

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 711 552**

51 Int. Cl.:

F04D 27/02 (2006.01)

B01D 53/047 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **08.05.2013 PCT/US2013/040129**

87 Fecha y número de publicación internacional: **05.12.2013 WO13180919**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.05.2013 E 13724110 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.01.2019 EP 2855941**

54 Título: **Control de velocidad anti-sobrecarga de un compresor en un aparato VPSA**

30 Prioridad:

31.05.2012 US 201213484846
07.05.2013 US 201313888943

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
06.05.2019

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

ROSINSKI, ANDREW, C.;
BELANGER, PAUL, W. y
MANNING, MICHAEL, S.

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

ES 2 711 552 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

Control de velocidad anti-sobrecarga de un compresor en un aparato VPSA

5 **Campo de la invención**

La presente invención proporciona un procedimiento y un sistema de control para controlar la velocidad de un compresor centrífugo que opera dentro de un aparato de adsorción por cambio de presión al vacío y que se acciona directamente por un motor eléctrico para evitar que el compresor entre en sobrecarga. Más particularmente, la presente invención se refiere a un procedimiento y un sistema de este tipo en los que la velocidad aumenta durante al menos las etapas de un ciclo repetitivo realizado por el aparato de adsorción por cambio de presión al vacío donde el compresor puede encontrar una sobrecarga y en cantidades de aumento que varían de acuerdo con las etapas que se están realizando.

15 **Antecedentes de la invención**

En un proceso de adsorción por cambio de presión al vacío, se usan uno o más adsorbentes para adsorber uno o más componentes de una corriente de alimentación y, por lo tanto, producir una corriente de producto purificada. Un proceso típico tiene una serie de etapas ejecutadas continuamente de acuerdo con un ciclo de repetición. En el ciclo de repetición, un lecho adsorbente que contiene el adsorbente se usa alternativamente para producir el producto purificado y después se regenera. Durante la regeneración, los componentes adsorbidos se desorben del adsorbente y, después, el lecho adsorbente se devuelve al estado en el que se puede volver a poner en línea y producir el producto.

En un proceso de adsorción por cambio de presión al vacío típico diseñado para producir oxígeno de producto a partir del aire de alimentación, un lecho adsorbente se somete a un proceso de siete etapas realizado en el ciclo de repetición. Solo con fines ilustrativos, este proceso de adsorción se puede realizar con un lecho. En una primera etapa, el lecho se presuriza simultáneamente desde la parte inferior con aire de alimentación y desde la parte superior con el gas de ecualización suministrado desde un tanque de recuperación. Posteriormente, se añade producto de alta pureza a la parte superior del lecho desde el tanque de sobrecarga de oxígeno, mientras que el aire de alimentación es suministrado por un compresor u otro soplador, tal como un soplador tipo Roots. En una tercera etapa, el lecho continúa presurizado desde la parte inferior a través del soplador. Ahora el lecho está listo para hacer que el producto y el aire de alimentación se introduzcan en la parte inferior del recipiente y el producto se retire de la parte superior. El gas del producto se entrega al tanque de sobrecarga de oxígeno. Una vez finalizada la producción, el soplador se descarga y el gas de menor pureza que queda en la parte superior del lecho presurizado se transfiere al tanque de recuperación. En una etapa de evacuación posterior, el nitrógeno residual se elimina de la parte inferior del recipiente a través del compresor centrífugo mientras no haya flujo que salga o entre por la parte superior del recipiente. En la última etapa, el compresor centrífugo continúa eliminando el nitrógeno de la parte inferior del recipiente mientras se añade gas de purga de oxígeno a la parte superior del recipiente. La presión permanece relativamente constante durante esta etapa debido al hecho de que el flujo de purga de oxígeno se controla igual al flujo de evacuación. Como se sabría en la técnica, tal proceso podría realizarse en múltiples lechos en los que cada lecho se somete a las etapas descritas anteriormente.

Como se divulga en el documento U.S. 7.785.405, los compresores centrífugos accionados directamente por motores de imán permanente de alta velocidad de accionamiento directo se han utilizado ventajosamente en los procesos de adsorción por cambio de presión al vacío. El uso de dichos motores permite el funcionamiento a velocidad variable, de modo que las combinaciones del compresor y la combinación o combinaciones de motor de imán permanente de alta velocidad pueden acelerar de baja velocidad a alta velocidad y desacelerar de alta velocidad a baja velocidad rápidamente, según sea necesario por el proceso. Se ha encontrado que esto ofrece una mejora importante con respecto al uso de compresores centrífugos accionados por sistemas convencionales de motores de inducción/caja de cambios que, debido a la alta inercia del motor de inducción, no pueden acelerar y desacelerar rápidamente. Al variar continuamente las velocidades del compresor para que coincidan con el requisito de relación de presión para el compresor, que varía debido a los lechos de adsorbentes de presurización y evacuación, el compresor centrífugo utilizado en dicho ciclo puede operarse cerca de, y preferiblemente a, su eficiencia máxima del 100 % de velocidad de diseño a una velocidad sustancialmente menor.

Los compresores están diseñados para funcionar dentro de una envolvente operativa que se puede representar en lo que se conoce como un mapa del compresor de la relación de presión entre la presión de salida y la presión de entrada frente al caudal a través del compresor. En tal gráfica, se representa una línea operativa pico o de mejor eficiencia en la que para una relación de caudal y presión dada, el consumo de energía del compresor es mínimo. Este mapa del

compresor se puede programar dentro de un controlador utilizado para controlar la velocidad del motor y, por lo tanto, del compresor. Dependiendo de la etapa específica en el proceso de adsorción por cambio de presión al vacío, que requeriría una relación de presión específica a través del compresor centrífugo, el controlador envía una señal que puede referirse a la velocidad óptima según se determina del mapa del compresor a un variador de velocidad variable
5 que controla la velocidad del motor de imán permanente de alta velocidad.

Sin embargo, hay situaciones que pueden hacer que el compresor salga de la línea operativa de máxima eficiencia y se convierta en una condición de sobrecarga. Por ejemplo, puede haber un retraso en el sistema de control, etapas de transición en el proceso que se realizan por el aparato de adsorción por cambio de presión al vacío, cambios en
10 las condiciones ambientales y la transición fuera de la línea de velocidad mínima. En todas estas situaciones, el flujo de masa que se comprime puede descender para una relación de velocidad y presión dada para accionar el compresor en sobrecarga. Por lo tanto, se produce un evento de sobrecarga debido a que el caudal a través del compresor cae por debajo del flujo mínimo requerido a una velocidad dada del impulsor del compresor que es necesario para mantener una operación estable. En un evento de sobrecarga, la presión de cabeza desarrollada por el compresor
15 disminuye, lo que provoca un gradiente de presión inversa en la descarga del compresor y un reflujo de gas resultante. Una vez que la presión en la línea de descarga del compresor cae por debajo de la presión desarrollada por el impulsor, el flujo se invierte una vez más. Se ha encontrado que este patrón de flujo alterno es una condición inestable que puede provocar daños graves en el impulsor del compresor, el mecanismo de accionamiento y los componentes. Esta condición debe evitarse.

20 En los ciclos de repetición empleados en el aparato de adsorción por cambio de presión al vacío, las condiciones operativas de la compresión a las que puede producirse una sobrecarga serán más críticas a altas velocidades. Además, durante las etapas de evacuación y de purga, y particularmente durante la transición entre las etapas de purga y evacuación, puede tener lugar una sobrecarga de manera bastante inesperada. Como se analizará, la
25 presente invención proporciona un control de velocidad que está particularmente diseñado para evitar la sobrecarga durante la operación a baja velocidad y durante las etapas de evacuación y purga y la transición entre tales etapas.

Resumen de la invención

30 La presente invención proporciona un procedimiento para controlar la velocidad de un compresor centrífugo que funciona dentro de un aparato de adsorción por cambio de presión al vacío. El compresor centrífugo se acciona directamente por un motor eléctrico controlado por un variador de frecuencia variable. A este respecto, el término "motor eléctrico" como se usa en el presente documento y en las reivindicaciones, significa un motor de imán permanente de alta velocidad o un motor de inducción de alta velocidad. En relación con dicho procedimiento, se mide
35 y se calcula un parámetro que puede referirse a un caudal de gas que entra en el compresor centrífugo. La relación de presión de la presión de salida a entrada del compresor también se mide y se calcula. Una velocidad óptima del compresor centrífugo se determina la relación de presión y que se encuentra a lo largo de la línea operativa de eficiencia máxima del compresor centrífugo. Además, también se determina un valor mínimo permisible del parámetro en el cual es probable que el compresor centrífugo entre en condiciones de sobrecarga a la velocidad óptima. Un
40 multiplicador de retroalimentación se determina que cuando se multiplica por la velocidad óptima aumentará la velocidad cuando el parámetro sea menor que el valor mínimo permisible o reducirá la velocidad cuando el parámetro sea mayor o igual al valor mínimo permisible.

Durante las etapas de un ciclo de repetición conducido por el aparato de adsorción por cambio al vacío donde el
45 compresor centrífugo tiene al menos probabilidades de encontrar condiciones de sobrecarga, que no sean una etapa de evacuación pura y una etapa de evacuación con purga de producto de la misma, un multiplicador de velocidad total se ajusta igual al multiplicador de retroalimentación. Durante la etapa de evacuación pura y la etapa de evacuación con purga de producto, el multiplicador de velocidad total se calcula multiplicando el multiplicador de retroalimentación por un multiplicador de alimentación positiva que aumentará la velocidad durante la etapa de evacuación y la etapa
50 de evacuación con etapa de purga de manera que no es probable que el compresor centrífugo entre en las condiciones de sobrecarga. Una velocidad ajustada se calcula en ese momento multiplicando la velocidad óptima por el multiplicador de velocidad total. Una señal de control atribuible al menos a la velocidad ajustada se genera y se introduce en el variador de frecuencia variable de modo que el motor eléctrico y, por lo tanto, los compresores centrífugos operen a la velocidad ajustada. Debe observarse que, como se usa en el presente documento y en las
55 reivindicaciones, el término "etapa de evacuación pura" significa una etapa del proceso de adsorción por cambio de presión al vacío en el que se evacua un lecho adsorbente de la parte inferior del lecho de adsorción y se ajustan las válvulas de modo que no se introduzca gas en el lecho adsorbente ni se libere desde la parte superior del lecho de adsorción. Además, como se usa en el presente documento y en las reivindicaciones, el término "etapa de evacuación con purga de producto" significa una etapa del proceso de adsorción por cambio de presión al vacío en el que un lecho
60 adsorbente se somete a evacuación en la parte inferior del lecho de adsorción y la introducción de gas producto, por

ejemplo oxígeno, en la parte superior del lecho.

El procedimiento y el sistema de control de velocidad anti-sobrecarga como se ha analizado anteriormente y se expone en las reivindicaciones es igualmente aplicable a un aparato en el que un solo compresor sirve para alimentar gas comprimido a un lecho de adsorción y evacuar un lecho de adsorción durante la regeneración del mismo, o donde se usa un compresor de alimentación para alimentar gas comprimido a los lechos de adsorción del aparato y se usa un compresor de evacuación para evacuar los gases de los lechos de adsorción. En este sentido, cuando se usa un compresor de evacuación, será un compresor centrífugo que utiliza la estrategia anterior de control anti-sobrecarga. El compresor de alimentación no puede ser en tal aparato un compresor centrífugo y, como tal, no se someterá a dicho control anti-sobrecarga. Como se analizará, cuando el compresor de alimentación es un compresor centrífugo, se pueden usar elementos del control de velocidad anti-sobrecarga para el control del mismo.

