades, el compresor que no es un compresor centrífugo puede ser un soplador de lóbulo giratorio accionado por el motor de inducción.

5 En algunas modalidades de la presente invención, el lecho adsorbente se presuriza cíclicamente mediante al menos un compresor centrífugo de alimentación accionado por un motor de velocidad variable de inducción de alta velocidad asociado y, se evacua mediante al menos un compresor centrífugo de
10 vacío accionado por un motor de velocidad variable de inducción de alta velocidad asociado. Más específicamente y de acuerdo con la presente invención, el o los compresores de alimentación centrífugos y/o compresores de vacío centrífugos son accionados por motores de inducción de alta velocidad de
15 accionamiento directo para operaciones de velocidad variable de tal manera que la o las combinaciones de compresor y motor de inducción de alta velocidad pueden acelerar de baja velocidad a alta velocidad y desacelerar de alta velocidad a baja velocidad en velocidades rápidas requeridas por tiempos
20 de ciclo más cortos de sistemas y procesos actuales de PSA o VPSA.

El uso de motores de inducción o imanes permanentes de alta velocidad controlados a velocidad variable permite una mejora del orden de magnitud sobre los sistemas convencionales

de motor/caja de engranajes de inducción de baja velocidad en su capacidad de acelerar y ralentizar el compresor centrífugo en un proceso de PSA o VPSA. El uso de motores de alta velocidad permite la eliminación de la necesidad de cajas de engranajes y, por lo tanto, permite igualmente la eliminación de la necesidad de sistemas de aceite lubricante. Por lo tanto, el o los compresores centrífugos pueden estar sostenido en soportes libres de aceite. Además, en algunas modalidades, se espera que los sistemas de accionamiento propuestos de la presente invención sean más eficientes por más de 7 puntos porcentuales con la eliminación de pérdidas de fricción de aceite de engranaje y soportes, pérdidas del sistema de aceite lubricante y una capacidad mejorada para impulsar/retrasar la energía.

Para lograr la alta eficiencia de los compresores centrífugos, es esencial que los compresores funcionen a lo largo de una línea de máxima eficiencia. La línea de eficiencia máxima es una línea dibujada en un mapa de rendimiento del compresor. Como se describe en la presente descripción, un mapa de rendimiento del compresor (relación de presión en comparación con flujo de masa a varias velocidades) se genera a partir del coeficiente de trabajo isentrópico en varias velocidades para una temperatura de entrada específica al compresor. La línea de máxima eficiencia representa los locus de puntos que corresponden a

todos los puntos de máxima eficiencia de las curvas de operación del compresor en diferentes velocidades. Al operar a lo largo de la línea de máxima eficiencia, el o los compresores pueden operarse en su modo más eficiente en
5 términos de consumo de energía.

El o los mapas de rendimiento también pueden tener forma de tablas de búsqueda o de referencia generadas a partir del coeficiente de trabajo isentrópico. Los mapas de rendimiento y las líneas de mejor eficiencia resultantes
10 pueden almacenarse en un controlador lógico programable (PLC, por sus siglas en inglés) e integrarse con los sistemas de PSA y/o VPSA.

Si bien no debe interpretarse como limitante, la presente invención se implementa en procesos de adsorción de
15 PSA o VPSA que separan gases, tales como aire en oxígeno y nitrógeno. Otros procesos de separación de gases que pueden beneficiarse del uso de la presente invención incluyen, pero no se limitan a, separaciones de PSA y/o VPSA que implican la recuperación de gases tales como O_2 , N_2 , CO_2 , H_2 o He.

20 Una planta de VPSA tiene típicamente 3 piezas de equipo giratorio como se ilustra en la Figura 1. Una máquina de alimentación (22) proporciona aire a la planta. El aire se separa para producir oxígeno. Una máquina de vacío (50) elimina el nitrógeno residual de la planta. Un compresor de producto

(73) aumenta la presión de oxígeno de la planta a la presión de suministro deseada por los clientes. Típicamente, las máquinas de alimentación y vacío son sopladores rotatorios tipo Roots. Estas máquinas funcionan a velocidad fija y la capacidad de flujo no puede cambiarse una vez instaladas. Por lo tanto, una vez que se diseña y construye un VPSA, no puede aumentarse la cantidad de oxígeno producido. Típicamente, para la compresión de una sola etapa, el compresor de producto es un compresor alternativo o un compresor centrífugo de velocidad fija. Al igual que las máquinas tradicionales de alimentación y vacío, los compresores de producto tradicionales, una vez seleccionados e instalados, no pueden ajustarse para aumentar la capacidad de oxígeno. Si se necesita menos producto de oxígeno, el compresor funcionará en modo de recirculación a través de la línea de recirculación (77) junto con las válvulas de control de recirculación (75,76), y la máquina consumirá la misma cantidad de energía que si produjera el 100 % de la capacidad. En otras palabras, la capacidad de reducción no producirá ningún ahorro de energía del compresor del producto.