Se entiende que, en términos generales, la presente invención contempla que el multiplicador de velocidad total se ajusta igual al multiplicador de retroalimentación donde el compresor centrífugo es al menos probable que encuentre condiciones de sobrecarga, distintas de la etapa de evacuación pura y la etapa de evacuación con purga de producto del mismo. La presente invención contempla específicamente, en puntos dentro del ciclo de repetición donde es improbable que se produzcan condiciones de sobrecarga, la señal de control que se introduce en el variador de frecuencia variable tendrá el efecto de eliminar la energía del motor eléctrico. En este sentido, el proceso de adsorción por cambio de presión al vacío puede usar un solo compresor para alimentar gas comprimido a un lecho adsorbente y evacuar los gases del lecho adsorbente. En tal caso, el ciclo de repetición puede incluir una etapa de alimentación con ecualización posterior a la etapa de evacuación con purga de producto, una etapa de alimentación con represurización de producto después de la etapa de alimentación con ecualización y una etapa de ecualización antes de la etapa de evacuación pura. Durante la etapa de alimentación con ecualización, la etapa de ecualización y el inicio de la etapa de alimentación con represurización de producto, la señal de control puede hacer referencia a una velocidad no operativa, de modo que cuando la señal de control se ingresa en el variador de frecuencia variable, no se aplica energía eléctrica al motor eléctrico. Sin embargo, cuando se obtiene una relación de presión predeterminada de la relación de presión durante la etapa de alimentación con represurización de producto, la señal de control se puede referir de nuevo a la velocidad ajustada de modo que el motor eléctrico y, por lo tanto, el compresor funcione a la velocidad ajustada. Debe observarse, sin embargo, que la presente invención también contempla y pretende incluir dentro de las reivindicaciones adjuntas una realización en la que en etapas del ciclo de repetición, distintas de la etapa de evacuación pura y la etapa de evacuación con purga de producto, el multiplicador de velocidad siempre se ajusta igual al multiplicador de retroalimentación y la señal de control siempre puede referirse a la velocidad ajustada. Además, en un aparato de lecho adsorbente múltiple que usa compresores de evacuación y alimentación dedicados, el ciclo de repetición puede incluir una etapa de ecualización de presión descendente y una etapa de ecualización de presión ascendente posterior a la etapa de evacuación con purga de producto. Durante la etapa de ecualización de presión descendente y la etapa de ecualización de presión ascendente, la señal de control puede referirse a una velocidad no operativa, de manera que no se aplica potencia eléctrica al motor eléctrico que acciona el compresor de evacuación. Cuando se obtiene una relación de presión predeterminada durante la etapa de ecualización de presión descendente, la señal de control puede ajustarse de nuevo atribuible a la velocidad ajustada, de manera que el compresor de evacuación funcione a la velocidad ajustada.

Cada vez que se determina el multiplicador de retroalimentación, se puede almacenar el multiplicador de retroalimentación. Cuando el parámetro es menor que el valor mínimo permisible, el multiplicador de retroalimentación se determina añadiendo a un último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación un factor de corrección de velocidad. Cuando el parámetro es mayor o igual al valor mínimo permisible, el multiplicador de velocidad de retroalimentación se calcula dividiendo el último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación por una constante de proporcionalidad. La constante de proporcionalidad se ajusta igual a un valor mayor de 1,0 cuando el último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación es mayor o igual a 1,0 o 1,0 cuando el último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación es menor de 1,0.

El multiplicador de alimentación positiva puede ser una función de la relación de presión. La función puede tener un valor máximo del multiplicador de alimentación positiva a una relación de presión predeterminada a la cual o directamente antes de la cual el compresor centrífugo entra en condiciones de sobrecarga durante una transición entre la etapa de evacuación y la etapa de purga. La función tendrá valores decrecientes del multiplicador de alimentación positiva en relaciones de presión mayores o menores que el valor máximo. El valor máximo tiene una magnitud preseleccionada de modo que cuando el valor máximo se multiplica por la velocidad óptima a la relación de presión predeterminada, la velocidad resultante evitará que el compresor centrífugo entre en condiciones de sobrecarga. La función puede ser una función gaussiana.

El parámetro puede ser una diferencia de presión medida en dos puntos en la envoltura del compresor centrífugo

que están sucesivamente más cerca de un impulsor del mismo. Durante cada uno de los intervalos de tiempo, se calcula y almacena un error de diferencia de presión restando el valor mínimo permisible del valor actual de la diferencia de presión. El factor de corrección de velocidad del multiplicador de retroalimentación se calcula durante cada uno de los intervalos de tiempo a través del control integral proporcional que comprende añadir un término proporcional a un término integral, estando el término proporcional calculado multiplicando un factor de ganancia por una diferencia entre el error de diferencia de presión y un error de diferencia de presión anterior calculado en un intervalo de tiempo anterior y dividiendo la diferencia por el intervalo de tiempo. El término integral se calcula dividiendo el factor de ganancia por un tiempo de restablecimiento integral y multiplicando un cociente resultante del mismo por el error de diferencia de presión.

10

La presente invención también proporciona un sistema de control para controlar la velocidad de un compresor centrífugo que funciona dentro de un aparato de adsorción por cambio de presión al vacío y se acciona directamente por un motor eléctrico controlado por un variador de frecuencia variable. El sistema de control está dotado de medios para detectar un parámetro atribuible a un caudal de gas que entra en el compresor centrífugo. Los transductores de presión están posicionados para detectar la presión en una entrada y una salida del compresor centrífugo.

15

Se proporciona un controlador que responde a los medios de detección de parámetros, los transductores de presión y las etapas de un ciclo de repetición realizado por el aparato de adsorción por cambio de presión al vacío. El controlador tiene un programa de control que está programado para calcular una relación de presión de las presiones de la salida a la entrada del compresor centrífugo. El programa de control también determina una velocidad óptima del compresor centrífugo basándose en la relación de presión y que se encuentra a lo largo de la línea operativa de eficiencia máxima del compresor centrífugo. El controlador determina un valor mínimo permisible del parámetro al que es probable que el compresor centrífugo entre en condiciones de sobrecarga a la velocidad óptima junto con un multiplicador de retroalimentación que cuando se multiplica por la velocidad óptima aumentará la velocidad cuando el parámetro sea menor que el valor mínimo permisible o reducirá la velocidad cuando el parámetro sea mayor o igual al valor mínimo permisible. Un multiplicador de velocidad total se ajusta igual al multiplicador de retroalimentación durante las etapas del ciclo de repetición donde es al menos probable que el compresor centrífugo entre en condiciones de sobrecarga, diferentes a una etapa de evacuación pura y una etapa de purga de producto del mismo. El multiplicador de velocidad total se ajusta igual a un producto matemático del multiplicador de retroalimentación y un multiplicador de alimentación positiva durante la etapa de evacuación pura y la etapa de evacuación con purga de producto, que aumentará la velocidad de tal manera que es probable que el compresor centrífugo no entre en las condiciones de sobrecarga. Una velocidad ajustada se calcula multiplicando la velocidad óptima por el multiplicador de velocidad total.

20

25

30

35

El controlador está configurado para generar una señal de control en respuesta al programa de control y puede servir como una entrada en el variador de frecuencia variable de tal forma que la velocidad del motor eléctrico y, por lo tanto, el compresor centrífugo, se controla en respuesta a la señal de control. La señal de control se refiere al menos a la velocidad ajustada, de manera que el motor eléctrico y, por lo tanto, el compresor centrífugo funciona a la velocidad ajustada.

40

Como se ha indicado anteriormente, el sistema es aplicable a un aparato de adsorción por cambio de presión al vacío que utiliza un compresor de alimentación para alimentar gas comprimido a los lechos de adsorción del aparato de adsorción por cambio de presión al vacío y un compresor de evacuación usado en la evacuación de gases de los lechos de adsorción. En tal caso, el compresor de evacuación está formado por el compresor centrífugo. Otro compresor centrífugo puede o no usarse para formar el compresor de alimentación.

45

El aparato de adsorción por cambio de presión al vacío puede utilizar un solo compresor para alimentar gas comprimido a un lecho adsorbente y para evacuar los gases del lecho adsorbente. En tal caso, el ciclo de repetición puede incluir una etapa de alimentación con ecualización posterior a la etapa de evacuación con purga de producto, una etapa de alimentación con represurización de producto después de la etapa de alimentación con ecualización y una etapa de ecualización antes de la etapa de evacuación pura. El programa de control puede estar programado para producir una velocidad no operativa a la cual el variador de frecuencia variable eliminará la energía eléctrica del motor eléctrico y la señal de control se puede referir a la velocidad no operativa cuando es producida por el programa de control. Durante la etapa de alimentación con ecualización, la etapa de ecualización y el inicio de la etapa de alimentación con represurización de producto, el programa de control produce la velocidad no operativa, de modo que cuando la señal de control se ingresa en el variador de frecuencia variable, no se aplica energía eléctrica al motor eléctrico. El programa de control también está programado de tal forma que, cuando se obtiene una relación de presión predeterminada de la relación de presión durante la etapa de alimentación con represurización de producto, la señal de control se puede referir de nuevo a la velocidad ajustada de modo que el motor eléctrico y, por lo tanto, el compresor funcione a la velocidad ajustada. En el caso de un aparato de adsorción por cambio de presión al vacío que utiliza un

50

55

60

compresor de evacuación dedicado, el ciclo de repetición puede incluir una etapa de ecualización de presión descendente y una etapa de ecualización de presión ascendente posterior a la etapa de evacuación con purga de producto. El programa de control en tal caso está programado para producir una velocidad no operativa a la cual el variador de frecuencia variable eliminará la energía eléctrica del motor eléctrico y la señal de control se puede referir a la velocidad no operativa cuando es producida por el programa de control. Durante la etapa de ecualización de presión descendente y la etapa de ecualización de presión ascendente, el programa de control produce una velocidad no operativa tal que cuando la señal de control ingresa en el variador de frecuencia variable, no se aplica energía eléctrica al motor eléctrico que acciona el compresor de evacuación. El programa de control también está programado de tal forma que, cuando se obtiene una relación de presión predeterminada de la relación de presión durante la etapa de ecualización de presión descendente, la señal de control se puede referir de nuevo a la velocidad ajustada de modo que el motor eléctrico y, por lo tanto, el compresor de evacuación funcione a la velocidad ajustada.

El programa de control puede programarse de tal manera que cada vez que se determina el multiplicador de retroalimentación, se almacena el multiplicador de retroalimentación. De acuerdo con dicha programación, cuando el parámetro es menor que el valor mínimo permisible, el multiplicador de retroalimentación se determina añadiendo a un último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación un factor de corrección de velocidad. Cuando el parámetro es mayor o igual al valor mínimo permisible, el multiplicador de velocidad de retroalimentación se determina dividiendo el último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación por una constante de proporcionalidad. La constante de proporcionalidad se ajusta igual a un valor mayor de 1,0 cuando el último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación es mayor o igual a 1,0 o 1,0 cuando el último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación es menor de 1,0.

El programa de control también puede programarse de modo que el multiplicador de alimentación positiva de la alimentación sea una función de la relación de presión. Dicha función tiene un valor máximo del multiplicador de alimentación positiva a una relación de presión predeterminada a la cual o directamente antes de la cual el compresor centrífugo entra en condiciones de sobrecarga durante una transición entre la etapa de evacuación y la etapa de purga. El multiplicador de alimentación positiva tiene valores decrecientes del multiplicador de alimentación positiva en relaciones de presión mayores o menores que el valor máximo. El valor máximo tiene una magnitud preseleccionada de modo que cuando el valor máximo se multiplica por la velocidad óptima a la relación de presión predeterminada, la velocidad resultante evitará que el compresor centrífugo entre en condiciones de sobrecarga. La función puede ser una función gaussiana.

Los medios de detección de parámetros pueden incluir dos transductores de presión adicionales situados en dos puntos en la envoltura del compresor centrífugo que están sucesivamente más cerca de un impulsor del mismo. En tal caso, el programa de control está programado para calcular una diferencia de presión de la presión medida por los otros dos transductores de presión. El parámetro es la diferencia de presión. En tal caso, el programa de control puede programarse de tal forma que durante cada uno de los intervalos de tiempo, se calcula y se almacena un error de diferencia de presión restando el valor mínimo permisible del valor actual de la diferencia de presión. El factor de corrección de velocidad del multiplicador de retroalimentación se calcula durante cada uno de los intervalos de tiempo mediante un control integral proporcional que comprende añadir un término proporcional a un término integral. El término proporcional se calculó multiplicando un factor de ganancia por una diferencia entre el error de diferencia de presión y un error de diferencia de presión anterior calculado en un intervalo de tiempo anterior y dividiendo la diferencia por el intervalo de tiempo. El término integral se puede calcular dividiendo el factor de ganancia por un tiempo de restablecimiento integral y multiplicando un cociente resultante del mismo por el error de diferencia de presión.

Breve descripción de los dibujos

Mientras que la memoria descriptiva concluye con las reivindicaciones que definen la invención, se cree que la invención se entenderá mejor cuando se tome en relación con los dibujos adjuntos, en los que:

La Figura 1 es un diagrama esquemático de un aparato de adsorción por cambio de presión al vacío para realizar un proceso de acuerdo con la presente invención;
 la Figura 2 es un diagrama ejemplar de la velocidad y la potencia aplicadas a un motor utilizado para accionar un compresor usado en la Figura 1;
 la Figura 3 es un diagrama lógico de la programación de control de velocidad utilizada en un controlador empleado en la Figura 1;
 la Figura 4 es una curva ejemplar de un mapa de compresor que ilustra la línea operativa de eficiencia máxima representada gráficamente con respecto a la relación de presión frente al flujo de masa a través del compresor;
 la Figura 5 es una curva gaussiana de un multiplicador de velocidad de alimentación positiva utilizado en la

programación de control del controlador empleado en la Figura 1;

la Figura 6 es un diagrama esquemático de un aparato de adsorción por cambio de presión al vacío que utiliza compresores de evacuación y alimentación dedicados en relación con lechos adsorbentes para realizar un proceso de acuerdo con la presente invención;

5 la Figura 7 es un diagrama ejemplar de la velocidad y la potencia aplicadas a un motor utilizado para accionar el compresor de alimentación utilizado en la Figura 6; y

la Figura 8 es un diagrama ejemplar de la velocidad y la potencia aplicadas a un motor utilizado para accionar el compresor de evacuación usado en la Figura 6.

10 Descripción detallada

Con referencia a la Figura 1, se ilustra un aparato de adsorción por cambio de presión al vacío 1 que está diseñado para producir un producto de oxígeno. Aunque el aparato de adsorción por cambio de presión al vacío 1 es un diseño de lecho único, se entiende que es para fines de ilustración y la presente invención tendrá una aplicabilidad igual a la
 15 del diseño de lecho múltiple utilizando uno o varios compresores diseñados para presurizar y evacuar un lecho o lechos adsorbentes. Además, la presente invención es igualmente aplicable al aparato de adsorción por cambio de presión al vacío diseñado para producir otros productos tales como dióxido de carbono, nitrógeno, hidrógeno o helio. Como tal, el aparato de adsorción por cambio de presión al vacío 1 se muestra y se describe en el presente documento únicamente con fines ejemplares.

20 El aparato de adsorción por cambio de presión al vacío 1 extrae aire a través de una entrada 10 que contiene un filtro para filtrar las partículas. La corriente de alimentación de aire resultante es extraída por un compresor 12 que tiene un refrigerador posterior 14 para eliminar el calor de compresión. La corriente de alimentación comprimida resultante se introduce en un lecho adsorbente 16 que puede contener adsorbentes LiX bien conocidos para producir un producto
 25 de oxígeno que se introduce en un tanque de sobrecarga de oxígeno 18 del cual se puede extraer una corriente de producto de oxígeno 20. Se debe tener en cuenta que el compresor 12 es accionado directamente por un motor de imán permanente de velocidad variable 38 en el cual la velocidad es controlada por un variador de frecuencia variable 40 a analizar en el que una señal de velocidad ajustada se genera por un controlador 42, el "PLC", también a analizar. A este respecto, como se indicó anteriormente, la presente invención también tiene aplicabilidad en motores de
 30 inducción de alta velocidad.

El lecho adsorbente 16 se somete a un ciclo de repetición en la producción de la corriente de producto de oxígeno que tiene siete etapas. En una de las primeras etapas, se realiza una etapa de alimentación con ecualización en la que el lecho de adsorción 16 se presuriza simultáneamente desde la parte inferior con el aire de alimentación y con el
 35 uso del compresor 12 y desde la parte superior con gas de ecualización suministrado desde un tanque de recuperación 22. Para lograr esto, las válvulas 24 y 26 se ajustan en posiciones abiertas, las válvulas 28, 30 y 34 se ajustan en posiciones cerradas y la válvula 36 se ajusta en una posición parcialmente abierta. Con referencia adicional a la Figura 2, se puede ver que la velocidad del compresor 12 está disminuyendo debido a la desaceleración de una etapa final siete que se analizará más adelante. Cabe señalar que en la Figura 2, el número de etapa indica el final de una etapa
 40 en particular. En cualquier caso, el propósito de tal etapa es permitir que el lecho adsorbente 16 se lleve gradualmente a una presión operativa.

En la conclusión de la Etapa 1, se inicia la Etapa 2, una etapa de alimentación con presurización de producto, cerrando la válvula 36 y abriendo parcialmente la válvula 34. Durante esta etapa, ahora se está suministrando producto de alta
 45 pureza al lecho adsorbente 16 desde el tanque de inyección de oxígeno 18 mientras el lecho adsorbente 16 se presuriza desde la parte inferior con el uso del compresor 12. Como se puede ver mejor en la Figura 2, el lecho adsorbente 16 al final de la etapa 2 se llevó a una presión operativa en cuya adsorción se inicia en la etapa 3. Durante la etapa 2, la velocidad del compresor comienza a aumentar desde un mínimo a medida que aumenta la presión.

50 En la etapa 3, una etapa solo de alimentación, las válvulas 28, 30, 34 y 36 ahora se ajustan en posiciones cerradas mientras que el lecho adsorbente se presuriza aún más por el compresor 12 para hacer que el nitrógeno se adsorba dentro del lecho adsorbente 16. Durante la etapa 3, la velocidad del compresor se aumenta gradualmente al igual que la presión dentro del lecho adsorbente 16. La etapa 3 va seguida de una etapa de alimentación y producción 4 en la que la velocidad del compresor 12 aumenta al igual que la presión dentro del lecho adsorbente 16. Durante la etapa
 55 4, la válvula 34 se abre y el producto de oxígeno fluye al tanque de sobrecarga de oxígeno 18.

Después de la producción, el lecho adsorbente se regenera en una serie de etapas que comienzan con una etapa 5 que constituye una etapa de ecualización. La etapa 5, la etapa de ecualización, comienza con el compresor 12 en un estado sin alimentación y, como tal, la velocidad del compresor 12 comienza a disminuir junto con la presión dentro
 60 del lecho adsorbente. El gas de compensación se ventila desde la parte superior del lecho adsorbente 16 al tanque

de recuperación 22 abriendo parcialmente la válvula 36. Al final de la etapa 5, se inicia la etapa 6, una etapa de evacuación pura, en la que el lecho adsorbido comienza a evacuarse cerrando la válvula 36 y abriendo las válvulas 28 y 30. El compresor ahora actúa como una bomba de vacío y elimina el nitrógeno residual del lecho adsorbente 16 y descarga el nitrógeno residual a través del silenciador de ventilación 39. En la etapa 7, la evacuación continúa con una purga de oxígeno abriendo parcialmente la válvula 36. Esto se denomina en el presente documento y en las reivindicaciones como la etapa de evacuación con purga de producto. Desde la etapa 7, el ciclo continúa al comenzar la etapa 1 abriendo las válvulas como se ha descrito anteriormente.

La operación anterior del sistema de adsorción por cambio de presión al vacío es convencional. Sin embargo, como referencia, la siguiente Tabla indica el posicionamiento de las válvulas durante cada una de las etapas 1-7 descritas anteriormente.

Tabla

ETAPA		1	2	3	4	5	6	7
NÚMERO DE VÁLVULAS	24	O	O	O	O	O	C	C
	28	C	C	C	C	O	O	O
	26	O	O	O	O	C	C	C
	30	C	C	C	C	C	O	O
	34	C	P	C	O	C	C	C
	36	P	C	C	C	P	C	P
O = Abierta C = Cerrada P = Parcialmente abierta								

Aunque no se ilustra, las válvulas serán controladas por un controlador lógico programable que se programará para avanzar etapa a etapa sobre la base de la presión y el tiempo. Por ejemplo, las etapas 1 y 2 pueden ser etapas basadas en el tiempo que concluyen tras el transcurso de un intervalo de tiempo. Los periodos de tiempo de la etapa 1 y la etapa 2 se ajustan para lograr las presiones deseadas dentro del lecho adsorbente 16 que llevarán el lecho adsorbente 16 hasta una presión operativa a la que se realizará la adsorción. Las etapas 3 y 4 pueden basarse en la presión y terminar cuando la presión del lecho está en un punto de ajuste de la presión de adsorción que es una presión óptima para la adsorción de nitrógeno del adsorbente. La etapa 5 puede ser también de nuevo una etapa de tiempo en la que el intervalo de tiempo se ajusta para lograr una baja presión deseada dentro del lecho adsorbente y enviar una cantidad deseada de gas al tanque de recuperación 22 para fines de purga y equalización posteriores. La etapa 6 es típicamente una etapa basada en la presión en la que se obtiene la presión de desorción óptima, y la etapa 7 es una etapa basada en el tiempo que se ajusta para garantizar una desorción suficiente para la regeneración del lecho adsorbente 16.

Aunque la presente invención se ha descrito hasta ahora con respecto a un proceso de adsorción por cambio de presión de vacío de un solo lecho, es igualmente aplicable a un proceso de lecho múltiple. Como sabrían los expertos en la técnica, cuando se realizó un proceso de lecho múltiple, en lugar del tanque de recuperación 22, el gas de equalización se descarga de un lecho adsorbente y se introducirá en otro lecho adsorbente. Dado que la producción será continua, el tanque de sobrecarga de oxígeno 18 será de un volumen más pequeño que el utilizado con el aparato de lecho único y el proceso ilustrados.

De acuerdo con la presente invención, la velocidad del compresor 12 se controla variando la velocidad de un motor de imán permanente 38 mediante un variador de frecuencia variable 40 que responde a una señal de control 43 generada por un controlador 42 que puede ser un controlador lógico programable "PLC". Se entiende que el controlador 42 podrá incorporarse al controlador que se usa para controlar la secuencia de las válvulas que se muestra en la Tabla anterior o podría ser un controlador separado que responda al controlador de secuencia de las válvulas y, en particular, y para los fines que se analizarán, la etapa exacta que se está ejecutando por el controlador de secuencia de las válvulas. El variador de frecuencia variable 40 y el motor de imán permanente 38 pueden obtenerse de una diversidad de fabricantes conocidos y están fácilmente disponibles. Debe observarse que la presente invención es igualmente aplicable a motores de inducción de alta velocidad.

El controlador 42 puede ser un procesador Allen Bradley SLC 5/05 programado con el software RSLogix 500 o equivalente que se puede obtener en Rockwell Automation situada en Milwaukee, Wisconsin, EE. UU. El programa dentro del controlador 42 se ejecuta continuamente durante intervalos de tiempo predeterminados y repetidos. El controlador 42 responde a las señales generadas por los transductores de presión 44, 46 y 48 y, preferiblemente, un transductor de temperatura 50 y se transmite por las conexiones eléctricas adecuadas 45, 47, 49 y 51, respectivamente. Además, se proporciona una entrada de datos 52 que sirve como una entrada al controlador 42 que contiene la etapa actual real durante la cual el ciclo de repetición se realiza mediante el aparato de adsorción por cambio de presión al vacío 1. Estos datos relativos a la etapa actual sirven como entrada al programa de control que

de una manera a analizar responde a dichos datos. La entrada de datos 52 se puede obtener del controlador que actúa para controlar las válvulas en el ciclo de repetición que se realiza mediante el aparato de adsorción por cambio de presión al vacío 1.

5 Con referencia a la Figura 3, la lógica de control se programa dentro del controlador 42 por medio de un programa de control. Como una primera fase de la programación, como se ilustra por el bloque lógico 53, el motor 38 se inicia junto con un ciclo de repetición realizado por el aparato de adsorción por cambio de presión al vacío 1 que se ha descrito anteriormente con respecto al posicionamiento de las válvulas. Al arrancar el motor 38, está configurado para funcionar a una velocidad mínima que constituye el 40 por ciento de una velocidad máxima de diseño. Por encima de esta
10 velocidad, la potencia comienza a aplicarse al motor. El variador de frecuencia variable 40 responde a la señal de control 43 generada por el controlador 42 para controlar que el motor de imán permanente 38 funcione a una velocidad ajustada que evitará la sobrecarga o que cortará la energía al motor de imán permanente de alta velocidad 38 y, por lo tanto, permitirá que el motor de imán permanente 38 y, por lo tanto, el compresor 12, desacelere cuando sea necesario en el ciclo de repetición.

15

Después de la primera etapa 53, el controlador comienza entonces la ejecución continua durante los intervalos de tiempo de repetición predeterminados, que son cada uno preferiblemente menor de 1 milisegundo. En la etapa 54, se calcula una diferencia de presión "dP" en la envolvente del compresor 12 en dos puntos o ubicaciones que están situadas sucesivamente más cerca del impulsor o en los puntos medidos por los transductores de presión 46 y 48.

20 Esta diferencia de presión, entre la presión medida por los transductores de presión 48 y 46, respectivamente, proporciona un parámetro que se refiere al flujo que pasa a través del compresor 12. A este respecto, el flujo podría medirse directamente con un transductor de flujo. En la siguiente fase lógica de ejecución, designada por el número de referencia 56, una relación de presión a través del compresor se calcula sobre la base de las presiones medidas por el transductor de presión 48 y 44 o, en otras palabras, una relación entre la presión de salida y de entrada y
25 almacenada. Después del cálculo y almacenamiento de la relación de presión, la relación de presión actual se compara con un valor anterior en la etapa 57.