Las plantas de VPSA se diseñan convencionalmente para satisfacer los requisitos máximos de producción aunque los clientes requieren frecuentemente una menor cantidad de producción de oxígeno la mayor parte del tiempo. En consecuencia, las plantas de VPSA operan rutinariamente en

modo de reducción. El tener un método de reducción energéticamente eficiente permite que la planta de VPSA logre una alta eficiencia energética sobre la ventana operativa de la planta y reduzca el costo energético.

5 La operación típica de reducción de la planta de VPSA se logra mediante la ejecución intermitente de la planta al extender cierto tiempo de la etapa de ciclo sin cambiar el rango de flujo de alimentación, presión de adsorción y desorción. Este modo de operación tiene una unidad de energía
10 inherentemente más alta dado que el motor y el compresor siguen funcionando mientras el sistema no está produciendo el producto. Las alternativas son apagar el motor y el compresor cuando la planta no está en funcionamiento; sin embargo, esto no se practica ni se prefiere debido al control
15 de la máquina y al desgaste producido por encendidos y apagados frecuentes debido a las etapas cortas de ciclo de VPSA.

 La reducción convencional del VPSA se logra mediante la alimentación de la misma cantidad de flujo y la
20 extensión del tiempo del ciclo. Si el objetivo es producir 80 % del producto de oxígeno, puede usarse el método convencional de reducción de VPSA simplemente extendiendo el tiempo del ciclo mientras se mantiene igual el flujo de alimentación y la presión superior, el consumo de energía y

la recuperación de oxígeno de la reducción son menores que la producción normal. En otras palabras, el desempeño de la reducción no es tan eficiente como si la planta produjera una producción del 100 %.

5 Un método mejorado con mayor eficiencia energética para producir, como un ejemplo, un 80 % del producto de oxígeno es reducir la presión de adsorción en la parte superior. Un experto en la técnica esperaría típicamente que la presión superior baja produzca resultados negativos en el
10 rendimiento de VPSA, ya que la capacidad de adsorción se reduce a una menor presión de adsorción superior. Para compensar la menor capacidad de adsorción a partir de la menor presión superior, debe aumentarse el flujo de alimentación y acortarse el ciclo, ambos contribuirían al
15 impacto negativo de la recuperación. Sin embargo, el beneficio de ahorro de energía de la menor presión superior sorprendentemente supera los impactos negativos de la caída de recuperación desde el mayor flujo de alimentación y el ciclo más corto.

20 Una mejora adicional para el método de reducción es proporcionar un menor flujo de alimentación y reducir la presión superior para aprovechar la velocidad de alimentación reducida al recipiente adsorbente para maximizar la recuperación. La menor presión superior desde el recipiente

adsorbente se traduce en la menor presión de succión del compresor de producto de oxígeno. Al usar del compresor de producto centrífugo de alta velocidad variable de accionamiento directo, puede acelerarse el motor para
5 aumentar la relación de presión del compresor, logrando por lo tanto la misma presión del producto como si la presión de succión se mantuviera en el mismo nivel.

En un sistema de VPSA, la presión superior del recipiente adsorbente puede reducirse mientras se mantiene el
10 control sobre la velocidad de flujo del producto al reducir la restricción de presión en el sistema. Esto puede lograrse aumentando además la apertura de la válvula de control de producto 68 (en todo momento), la válvula 62/64 (durante la elaboración del producto del lecho correspondiente) o
15 adicionalmente la válvula 60 (durante la elaboración del producto). Esto incrementará inherentemente la velocidad de flujo que puede equilibrarse mediante el aumento del tiempo de descarga de alimentación. Esto puede realizarse al disminuir la adsorción total/tiempo de las etapas de
20 elaboración del producto o al aumentar el tiempo de las etapas de descarga de alimentación. Aumentar el tiempo de la etapa de descarga de alimentación tiene el efecto secundario de disminuir la presión de vacío, lo que puede ser deseable en algunas situaciones donde el sistema puede funcionar de manera

más eficiente. Esta es específica de una planta y se evalúa caso por caso, ya que puede verse afectada por las características adsorbentes, el procedimiento de carga, la construcción del recipiente, la distribución de tuberías de plantas, etc. Si se usa un compresor centrífugo de producto, esta velocidad de la máquina de producto puede aumentarse para permitir una menor presión de succión. Esto puede usarse en combinación con o antes de cambiar la restricción de presión en las válvulas 68, 62/64 o 60. Aún será necesario equilibrar la velocidad de flujo mediante el ajuste del tiempo de descarga de alimentación.