La velocidad óptima del compresor 12 se determina a partir de la relación de presión calculada en el bloque lógico 54 que se encuentra a lo largo de la línea operativa de máxima eficiencia. Esto se determina a partir de los datos de
30 rendimiento del compresor para el compresor particular utilizado. Con referencia a la Figura 4, se presenta un ejemplo de dichos datos. La determinación exacta de esta velocidad podría ser a partir de una tabla de consulta o una ecuación polinómica en la que los puntos de la línea operativa de eficiencia máxima, denominada en la Figura como la "Línea de mejor eficiencia", se ajustan de acuerdo con técnicas de ajuste de curva bien conocidas. Se entiende que esta curva variará ligeramente en función de la temperatura medida por el transductor de temperatura 50. Como tal, habría
35 datos programados dentro del programa de control que constituyen una familia de dichas curvas. Cuando la temperatura se encuentra en un punto intermedio, la velocidad exacta podría interpolarse entre curvas o multiplicarse por un factor de corrección igual a una relación de la temperatura medida a la temperatura de diseño de la cual se derivó una curva de operación. Como alternativa, podría haber una sola curva que se base en la temperatura esperada en la que opera el aparato 1. En tal caso, no habría ningún requisito para una entrada de temperatura del transductor
40 de temperatura 50. Las líneas que cruzan la línea operativa de máxima son velocidades específicas a las que la relación de presión variará con el caudal a través del compresor. Como es evidente en el gráfico, a cualquier velocidad particular, existe un caudal a través del compresor 12 en el que se producirá una sobrecarga.

Después de calcular la velocidad óptima, se realiza la etapa de ejecución 60 en la que se determina si el ciclo de
45 adsorción por cambio de presión al vacío se encuentra al inicio de la etapa 1 o la etapa 5, concretamente, al comienzo de la etapa de alimentación con eculización o etapas de eculización. Esta determinación se realiza a partir de la entrada de datos 52. Si al comienzo de dichas etapas, la programación establece una velocidad no operativa, como se indica en la etapa 62, la señal de control 43 será atribuible a dicha velocidad no operativa. Por ejemplo, esta velocidad podría ser el 40 por ciento de la velocidad máxima de diseño del motor 38. El variador de frecuencia variable
50 40, a su vez, se programa o se configura de manera que cuando la señal de control 43 es atribuible a la velocidad no operativa, la entrada de energía al motor 38 se deshabilitará, lo que permitirá que el tren de impulsión (rotor del motor e impulsor del compresor) se desacelere libremente o en punto muerto hasta su velocidad mínima sin consumir energía. En este sentido, los variadores de frecuencia variable 40 se configuran típicamente para que funcionen sin ninguna modificación. Dicho esto, es igualmente posible programar el programa de control que se ejecuta dentro del
55 controlador 42 para generar una señal para controlar la fuente de alimentación al motor de imán permanente 38 para cortar la energía cuando sea apropiado en el ciclo de repetición. Con referencia de nuevo a la Figura 4, la "Línea de desaceleración típica" es la ruta que sigue el compresor cuando el ciclo de repetición realizado por el aparato de adsorción por cambio de presión al vacío 1 requiere que la velocidad del compresor se desacelere debido a los requisitos de caída de la cabeza de presión. Este es el caso en la etapa 1, parte de la etapa 2 y la etapa 5.

60

Eventualmente, el tren de transmisión tendrá que activarse durante la etapa 2 o, en otras palabras, la etapa de alimentación con presurización de producto. Comienza con la caída de la presión. En consecuencia, al inicio de la etapa 2, la señal de control 43 permanece atribuible a la velocidad no operativa. Sin embargo, con referencia de nuevo a la Figura 2, la presión sobre una parte de dicha etapa comienza a aumentar debido a los requisitos del ciclo de repetición y la aplicación de potencia al motor de imán permanente 38. Para ejecutar el control apropiado para efectuar la operación anterior, si la lógica en la etapa 60 se responde negativamente, entonces el programa continúa con la ejecución de la prueba indicada en el bloque lógico 64 en el que se determina si la etapa del ciclo de repetición, la "Etapa VPSA" se encuentra en la alimentación con presurización de producto, concretamente, la etapa 2, analizada anteriormente. Nuevamente, esta prueba se realiza sobre la base de la entrada de datos 52. Si esta prueba se responde afirmativamente, la ejecución del programa de control continúa con la ejecución de otra prueba que se muestra en el bloque lógico 66 y la relación de presión actual "P2/P1", según lo medido por los transductores de presión 48 y 44, se compara con una relación de presión predeterminada de "P2/P1 predeterminada" que se ha programado previamente dentro del programa de control. Si la relación de presión actual es menor que la relación de presión predeterminada, entonces de nuevo el programa pasa a la fase de ejecución de la programación que se muestra en el bloque 62 y se permite que el motor de imán permanente 38 continúe desacelerándose. Como se ilustra, cuando se corta la alimentación al motor 38, el programa de control regresa a la fase de ejecución 54. Sin embargo, si las pruebas realizadas en la programación como se establece en los bloques lógicos 60 y 64 son negativas o la prueba realizada en el bloque lógico 66 es afirmativa, entonces el ciclo de repetición no está en las etapas 1 o 5 y es posiblemente en la etapa 2 donde se debe aplicar energía al motor de imán permanente 38. En tal punto del ciclo de repetición que se realiza mediante el ciclo de adsorción por cambio de presión al vacío, el compresor está alimentado y, por lo tanto, existe la posibilidad o la probabilidad de que se produzcan condiciones de sobrecarga en el funcionamiento del compresor 12. Con el fin de evitar el funcionamiento del compresor 12 cuando se pueden encontrar condiciones de sobrecarga, la lógica de programación continúa hasta el resto de su ejecución a partir del bloque lógico 68.

En la ejecución de la programación como se muestra en el bloque lógico 68, la diferencia de presión calculada en el bloque lógico 54 "dP de envolvente" se compara con una dP mínima. Esta dP mínima, que es un valor que se determina experimentalmente como el valor mínimo a lo largo de todo el ciclo en el que el compresor 12 se sobrecargará con un factor de seguridad. Por ejemplo, si el compresor 12 se sobrecarga en cualquier momento durante el ciclo de repetición realizado por el aparato de adsorción por cambio de presión al vacío 1 a una dP igual a 2 pulgadas de agua, las 2 pulgadas de agua se multiplican por el 15 por ciento para obtener el mínimo. Una alternativa a esto es determinar la dP en la etapa 58 junto con el cálculo de la velocidad óptima del mapa del compresor del compresor, como se muestra como un ejemplo en la Figura 4 a analizar.

La ejecución del bloque lógico 68 es una etapa crítico porque si el caudal a través del compresor es menor que un mínimo, entonces existe el peligro de que el compresor 12 entre en sobrecarga. Sin embargo, si la diferencia de presión actual calculada dP obtenida en el bloque lógico 54 es mayor o igual al mínimo, existe una menor probabilidad de que el compresor entre en sobrecarga. Sin embargo, en los casos en que la diferencia de presión calculada del bloque lógico 54 no es menor que el mínimo, como se indica en la etapa 70, se calcula un multiplicador de velocidad de retroalimentación dividiendo el último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación, "(SM_{FB})" que se ha determinado en una ejecución anterior del programa de control, por una constante de proporcionalidad. La constante de proporcionalidad se ajusta igual a un valor mayor de 1,0, por ejemplo, 1,04, cuando el último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación es mayor o igual de 1,0. El valor exacto de dicha constante de proporcionalidad se determina a través de la experimentación y se puede considerar como un factor de ajuste. Sin embargo, cuando el último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación es menor de 1,0, la constante de proporcionalidad simplemente se establece en 1,0. Cuando un multiplicador de retroalimentación de este tipo se multiplica por la velocidad óptima calculada en la fase de ejecución ilustrada por el bloque lógico 58, el efecto de esto será disminuir ligeramente la velocidad mediante el uso de la constante de proporcionalidad o disminuir aún más la velocidad por el factor del último multiplicador de retroalimentación almacenado cuando dicho último multiplicador de retroalimentación almacenado es menor de 1,0. Sin embargo, si la diferencia de presión medida en la etapa 54 es menor que la diferencia de presión mínima, entonces, como se indica en el bloque lógico 72, se calculará un nuevo multiplicador de retroalimentación que tendrá el efecto de aumentar la velocidad. El cálculo contemplado en el bloque lógico 72 es añadir a un último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación, un factor de corrección de velocidad. Si bien este factor de corrección de velocidad podría ser una constante, preferiblemente, el factor de corrección de velocidad contiene términos proporcionales e integrales. Durante cada ejecución del programa, se calcula y se almacena un error de diferencia de presión restando el valor mínimo permisible del valor actual de la diferencia de presión calculada en el bloque lógico 54. El término proporcional se calcula multiplicando un factor de ganancia por una diferencia entre error de diferencia de presión y un error de diferencia de presión anterior calculado en un intervalo de tiempo anterior o una ejecución anterior del programa de control y dividiendo la diferencia por el intervalo de tiempo. Este error de diferencia de presión anterior se obtiene a partir del valor almacenado leído en el bloque lógico 54 antes

del cálculo y almacenamiento del error de diferencia de presión actual. El término integral se calcula dividiendo el factor de ganancia por un tiempo de restablecimiento integral y multiplicando un cociente resultante del mismo por el error de diferencia de presión actual.

5 Lo anterior puede ilustrarse mediante la siguiente ecuación:

$$SM_{FBi} = SM_{FBi-1} + K_c * \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})}{t} + \frac{K_c}{\tau} * \varepsilon_i ;$$

10

donde: SM_{FBi} = Multiplicador de velocidad de retroalimentación; SM_{FBi-1} = El valor almacenado anterior del Multiplicador de velocidad de retroalimentación, K_c es la ganancia; ε_i es el error de diferencia de presión; ε_{i-1} es el último valor almacenado del error de diferencia de presión; τ es el tiempo de restablecimiento integral y t es el intervalo de tiempo de ejecución del programa de control. Por lo tanto, aquí se ejerce un control proporcional - integral de la velocidad y la "ganancia" y el "tiempo de restablecimiento integral" son factores de ajuste conocidos que se determinarán experimentalmente de una manera conocida en la técnica.

La ejecución del programa avanza a continuación a una etapa 74 en la que el programa prueba dónde está la etapa actual del ciclo de repetición realizado por el aparato de adsorción por cambio de presión al vacío 1 mencionado anteriormente en una etapa de evacuación o evacuación con purga, o en otra palabras, si está en las etapas 6 o 7 que implican la etapa de evacuación o evacuación con una purga de producto. Si el proceso de adsorción por cambio de presión al vacío no está en ninguna de estas etapas, el multiplicador de velocidad de alimentación positiva se ajusta en 1,0 como se indica en el bloque lógico del programa designado por el número de referencia 76 y se calcula un multiplicador de velocidad total en la etapa 78 multiplicando el multiplicador de velocidad de retroalimentación determinado en las etapas 70 y 72 por 1,0. En otras palabras, en tal caso, el multiplicador de velocidad total es igual al multiplicador de velocidad de retroalimentación.

En caso de que la prueba que se realiza en el bloque lógico 74 sea afirmativa, entonces se calcula un multiplicador de velocidad de alimentación positiva en la etapa 80 que evitará la sobrecarga durante las etapas de evacuación o evacuación con purga y, en particular, en un punto durante el ciclo de adsorción por cambio de presión al vacío que se encuentra cerca o en una transición entre estas dos etapas. Aunque no se entiende bien por los inventores en el presente documento, se ha encontrado en la práctica que existe un peligro particular de que el compresor 12 entre en sobrecarga en ese punto de funcionamiento. En cualquier caso, con referencia a la Figura 5, dependiendo del valor de la relación de presión actual calculado en la etapa 56, se determinará un multiplicador de alimentación positiva que depende de dicha relación de presión que evitará la sobrecarga. Cuando este multiplicador de alimentación positiva se multiplica por el multiplicador de velocidad de retroalimentación, el efecto será aumentar el multiplicador de velocidad total calculado en la etapa 76 sobre el que se obtendrá del multiplicador de velocidad de retroalimentación en solitario.

Después de calcular el multiplicador de velocidad total en la etapa 78, se calcula una velocidad óptima ajustada en el bloque lógico 82 multiplicando la velocidad óptima calculada en la etapa 58 por el multiplicador de velocidad total ("SM_r") para obtener una velocidad ajustada. Esta velocidad ajustada se usa entonces para ajustar la velocidad en el variador de frecuencia variable 40 como se muestra en la etapa 84. A este respecto, el controlador 42, en respuesta al valor de la velocidad ajustada determinada por el programa de control, genera la señal de control 43 que es atribuible a tal velocidad ajustada. Esta señal de control 43 servirá entonces como una entrada que revisará la velocidad ajustada en el variador de frecuencia variable 40. Otra posibilidad sería que el variador de frecuencia variable se programe para leer el resultado de la velocidad ajustada que genera el controlador 42. En este caso, la programación avanza a la siguiente ejecución de la misma después de transcurrido el tiempo de ejecución que vuelve a producirse al volver a la etapa de ejecución 54.

Con referencia de nuevo a la Figura 2, la estrategia detrás del control de velocidad de la presente invención es básicamente obtener una velocidad basada en la relación de presión que en la mayoría de los casos operará el compresor 12 en su línea operativa de eficiencia máxima que se muestra en la Figura 3. Específicamente, al final de la séptima etapa en el proceso de adsorción por cambio de presión al vacío, la relación de presión desarrollada a través del compresor 12 será, en la realización descrita en el presente documento, aproximadamente 2. El lecho adsorbente, sin embargo, estará a una presión negativa. A medida que el gas de equalización fluye al lecho de adsorción 16 desde el tanque de equalización 22, la presión del lecho aumenta rápidamente desde la etapa 7 en la que el lecho ha sido evacuado para eliminar el nitrógeno y concluir la regeneración del adsorbente. Sin embargo, en lo que respecta a la relación de presión a través del compresor 12, durante al menos una parte del aumento de presión,

se eliminará la potencia del motor de imán permanente 38 y, como se muestra, en la Figura 2, ahora se aplica energía para la parte de la etapa y la velocidad del compresor 12 se está desacelerando. Durante la etapa 2, la presurización continúa con el gas producido y se alcanza un punto en el que la relación de presión detectada por los transductores de presión 48 y 44 aumenta debido al aumento de la presión del lecho, de modo que la velocidad del compresor 16 debe aumentarse para mantener el funcionamiento a lo largo de la línea operativa de máxima eficiencia como se muestra en la Figura 3. Durante cualquiera de estas etapas, si el compresor 12 no acelera lo suficientemente rápido, el caudal a través del compresor detectado por los transductores de presión 46 y 44 puede no ser suficiente para evitar la sobrecarga. En tal caso, esta sería una situación en la que una respuesta afirmativa para la prueba en el bloque de ejecución del programa 68 sería afirmativa y se calcularía un multiplicador de retroalimentación que necesariamente aumentaría la velocidad del compresor para evitar la sobrecarga. A medida que se realizan las etapas 3 y 4, la relación de presión a través del compresor aumenta debido al aumento en la presión del lecho. Por lo tanto, el compresor se acelera para obtener el aumento a lo largo de la línea operativa de máxima eficiencia. En ese momento, es poco probable que el compresor esté en un flujo de masa en cualquier lugar cerca de una condición en la que se produzca una sobrecarga; y la consulta en el bloque 68 sería respondida negativamente. Esto daría como resultado una reducción de la velocidad del compresor hacia la línea operativa de máxima eficiencia, ya sea reduciendo aún más el multiplicador de velocidad de retroalimentación con la proporcionalidad constante si el último valor fuera 1,0 o mayor, o reduciendo aún más la velocidad con el último valor del multiplicador de velocidad de retroalimentación.

Después de la conclusión de la etapa 4, el lecho adsorbente 16 necesita regenerarse. En este punto, se permite que el gas escape del lecho adsorbente 16 al tanque de equalización 22. La relación de presión cae rápidamente y, preferiblemente, como se ha descrito anteriormente, el variador de frecuencia variable 40 reacciona a la señal de control 43 atribuible a la velocidad no operativa producida en el bloque lógico 62 y deja de aplicar energía al motor de imán permanente 38. Dado que el motor está descargado, es improbable que ocurra una sobrecarga. Sin embargo, al comienzo de la sexta etapa, el compresor 12 actúa como una bomba de vacío y, a medida que la presión disminuye dentro del lecho adsorbente 16, la relación de presión comienza a aumentar. Si el flujo de masa a través del compresor no es suficiente, podría producirse una sobrecarga. Sin embargo, ahora se calcula un multiplicador de velocidad de alimentación positiva agresivo con la ayuda de la Figura 5. A medida que la relación de presión aumenta a través del compresor según se mide por los transductores de presión 48 y 44, el multiplicador de velocidad de alimentación positiva aumenta hasta un valor máximo en una relación de presión de aproximadamente 1,7. Esta relación de presión se determina experimentalmente como la relación de presión a la que es probable que se produzca la sobrecarga y el multiplicador de velocidad de alimentación positiva se selecciona para que sea ese valor que aumentará lo suficiente la velocidad del compresor para evitar la sobrecarga. A medida que la relación de presión aumenta aún más debido a la evacuación del lecho adsorbente 16, la relación de presión aumenta aún más. Sin embargo, el multiplicador de velocidad de alimentación positiva disminuye. La razón de esto es que la combinación de motor y compresor no reaccionará inmediatamente debido a la resistencia aerodinámica y los efectos de la inercia. En consecuencia, a medida que aumenta la relación de presión, la velocidad del compresor aumenta gradualmente y, después del pico, la velocidad disminuye gradualmente para permitir que el compresor se desacelere y regrese a la eficiencia máxima, de modo que la siguiente etapa 1 pueda tener lugar a potencia a la que se retira el motor de imán permanente.

Con referencia específica a la Figura 5, preferiblemente la respuesta del multiplicador de velocidad de alimentación positiva se obtiene con una función Gaussiana en la que el multiplicador de velocidad de alimentación positiva viene dado por la ecuación:

$$45 \quad \text{INICIO} + \text{Amplitud}^{[F/\text{propagación}]},$$

donde $F = (P_2/P_1 - \text{Centro})^2$. "Inicio" desplazará la curva mostrada en la Figura 4 hacia arriba o hacia abajo, "Amplitud" moverá el pico hacia arriba o hacia abajo. "Centro" cambiará la relación de presión donde se produce el pico y "Propagación" controla la velocidad a la que la curva se distribuye desde el centro. Por lo tanto, la propia curva podría programarse dentro del programa de control o los puntos de datos dentro de una tabla de consulta también podrían programarse. Dicho esto, en lugar de la curva gaussiana ilustrada, la curva podría ser triangular. Menos preferido, pero posible, sería utilizar el pico de la curva para el multiplicador de velocidad de alimentación positiva. Asimismo, sería posible utilizar un factor de aumento fijo para el multiplicador de velocidad de retroalimentación, de modo que la velocidad del compresor aumentaría si el caudal a través del compresor descendiera por debajo de un punto permisible y se redujera en un factor fijo si el caudal permaneciera por encima del punto permisible. La razón por la que ninguno de estos se prefiere es que un mayor porcentaje de funcionamiento del compresor estará fuera de la línea operativa de eficiencia máxima y, por lo tanto, el aparato 1 consumirá más energía.

Como se ha mencionado anteriormente, la programación del variador de frecuencia variable 40 para eliminar la energía a velocidades muy bajas también es opcional, pero como podría apreciarse, tal operación también ahorra

energía. Dicho todo lo anterior, es posible realizar una realización de la presente invención en la que la potencia nunca se elimina del motor 38. En otras palabras, una realización sin las etapas de ejecución 60, 62, 64 y 66. Sin embargo, si la potencia para el motor no se desactivara, entonces el variador de frecuencia variable 40 intentará reducir la velocidad a lo largo de una ruta preprogramada introduciendo potencia al motor 38, consumiendo de este modo más potencia. Sin embargo, como mínimo, la presente invención contempla la lógica de programación del tipo que se muestra en los bloques lógicos posteriores 68 - 84, donde el compresor 12 tiene al menos probabilidades de encontrar condiciones operativas de sobrecarga, concretamente, en el presente ciclo, parte de la etapa 2 donde la relación de presión a través del compresor 12 aumenta y, por lo tanto, se debe aplicar potencia al motor de imán permanente 38, etapas 3-4 y etapas 6 y 7.

10 Aunque la presente invención se ha analizado con referencia a un ciclo de adsorción por cambio de presión al vacío en el que se usa un solo lecho y un solo compresor centrífugo actúa tanto en la función de compresión de alimentación como de evacuación, la aplicación de la presente invención no está limitada a tal realización. Con referencia a la Figura 6, se ilustra un aparato 2 para realizar un ciclo de adsorción por cambio de presión al vacío en el que dos lechos adsorbentes 101 y 102 se someten a un ciclo de adsorción por cambio de presión al vacío de doce etapas en el que un compresor de alimentación 104 alimenta alternativamente aire comprimido a los dos lechos adsorbentes 101 y 102 y un compresor de evacuación 106 evacúa alternativamente los lechos adsorbentes 101 y 102 de los gases durante dicho ciclo. Los compresores de alimentación y evacuación 104 y 106 son accionados por motores de velocidad variable 108 y 110, respectivamente, que son controlados por variadores de velocidad variable 112 y 114. Los motores de velocidad variable 108 y 110 podrían ser motores de imán permanente o motores de inducción. Los variadores de velocidad variable 112 y 114 controlan la velocidad de los motores y responden a las señales de velocidad ajustadas generadas por un controlador 116. El controlador 116 genera las señales de velocidad ajustadas y, a su vez, responde a las señales generadas por los transductores de presión P1, P2 y PS, designados por los números de referencia 118, 120 y 122 en relación con el compresor de alimentación 104 y los transductores de presión P'1, P'2 y P'S, designados por los números de referencia 124, 126 y 128 en relación con el compresor de evacuación 106. Las conexiones eléctricas entre los transductores de presión anteriores y el controlador 116 no se han mostrado con el propósito de simplificar la explicación del ciclo de adsorción por cambio de presión al vacío empleado en relación con el aparato 2. A este respecto, el controlador 116 también responde a una señal 129 que indica al controlador 116 la etapa del ciclo de adsorción por cambio de presión al vacío. Se produce una corriente de producto de oxígeno 20' como resultado de dicho ciclo. Todos los elementos anteriores tienen una descripción similar a los elementos nombrados de forma similar analizados con respecto al aparato 1. Sin embargo, la programación del controlador 116, como se analizará, se modifica para reflejar la separación de los deberes de alimentación y evacuación de los compresores de alimentación y evacuación 104 y 106.

35 El ciclo de adsorción por cambio de presión al vacío empleado en el aparato 2 es uno que se divulga en la Patente de Estados Unidos N.º 6.010.555 e incluye operaciones en las que el lecho de adsorción 101 está en línea y produciendo el producto, y el lecho de adsorción 102 está fuera de línea y está siendo regenerado. Posteriormente en el ciclo, el lecho de adsorción 101 se pone fuera de línea y se regenera mientras el lecho de adsorción está en línea y produciendo el producto. Debe observarse además que, a menos que se indique otra cosa, las válvulas que se muestran en la Figura 6 se colocan en posiciones normalmente cerradas.

La siguiente es una Tabla que indica las posiciones de las válvulas durante cada una de las etapas del ciclo donde "O" indica una válvula abierta, "C", una válvula cerrada y "P", una válvula parcialmente abierta.