El ajuste adicional de la presión superior y la velocidad de flujo puede lograrse si los compresores de alimentación/vacío de VPSA son variables, un ejemplo es un compresor centrífugo con un accionador de frecuencia variable. En estos casos, el o los compresores pueden ralentizarse para producir una menor relación de presión mientras se mantiene una velocidad de flujo constante. Para equilibrar la menor presión superior, aún debe ajustarse cualquiera de las válvulas 68, 62/64 o 60 o un compresor centrífugo de producto o alguna combinación de estos. Pero la sincronización del ciclo no necesita cambiar para equilibrar la velocidad de flujo a medida que la máquina ya está ajustando la velocidad de flujo. Los ajustes en un

sistema de PSA son sustancialmente los mismos con la excepción de que un sistema de PSA no tiene un compresor al vacío.

El ajuste adicional de la presión superior y la
5 velocidad de flujo puede lograrse si los compresores de alimentación/vacío de VPSA son variables, un ejemplo es un compresor centrífugo con un accionador de frecuencia variable. En estos casos, el o los compresores pueden ralentizarse para producir una menor relación de presión mientras se mantiene una
10 velocidad de flujo constante.

Si se usa un compresor centrífugo de producto, esta velocidad de máquina de producto puede aumentarse para permitir una menor presión de succión. Esto puede usarse en combinación con o antes de cambiar la restricción de presión en las válvulas
15 68, 62/64 o 60 que se muestran en la Figura 1. Aún será necesario equilibrar la velocidad de flujo mediante el ajuste del tiempo de descarga de alimentación.

El nuevo método de reducción propuesto logra una reducción significativa del consumo de energía sobre el
20 método convencional de reducción del flujo de alimentación constante como se ilustra en los resultados de la simulación en la Tabla 1.

Tabla 1. Sumario del rendimiento de VPSA de los métodos de reducción:

Métodos de reducción	Flujo de alimentación	Producción	Presión superior	Unidad de energía	Tiempo de ciclo	Recuperación
	Aire	Oxígeno		KW/MTPD 02	S	
VPSA	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
VPSA - TD tradicional	100 %	80 %	100 %	110 %	140 %	96 %
VPSA - TD nuevo P superior menor, mayor F de alimentación	110 %	80 %	90 %	95 %	70 %	90 %
VPSA - TD nuevo P superior menor, menor F de alimentación	75 %	80 %	90 %	85 %	100 %	105 %

5 La invención puede implementarse en un sistema de adsorción por oscilación de presión (vacío) con diversos ciclos de PSA/VSA/VPSA. Un sistema de adsorción por oscilación de presión separa los componentes de una mezcla de gases de alimentación en al menos un primer componente y

10 un segundo componente mediante la adsorción selectiva de dicho primer componente en un lecho de adsorbente. El ciclo de adsorción por oscilación de presión consiste en las etapas básicas de elevar la presión del gas de alimentación durante las etapas de adsorción a una presión superior de adsorción

para permitir la adsorción del primer componente, despresurizando dicho lecho durante las etapas de desorción a una presión de desorción.

La presión baja deseada es $>$ que aproximadamente 5 0,1 atm (10,1325 kPa) y la presión alta deseada es $<$ que aproximadamente 100 atm (10132,5 kPa). En otra modalidad, la presión baja en el ciclo es $\geq$ 0,3 atm (30,3975 kPa) y la presión alta en el ciclo que es $\leq$ 6 atm (607,95 kPa).

Una relación de presiones de dicha presión de 10 adsorción a dicha presión de desorción para VPSA de oxígeno mencionada en esta invención es típicamente menor que 6,0, en una modalidad que varía de aproximadamente 1,5 a aproximadamente 6, en otra modalidad, de aproximadamente 1,5 a aproximadamente 3,5.

15 Los sistemas de PSA/VPSA que propone el método de reducción como beneficiosos pueden comprender un único lecho de adsorción, dos lechos de adsorción en un único tren, en donde un lecho de adsorción está en modo de alimentación mientras que el otro lecho de adsorción está en modo de 20 regeneración, o múltiples lechos de adsorción más allá de dos lechos.