45

50

55

60

Tabla

		Etapas											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	Descripción de la etapa:												
	Lecho 101	FD, EU	FD, PP	FD	FD, AD	FD, AD, PPG	ED	ED, EV	EV	EV	EV	EV, PG	EV, EU
10	Lecho 102	ED, EV	EV	EV	EV	EV, PG	EV, EU	FD, EU	FD, PP	FD	FD, AD	FD, AD, PPG	ED
	Válvula N.º:												
	140	C	C	C	C	C	C	C	O	O	O	O	O
	130	O	O	O	O	O	O	C	C	C	C	C	C
15	144	O	O	O	O	O	O	O	C	C	C	C	C
	142	C	C	C	C	C	C	C	O	O	O	O	C
	146	C	C	C	C	C	C	O	C	C	C	C	O
	132	O	O	C	O	O	O	P	P	C	C	C	O
	134	P	C	C	C	P	O	O	O	C	O	O	P
20	136	C	P	C	O	O	C	C	P	C	O	O	C

Pasando primero a las etapas de alimentación que implican la represurización del lecho adsorbente 101, el lecho adsorbente 101, en una primera etapa, se somete a una alimentación con la etapa de ecualización ("FD, EU") en la que el aire filtrado se introduce a través de la entrada 118 y se comprime por el compresor de alimentación 104 para presurizar el lecho de adsorción 101 desde la parte inferior con aire de alimentación. Simultáneamente, el gas de ecualización se suministra desde el lecho de adsorción de despresurización 102. Para tales propósitos, las válvulas 130 y 132 se colocan en posiciones abiertas y la válvula 134 se coloca en una posición parcialmente abierta. En la etapa 2, una etapa de alimentación con presurización de producto ("FD, PP"), la válvula 134 está cerrada y la válvula 136 se ajusta en una posición de apertura parcial para permitir que se suministre un producto de alta pureza desde el tanque de sobrecarga de oxígeno 138. En una etapa posterior 3, el lecho adsorbente 101 continúa siendo represurizado desde la parte inferior con aire de alimentación comprimido en una etapa de alimentación de presión elevada ("FD"). En este punto, la válvula 130 permanece abierta. Volviendo a la Figura 7, se puede ver que en la etapa 1, la velocidad del compresor de alimentación 104 está disminuyendo debido a la desaceleración de una etapa final. En la etapa 2, la velocidad primero disminuye y luego aumenta a la presión del lecho adsorbente 101 que se lleva a la presión operativa y en la etapa 3, la velocidad aumenta a medida que el lecho adsorbente 101 se presuriza aún más. Durante las etapas 4 y 5, el producto se fabrica y se entrega al tanque de sobrecarga de oxígeno 138. En la etapa 4, una etapa de alimentación de presión constante con fabricación de producto ("FD, AD"), las válvulas 130, 132 y 136 están todas en la posición abierta. En la etapa 5, una etapa combinada de fabricación y purga de producto ("FD, AD, PPG"), la válvula 134 se ajusta adicionalmente en una posición abierta para permitir que el recipiente adsorbente 102 se purgue desde la parte superior con el producto. En la etapa 6, una etapa de ecualización ("ED"), la potencia del compresor de alimentación 104 se elimina y, como se muestra en la Figura 7, el compresor 104, por lo tanto, desacelera. En este punto, las válvulas 130 y 136 se colocan en posición cerrada y la válvula 134 se coloca en una posición abierta para permitir que el gas del producto acumulado fluya al lecho adsorbente 102.

Se debe señalar que, como se ilustra en la Figura 7, el lecho adsorbente 102 se somete posteriormente a las etapas de alimentación 7-12 que tienen una correspondencia una a una con las etapas 1-6 para el lecho adsorbente 101. Además, durante las etapas 1-6, el lecho adsorbente 102 se está regenerando y, por lo tanto, está sometido a las etapas de evacuación 1-6 que se muestran en la Figura 8 que tiene la misma descripción que las etapas de evacuación 7-12 que se analizarán directamente a continuación. Además, con el propósito de controlar el compresor de alimentación 130, donde dicho compresor es un compresor centrífugo, muchas de las mismas consideraciones se aplican a la teoría de control de dicho compresor de alimentación 130 como las analizadas con respecto al compresor 12 y al aparato 1. Es importante destacar que, si la Figura 7 se compara con la Figura 2, se puede ver que las etapas 1 y 7 para el aparato 2 son similares a la etapa 1 para el aparato 1 y las etapas 6 y 12 para el aparato 2 son similares a la etapa 5 del aparato 1. En todas estas etapas, la potencia es no se aplica a los compresores, concretamente, el compresor de alimentación 104 del aparato 2 o el compresor 12 del aparato 1. Además, las etapas 2 y 8, la alimentación de presión ascendente con las etapas de presurización de producto superpuestas, la velocidad del compresor 104 primero cae y luego aumenta. Estas etapas son similares a la etapa 2 del aparato 1 con respecto al compresor 12. Dicho de otra manera, el control del compresor de alimentación 104, donde dicho compresor es un compresor centrífugo, tal compresor en las etapas 1 y 7, 6 y 12, y 2 y 8, se controlaría de la misma manera que el compresor 12 en relación con las etapas 1, 5 y 2, respectivamente. Dado que el compresor 104 no sirve como un

compresor de evacuación, las etapas de evacuación utilizadas para controlar el compresor 12 no serían aplicables al control del compresor 104.

El lecho adsorbente 101 se regenera luego con una etapa de evacuación de presión descendente y ecualización ("ED, EV") en la etapa 7. Durante esta etapa, una válvula 140 se coloca en una posición abierta para permitir la eliminación del nitrógeno residual del lecho adsorbente 101 por acción del compresor de evacuación 106. Además, la válvula 132 se coloca en una posición parcialmente abierta y la válvula 134 se coloca en la posición completamente abierta para tales fines. Una válvula 142 se coloca en una posición abierta para permitir que el lecho adsorbente 102 se alimente con aire comprimido desde el compresor de alimentación 104. Durante las etapas de evacuación pura 8, 9 y 10, la válvula 132 se reajusta en la posición cerrada y el nitrógeno residual sigue eliminándose de la parte inferior del lecho adsorbente 101 por medio del compresor de evacuación 106. Todas estas son etapas de evacuación pura ("EV") donde la presión dentro del lecho adsorbente cae. En la etapa posterior 11, el lecho adsorbente 101 de una etapa de evacuación de presión constante con purga de producto ("EV, PG") sigue evacuándose por el compresor de evacuación 106 mientras se alimenta desde la parte superior con un gas de purga de oxígeno mediante el ajuste de la válvula 132 en una posición parcialmente abierta. Posteriormente, se realiza la etapa 12, que es una etapa de ecualización de presión ascendente ("EV, EU"). Durante esta etapa final, el lecho adsorbente 101 continúa siendo evacuado por el compresor de evacuación 106, mientras que la válvula 132 ahora se encuentra en una posición completamente abierta. La válvula 146 se coloca en una posición abierta para permitir que la presión aguas arriba producida por el compresor de alimentación 104 se ventile. La presión aumenta debido a que el flujo del gas de ecualización es mayor que y a una presión más alta que la del gas que se extrae con el compresor de evacuación 106. Con referencia adicional a la Figura 8, se puede ver durante las etapas 7 a 10, que la velocidad del compresor de evacuación 106 aumenta. Durante la etapa 11, la velocidad es constante y durante la etapa 12, la velocidad desciende cuando el compresor de evacuación 106 se desactiva. Posteriormente, el lecho adsorbente se somete a la etapa 1 y el ciclo se repite. Como se ha mencionado previamente, el lecho adsorbente 102 se somete a las mismas etapas de alimentación y evacuación con el uso del compresor de alimentación 104 y el compresor de evacuación 106. Durante las etapas de evacuación 7-12, el lecho adsorbente 102 se somete a las etapas de compresión de alimentación mencionadas anteriormente para el lecho adsorbente 101. Durante dichas etapas, las posiciones de las válvulas son las indicadas en la Tabla anterior.

De nuevo, si se compara la Figura 8 con la Figura 2, se puede ver que ciertas estrategias de control serían comunes con respecto al compresor de evacuación 106 y el compresor 12. A este respecto, las etapas 6 y 12 son etapas de ecualización de presión ascendente en las que el compresor de evacuación 106 no está alimentado. Durante dichas etapas, el compresor de evacuación 106 se controlaría de la misma manera que el compresor 12 en las etapas 1 y 5 analizadas anteriormente y mostradas en la Figura 2. Las etapas 1 y 7 se muestran en la Figura 8, donde el compresor de evacuación 106 comienza en un estado sin alimentación y luego se alimenta posteriormente cuando la relación de presión a través del compresor de evacuación 106, "P²/P¹" medida por los transductores de presión 126 y 124, respectivamente, alcance un nivel predeterminado, y se controlará de manera similar a la empleada para el compresor 12 en la etapa 2 que se muestra en la Figura 2. Las etapas 2, 3, 4; y 8, 9, 10, para el compresor de evacuación 106 que está en etapas de evacuación de presión descendente, se controlarían de manera similar a la etapa de evacuación 6 para el compresor 12 como se muestra y se describe con respecto a la Figura 2. Por último, la evacuación de presión constante con las etapas de purga de producto 5 y 11 para el compresor de evacuación 106 requeriría el mismo tipo de estrategia de control que la empleada para el compresor 12, la etapa 7 mostrada y descrita en referencia a la Figura 2.

Con referencia específica de nuevo a la Figura 6, aunque se contempla que tanto el compresor de alimentación 104 como el compresor de evacuación 106 sean compresores centrífugos que están sometidos a sobrecarga, es posible que el compresor de alimentación 104 esté formado por un soplador de tipo roots. Las características de aceleración y desaceleración de tal compresor serían muy diferentes de las de un compresor centrífugo y tal compresor no estaría sometido a sobrecargas. En tal caso, el compresor de alimentación 104 no requeriría el control de evitar sobrecargas que se requeriría para un compresor centrífugo. Sin embargo, el compresor de evacuación 106 será, en cualquier caso, un compresor centrífugo y, por lo tanto, estará sometido a sobrecargas. A este respecto, la estrategia de control mostrada para el control del compresor de evacuación 106 sería en muchos aspectos idéntica a la que se muestra en la Figura 3 con ciertos cambios relacionados con las etapas reales empleadas en el aparato que se muestra en la Figura 6. Por ejemplo, el cálculo y el almacenamiento de la dP de envolvente expuesta en el bloque lógico 54 implicaría tomar una relación de presión de P^S/P¹ medida por los transductores de presión 128 y 124. Además, la relación de presión calculada y almacenada en el bloque lógico 56 para su uso, el algoritmo de control sería la relación de presión de P²/P¹ medida por los transductores de presión 126 y 124. La prueba que se muestra en el bloque lógico 60, Figura 3, se modificaría como una prueba para determinar si la etapa es una ecualización de presión ascendente empleada en las etapas 6 o 12. En cualquiera de las etapas 6 o 12, la velocidad establecida en el compresor de evacuación 106 es una velocidad no operativa. Como se ha analizado anteriormente, este sería el caso ya sea en la etapa de

alimentación con ecualización o en las etapas de ecualización 1 y 5 que se muestran en la Figura 2 y se emplean en el aparato 1. Adicionalmente, el bloque lógico 64 se modificará para ser una prueba de la evacuación de presión descendente con ecualización de superposición, o las etapas 1 y 7 mostradas en la Figura 7. En dichas etapas, la velocidad del compresor disminuye y luego aumenta de manera análoga a la etapa 2, la etapa de alimentación con presurización de producto, que se muestra en la Figura 2. La relación $P2/P1$ utilizada en 66 sería, por supuesto, la relación $P'2/P'1$ analizada anteriormente y la dP de envolvente en 68 se basaría en $P'S/P'1$, como se ha analizado anteriormente. Los multiplicadores de velocidad de retroalimentación se calcularían de la misma manera y por las mismas razones que se describieron anteriormente en relación con el aparato 1. Por último, el bloque lógico 74 se modificará para probar las etapas de evacuación pura o evacuación con purga de producto o, en otras palabras, las etapas 2, 3, 4 y 5 o las etapas 8, 9, 10 y 11. En ambos casos, el multiplicador de velocidad de alimentación positiva deberá calcularse por razones similares a las expuestas en el ciclo que se muestra en la Figura 2 y de la misma manera.

Cuando el compresor de alimentación 104 es un compresor centrífugo, también será controlado de la misma manera que el compresor 12. Sin embargo, el compresor de alimentación 104, a diferencia del compresor 12, nunca sirve como un compresor de evacuación. Como tales, las etapas lógicas señaladas por los números de referencia 74, 76, 78 y 80 en la Figura 3 pueden ser prescindibles ya que nunca se utilizará un multiplicador de velocidad de alimentación positiva. Además, el cálculo y almacenamiento de la dP de envolvente que se muestra en el bloque lógico 54 se calcularía tomando una relación de $PS/P1$ medida por los transductores de presión 122 y 118. La relación de presión $P2/P1$ calculada y almacenada a 56 se mediría por presión transductores 120 y 118. Como se ha mencionado anteriormente con respecto a las etapas 1, 7; y 6, 12, mostradas en la Figura 7, el compresor de alimentación 104 está en un estado sin alimentación. Como tal, el bloque lógico 60 se reemplazaría con una prueba para tales etapas o si la etapa específica era una etapa de ecualización de presión descendente o una alimentación de presión ascendente con una etapa de ecualización de superposición. Las etapas 2 y 8 se muestran en la Figura 7 en relación con la etapa alimentación de presión ascendente con presión de producto de superposición son similares a la etapa 2 de la Figura 2, la etapa de alimentación con presurización de producto del Aparato 1. Como tal, el bloque lógico 64 se reemplazaría por una prueba de si la etapa era una etapa de alimentación de presión ascendente con presión de producto de superposición. Dado que un multiplicador de alimentación positiva no tendrá que calcularse nunca, la velocidad óptima que se establecerá en el variador de frecuencia variable 112 será la velocidad óptima multiplicada por el multiplicador de velocidad de retroalimentación calculada de la misma manera y con el mismo razonamiento que al calcularse para el compresor 12 del aparato 1 en el ciclo analizado anteriormente.

Aunque la presente invención se ha descrito con referencia a una forma de realización preferida, como ocurrirá con los expertos en la técnica, pueden realizarse numerosos cambios, adiciones y omisiones dentro del alcance de la invención que se define en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para controlar la velocidad de un compresor centrífugo dentro de un aparato de adsorción por cambio de presión al vacío, comprendiendo dicho procedimiento:
- 5 medir y calcular un parámetro que puede referirse a un caudal de gas que ingresa a un compresor centrífugo el compresor centrífugo accionado directamente por un motor eléctrico que tiene una velocidad controlada por un variador de frecuencia variable;
- medir y calcular una relación de presión de salida a presión de entrada del compresor centrífugo;
- 10 determinar una velocidad óptima del compresor centrífugo basándose en la relación de presión y que se encuentra a lo largo de la línea operativa de eficiencia máxima del compresor centrífugo;
- determinar un valor mínimo permisible del parámetro en el que es probable que tengan lugar condiciones de sobrecarga a la velocidad óptima;
- determinar un multiplicador de retroalimentación que cuando se multiplica por la velocidad óptima aumentará la
- 15 velocidad cuando el parámetro sea menor que el valor mínimo permisible o reducirá la velocidad cuando el parámetro sea mayor o igual al valor mínimo permisible;
- durante las etapas de un ciclo de repetición conducido por el aparato de adsorción por cambio de presión al vacío donde el compresor centrífugo tiene al menos probabilidades de encontrar condiciones de sobrecarga, que no sean una etapa de evacuación pura y una etapa de evacuación con purga de producto de la misma, estableciendo un
- 20 multiplicador de velocidad total igual al multiplicador de retroalimentación;
- durante la etapa de evacuación pura y la etapa de evacuación con purga de producto, calcular el multiplicador de velocidad total multiplicando el multiplicador de retroalimentación por un multiplicador de alimentación positiva que aumentará la velocidad durante la etapa de evacuación pura y la etapa de evacuación con etapa de purga de producto de manera que no es probable que el compresor centrífugo entre en las condiciones de sobrecarga;
- 25 calcular una velocidad ajustada multiplicando la velocidad óptima por el multiplicador de velocidad total; y, al menos durante una cierta parte del ciclo VPSA de repetición,
- generar una señal de control que puede referirse al menos a la velocidad ajustada e introducir la señal de control en el variador de frecuencia variable de modo que el motor eléctrico y, por lo tanto, el compresor centrífugo, funcione a la velocidad ajustada.
- 30
2. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde:
- el aparato de adsorción por cambio de presión al vacío utiliza un solo compresor para alimentar gas comprimido a un lecho adsorbente y para evacuar los gases del lecho adsorbente;
- 35 el ciclo de repetición incluye una etapa de alimentación con equalización posterior a la etapa de evacuación con purga de producto, una etapa de alimentación con represurización de producto después de la etapa de alimentación con equalización y una etapa de equalización antes de la etapa de evacuación pura; y
- durante la etapa de alimentación con equalización, la etapa de equalización y el inicio de la etapa de alimentación con represurización de producto, la señal de control puede hacer referencia a una velocidad no operativa, de modo que
- 40 cuando la señal de control se ingresa en el variador de frecuencia variable, no se aplica energía eléctrica al motor eléctrico; y
- cuando se obtiene una relación de presión predeterminada durante la etapa de alimentación con represurización de producto, la señal de control se puede referir de nuevo a la velocidad ajustada de modo que el motor eléctrico y, por lo tanto, el compresor funcione a la velocidad ajustada.
- 45
3. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde:
- el aparato de adsorción por cambio de presión al vacío utiliza un compresor de alimentación para alimentar gas comprimido a los lechos de adsorción del aparato de adsorción por cambio de presión al vacío y un compresor de
- 50 evacuación para evacuar gases de los lechos de adsorción, donde dicho compresor de evacuación es un compresor centrífugo al que se aplica el procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1; y
- donde el ciclo de repetición incluye una etapa de equalización de presión descendente y una etapa de equalización de presión ascendente posterior a la etapa de evacuación con purga de producto;
- 55 durante la etapa de equalización de presión descendente y la etapa de equalización de presión ascendente, la señal de control puede referirse a una velocidad no operativa, de manera que no se aplica potencia eléctrica al motor eléctrico que acciona el compresor de evacuación; y
- cuando se obtiene una relación de presión predeterminada durante la etapa de equalización de presión descendente, la señal de control puede referirse de nuevo a la velocidad ajustada, de manera que el compresor de evacuación
- 60 funcione a la velocidad ajustada.

4. El procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde:

5 cada vez que se determina el multiplicador de retroalimentación, se almacena el multiplicador de retroalimentación;
 cuando el parámetro es menor que el valor mínimo permisible, el multiplicador de retroalimentación se determina añadiendo a un último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación un factor de corrección de velocidad;
 y
 cuando el parámetro es mayor o igual que el valor mínimo permisible, el multiplicador de velocidad de retroalimentación se calcula dividiendo el último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación por una constante de proporcionalidad, la constante de proporcionalidad se establece igual a un valor mayor de 1,0 cuando el último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación es mayor o igual a 1,0 o 1,0 cuando el último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación es menor de 1,0.

5. El procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, donde:

15 el multiplicador de alimentación positiva es una función de la relación de presión;
 teniendo la función un valor máximo del multiplicador de alimentación positiva a una relación de presión predeterminada a la cual o directamente antes de la cual las condiciones de sobrecarga tienen probabilidad de ocurrir durante una transición entre la etapa de evacuación y la etapa de purga y valores decrecientes del multiplicador de alimentación positiva a las relaciones de presión superiores o inferiores a la relación de presión predeterminada; y
 20 el valor máximo tiene una magnitud preseleccionada de modo que cuando el valor máximo se multiplica por la velocidad óptima a la relación de presión predeterminada, la velocidad resultante evitará que se produzcan condiciones de sobrecarga.

25 6. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, donde:

el parámetro es una diferencia de presión medida en dos puntos en la envolvente del compresor centrífugo que están sucesivamente más cerca de un impulsor del mismo;
 durante cada uno de los intervalos de tiempo, se calcula y almacena un error de diferencia de presión restando el
 30 valor mínimo permisible del valor actual de la diferencia de presión; y
 el factor de corrección de velocidad del multiplicador de retroalimentación se calcula durante cada uno de los intervalos de tiempo a través del control integral proporcional que comprende añadir un término proporcional a un término integral, estando el término proporcional calculado multiplicando un factor de ganancia por una diferencia entre el error de diferencia de presión y un error de diferencia de presión anterior calculado en un intervalo de tiempo anterior y
 35 dividiendo la diferencia por el intervalo de tiempo y el término integral calculado dividiendo el factor de ganancia por un tiempo de restablecimiento integral y multiplicando un cociente resultante del mismo por el error de diferencia de presión.

7. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, donde:

40 el multiplicador de alimentación positiva es una función gaussiana de la relación de presión;
 teniendo la función gaussiana un valor máximo del multiplicador de alimentación positiva a una relación de presión predeterminada a la cual o directamente antes de la cual el compresor centrífugo entra en condiciones de sobrecarga durante una transición entre la etapa de evacuación y la etapa de purga, y los valores decrecientes del multiplicador
 45 de alimentación positiva a relaciones de presión superiores o inferiores a la relación de presión predeterminada; y
 el valor máximo tiene una magnitud preseleccionada de modo que cuando el valor máximo se multiplica por la velocidad óptima a la relación de presión predeterminada, la velocidad resultante evitará que el compresor centrífugo entre en condiciones de sobrecarga.

50 8. Un sistema de control para controlar la velocidad del compresor centrífugo (12) dentro de un aparato de adsorción por cambio de presión al vacío (1), comprendiendo dicho sistema de control:

medios (44, 46) para detectar un parámetro que puede referirse a un caudal de gas que entra en un compresor centrífugo accionado directamente por un motor eléctrico (38) que tiene una velocidad controlada por un variador de
 55 frecuencia variable (40);
 transductores de presión (44, 48) posicionados para detectar la presión en una entrada y una salida del compresor centrífugo;
 un controlador (42) que responde a los medios de detección de parámetros, los transductores de presión y las etapas de un ciclo de repetición conducido por el aparato de adsorción por cambio de presión al vacío y que tiene un programa
 60 de control programado para:

- calcular una relación de presión de las presiones de la salida a la entrada del compresor centrífugo;
 determinar una velocidad óptima del compresor centrífugo basándose en la relación de presión y que se encuentra a lo largo de la línea operativa de eficiencia máxima del compresor centrífugo;
 determinar un valor mínimo permisible del parámetro en el que es probable que tengan lugar condiciones de sobrecarga a la velocidad óptima;
- 5 determinar un multiplicador de retroalimentación que cuando se multiplica por la velocidad óptima aumentará la velocidad cuando el parámetro sea menor que el valor mínimo permisible o reducirá la velocidad cuando el parámetro sea mayor o igual al valor mínimo permisible;
- ajustar un multiplicador de velocidad total igual al multiplicador de retroalimentación durante las etapas del ciclo de repetición donde es al menos probable que el compresor centrífugo entre en condiciones de sobrecarga, diferentes a una etapa de evacuación pura y una etapa de purga de producto del mismo;
- 10 ajustar el multiplicador de velocidad total igual a un producto matemático del multiplicador de retroalimentación y un multiplicador de alimentación positiva durante la etapa de evacuación pura y la etapa de evacuación con purga de producto, que aumentará la velocidad de tal manera que es probable que el compresor centrífugo no entre en las condiciones de sobrecarga; y
- 15 calcular una velocidad ajustada multiplicando la velocidad óptima por el multiplicador de velocidad total; y el controlador configurado para generar, al menos durante una cierta parte del ciclo VPSA de repetición, una señal de control en respuesta al programa de control y capaz de servir como una entrada en el variador de frecuencia variable de tal manera que la velocidad del motor eléctrico y, por lo tanto, el compresor centrífugo, se controla en respuesta a la señal de control, la señal de control se refiere al menos a la velocidad ajustada de manera que el motor eléctrico y, por lo tanto, el compresor centrífugo funciona a la velocidad ajustada.
- 20
9. El sistema de control de acuerdo con la reivindicación 8, donde
- 25 el aparato de adsorción por cambio de presión al vacío utiliza un solo compresor para alimentar gas comprimido a un lecho adsorbente y para evacuar los gases del lecho adsorbente;
 el ciclo de repetición incluye una etapa de alimentación con ecualización posterior a la etapa de evacuación con purga de producto, una etapa de alimentación con represurización de producto después de la etapa de alimentación con ecualización y una etapa de ecualización antes de la etapa de evacuación pura;
- 30 el programa de control está programado para producir una velocidad no operativa a la cual el variador de frecuencia variable eliminará la energía eléctrica del motor eléctrico y la señal de control se puede referir a la velocidad no operativa cuando es producida por el programa de control;
 durante la etapa de alimentación con ecualización, la etapa de ecualización y el inicio de la etapa de alimentación con represurización de producto, el programa de control produce la velocidad no operativa, de modo que cuando la señal de control se ingresa en el variador de frecuencia variable, no se aplica energía eléctrica al motor eléctrico; y
- 35 el programa de control también está programado de tal forma que, cuando se obtiene una relación de presión predeterminada de la relación de presión durante la etapa de alimentación con represurización de producto, la señal de control se puede referir de nuevo a la velocidad ajustada de modo que el motor eléctrico y, por lo tanto, el compresor funcione a la velocidad ajustada.
- 40
10. El sistema de control de acuerdo con la reivindicación 8, donde:
- el aparato de adsorción por cambio de presión al vacío utiliza un compresor de alimentación para alimentar gas comprimido a los lechos de adsorción del aparato de adsorción por cambio de presión al vacío y un compresor de evacuación para evacuar gases de los lechos de adsorción, en el que dicho compresor de evacuación es un compresor centrífugo, cuya velocidad se controla por el sistema de control de acuerdo con la reivindicación 8;
- 45 donde el ciclo de repetición incluye una etapa de ecualización de presión descendente y una etapa de ecualización de presión ascendente posterior a la etapa de evacuación con purga;
 el programa de control está programado para producir una velocidad no operativa a la cual el variador de frecuencia variable eliminará la energía eléctrica del motor eléctrico y la señal de control se puede referir a la velocidad no operativa cuando es producida por el programa de control;
- 50 durante la etapa de ecualización de presión descendente y la etapa de ecualización de presión ascendente, el programa de control produce una velocidad no operativa tal que cuando la señal de control se ingresa en el variador de frecuencia variable, no se aplica energía eléctrica al motor eléctrico que acciona el compresor de evacuación; y el programa de control también está programado de tal manera que cuando se obtiene una relación de presión predeterminada de la relación de presión durante la etapa de ecualización de presión descendente, la señal de control puede hacer referencia de nuevo a la velocidad ajustada de tal manera que el motor eléctrico y, por lo tanto, el compresor de evacuación funciona a la velocidad ajustada.
- 55
- 60 11. El sistema de control de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, donde el programa de

control se programa de tal manera que:

5 cada vez que se determina el multiplicador de retroalimentación, se almacena el multiplicador de retroalimentación; cuando el parámetro es menor que el valor mínimo permisible, el multiplicador de retroalimentación se determina añadiendo a un último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación un factor de corrección de velocidad; y
 10 cuando el parámetro es mayor o igual que el valor mínimo permisible, el multiplicador de velocidad de retroalimentación se determina dividiendo el último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación por una constante de proporcionalidad, la constante de proporcionalidad se establece igual a un valor mayor de 1,0 cuando el último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación es mayor o igual a 1,0 o 1,0 cuando el último valor almacenado del multiplicador de retroalimentación es menor de 1,0.