En el proceso de la invención puede usarse una variedad de adsorbentes. En una modalidad, puede usarse un adsorbente LiX. En otra modalidad, puede usarse una zeolita

tipo X con una relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ menor o igual a 2,5 e intercambiada con Li (>70 %), cualquier tipo de faujasita con cualquier catión de Li, Ca, Na, K o configuración de catión mezclada. Esta invención funciona con un alto índice de
5 adsorbentes definidos como un coeficiente de transferencia de masa de $\geq 12/\text{s}$ y una difusividad intrínseca de $\text{N}_2 \geq 3,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ a 1,5 bar(150 kPa) y 300 K.

El porcentaje de mejora de energía se verá afectado por la configuración del sistema base y el adsorbente
10 referenciado, y las eficiencias de la máquina de compresión. Los resultados de simulaciones anteriores son ilustrativos de la invención usando el adsorbente LiX que exhibe un coeficiente de transferencia de masa de $\geq 12/\text{s}$ y una difusividad intrínseca de N_2 de $\geq 3,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ a 1,5 bar(150
15 kPa) y 300 K para lograr el producto de oxígeno del suministro de aire.

Los expertos en la técnica podrán idear diversas alternativas y modificaciones sin apartarse de la invención. En consecuencia, la presente invención pretende abarcar todas
20 estas alternativas, modificaciones y variaciones que estén dentro del alcance de las reivindicaciones anexas.

Con la menor presión superior del recipiente adsorbente, la presión de succión al compresor del producto será menor que si la VPSA usa los métodos convencionales de

alimentación constante y presión de adsorción superior constante.

Con la presión de succión de entrada y menor flujo en el compresor del producto, la presión final deseada puede
5 lograrse a través de una mayor velocidad del motor y una mayor relación de presión de etapa. Para el compresor centrífugo de producto con motor de alta velocidad y VFD, el compresor opera en el punto de diseño del compresor (presión, flujo y velocidad). puede aumentarse el flujo desde esta
10 máquina al aumentar la velocidad mientras se mantiene la misma presión de salida.

La Figura 2 muestra un mapa de compresor para un compresor de producto de oxígeno. El punto de diseño para el compresor se muestra en el mapa. El punto de diseño incluye
15 un flujo, relación de presión, y velocidad a la que se diseña la rueda para operar para satisfacer los requerimientos del proceso. Para compresores típicos que usan motor de velocidad fija y caja de engranajes, el compresor funciona en o cerca de este punto de diseño. Para el accionamiento de compresores
20 por motores de alta velocidad y VFD como se describe en la patente, el compresor puede operar sobre todo el mapa. El compresor también puede funcionar con un flujo más alto en el mismo cabezal al aumentar la velocidad del motor. Esto proporciona la flexibilidad para diseñar un compresor para

un cierto flujo y presión, pero funciona a un mayor flujo si cambian los requerimientos de producción.

Para un compresor centrífugo con motor de alta velocidad y VFD, el compresor puede acelerar con flujo más bajo para aumentar la relación de presión y lograr la mayor presión final deseada. Este concepto se muestra en la Figura 2. Al 80 % de flujo, el compresor con 90 % de velocidad puede suministrar una relación de presión de 1,85. Si la velocidad del compresor aumenta hasta 110 %, la relación de presión puede aumentar hasta 2,22. Al aumentar la relación de presión a través de la velocidad creciente del motor, puede lograrse la presión del producto final. Este método de reducción de la relación de presión creciente a un menor flujo es fundamentalmente más energéticamente eficiente que el método tradicional de reducción de la parte de recirculación del producto.

Para un compresor centrífugo de alta velocidad de accionamiento directo de una sola etapa, el rango de la reducción puede extenderse a través de la combinación de velocidad variable del compresor y flujo variable de recirculación para abordar el flujo reducido de alimentación y la menor presión de succión.

El rango de reducción puede extenderse mediante el uso de álabe guía de entrada y ángulos variables del álabe guía de entrada.

El método descrito a su vez para aumentar la velocidad
5 del motor y aumentar la relación de presión de la etapa del compresor puede extenderse a compresores con múltiples etapas con un rango adicional de funcionamiento extendido.

Con un menor flujo de alimentación y una menor presión de succión, puede reducirse la relación de presión de la primera
10 etapa, aumentar las relaciones de presión para las segundas y/o terceras etapas para lograr la presión final deseada. El cambio en la relación de presión puede lograrse a través de velocidades variables del compresor a través de un motor de alta velocidad de accionamiento directo.

15