12. El sistema de control de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, donde el programa de control se programa de tal manera que:

15 el multiplicador de alimentación positiva es una función de la relación de presión; teniendo la función un valor máximo del multiplicador de alimentación positiva a una relación de presión predeterminada a la cual o directamente antes de la cual el compresor centrífugo entra en condiciones de sobrecarga durante una transición entre la etapa de evacuación y la etapa de purga, y los valores decrecientes del multiplicador
 20 de alimentación positiva a relaciones de presión superiores o inferiores a la relación de presión predeterminada; y el valor máximo tiene una magnitud preseleccionada de modo que cuando el valor máximo se multiplica por la velocidad óptima a la relación de presión predeterminada, la velocidad resultante evitará que el compresor centrífugo entre en condiciones de sobrecarga.

25 13. El sistema de control de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, donde:

los medios de detección de parámetros son dos transductores de presión adicionales situados en dos puntos en la envolvente del compresor centrífugo que están sucesivamente más cerca de un impulsor del mismo;
 el programa de control está programado para calcular una diferencia de presión de la presión medida por los otros
 30 dos transductores de presión; y el parámetro es la diferencia de presión.

14. El sistema de control de acuerdo con la reivindicación 11, donde:

35 los medios de detección de parámetros son dos transductores de presión adicionales situados en dos puntos en la envolvente del compresor centrífugo que están sucesivamente más cerca de un impulsor del mismo; el programa de control está programado para calcular una diferencia de presión de la presión medida por los otros dos transductores de presión; el parámetro es la diferencia de presión; y
 40 el programa de control está programado de tal manera que; durante cada uno de los intervalos de tiempo, se calcula y almacena un error de diferencia de presión restando el valor mínimo permisible del valor actual de la diferencia de presión; y el factor de corrección de velocidad del multiplicador de retroalimentación se calcula durante cada uno de los intervalos de tiempo a través del control integral proporcional que comprende añadir un término proporcional a un término
 45 integral, estando el término proporcional calculado multiplicando un factor de ganancia por una diferencia entre el error de diferencia de presión y un error de diferencia de presión anterior calculado en un intervalo de tiempo anterior y dividiendo la diferencia por el intervalo de tiempo y el término integral calculado dividiendo el factor de ganancia por un tiempo de restablecimiento integral y multiplicando un cociente resultante del mismo por el error de diferencia de presión.

50 15. El sistema de control de acuerdo con la reivindicación 14, donde el programa de control se programa de tal manera que:

el multiplicador de alimentación positiva es una función gaussiana de la relación de presión;
 55 teniendo la función gaussiana un valor máximo del multiplicador de alimentación positiva a una relación de presión predeterminada a la cual o directamente antes de la cual el compresor centrífugo entra en condiciones de sobrecarga durante una transición entre la etapa de evacuación y la etapa de purga, y los valores decrecientes del multiplicador de alimentación positiva a relaciones de presión superiores o inferiores a la relación de presión predeterminada; y el valor máximo tiene una magnitud preseleccionada de modo que cuando el valor máximo se multiplica por la
 60 velocidad óptima a la relación de presión predeterminada, la velocidad resultante evitará que el compresor centrífugo

entre en condiciones de sobrecarga.

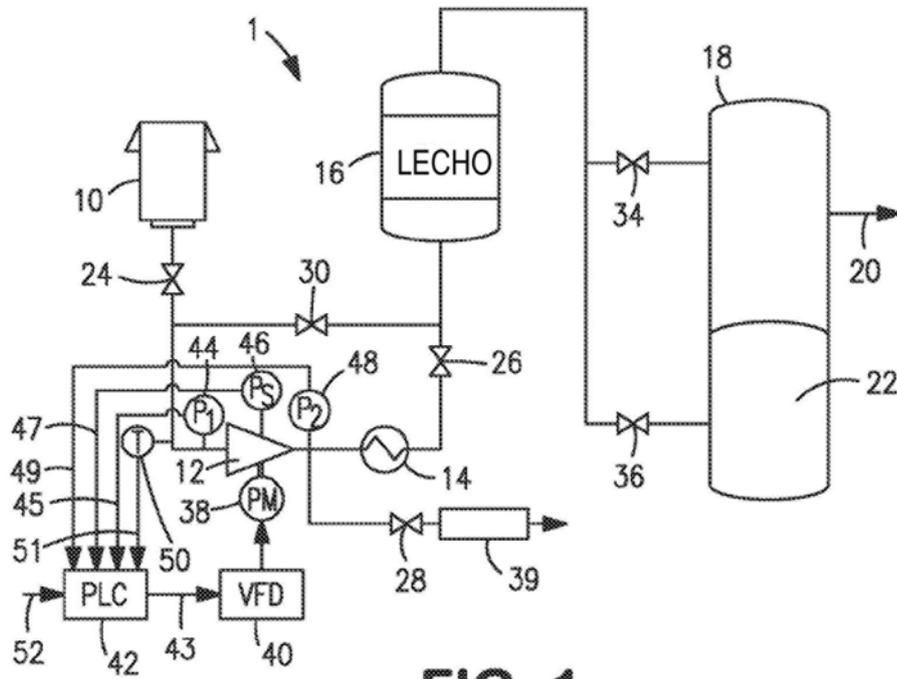


FIG. 1

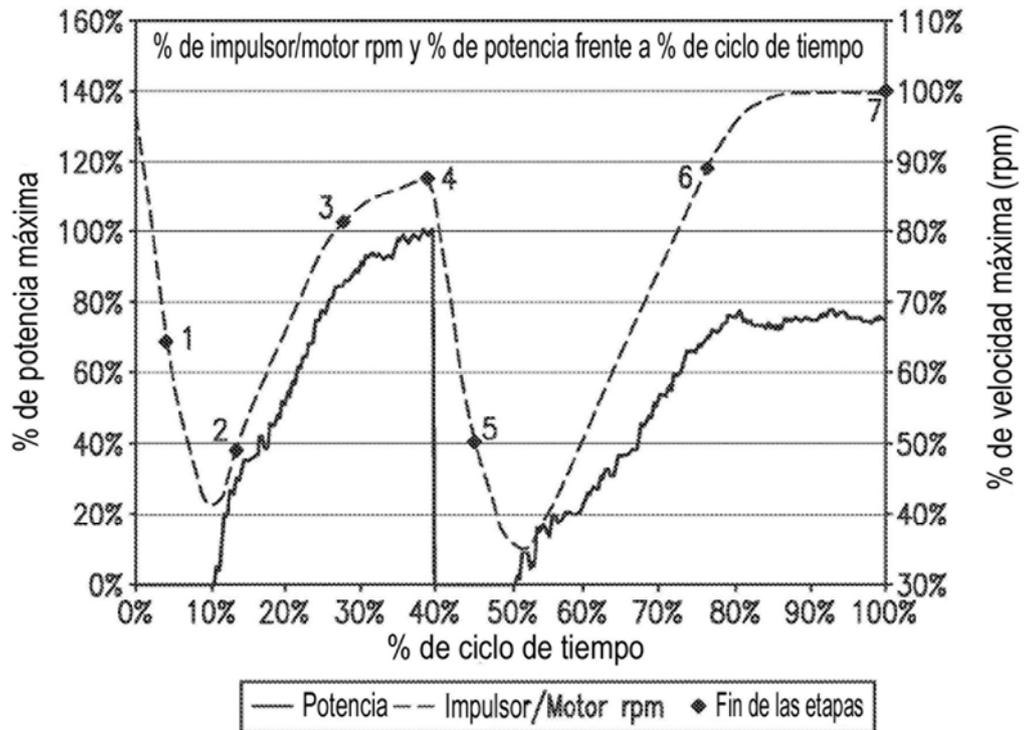


FIG. 2

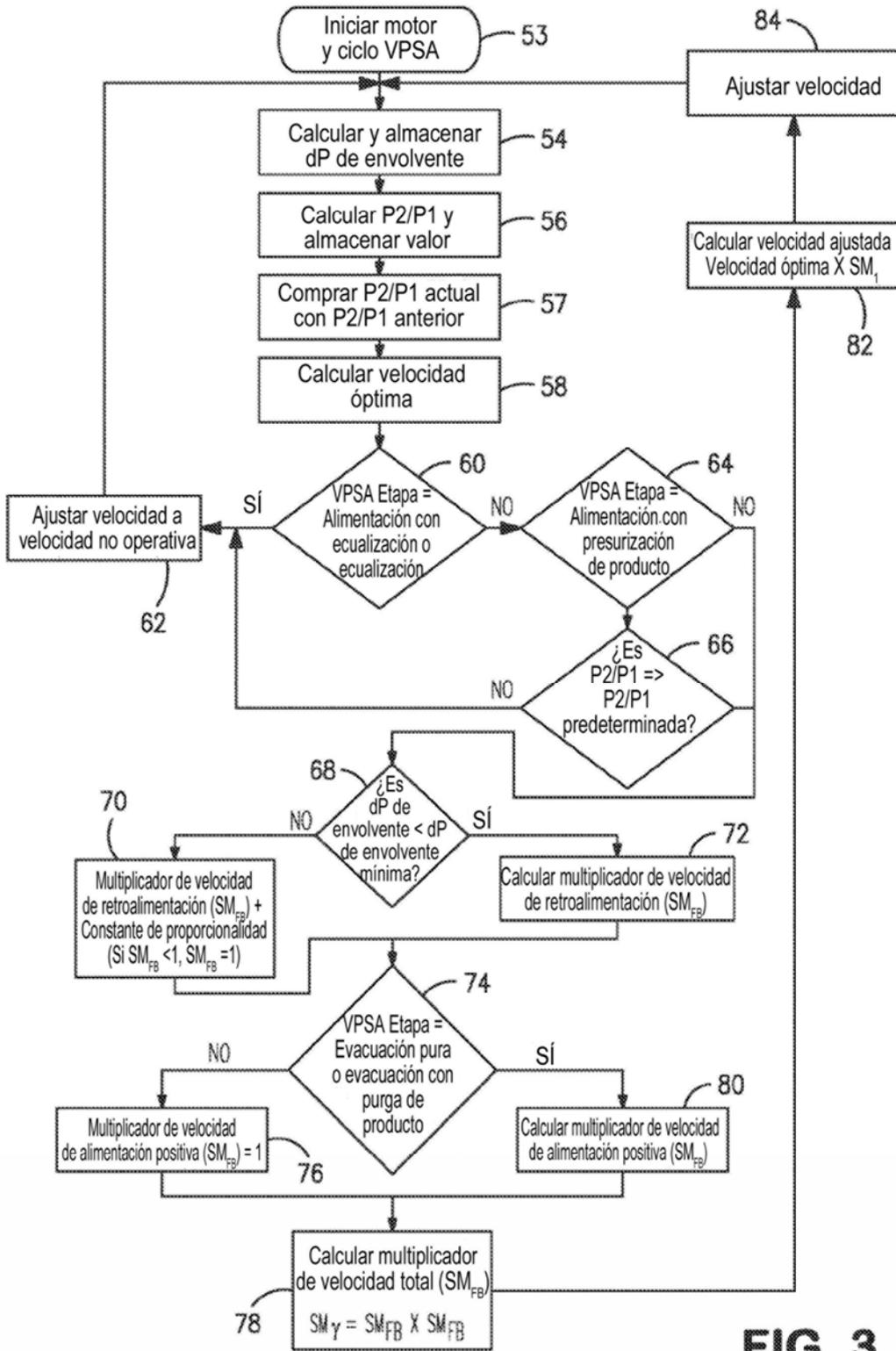


FIG. 3

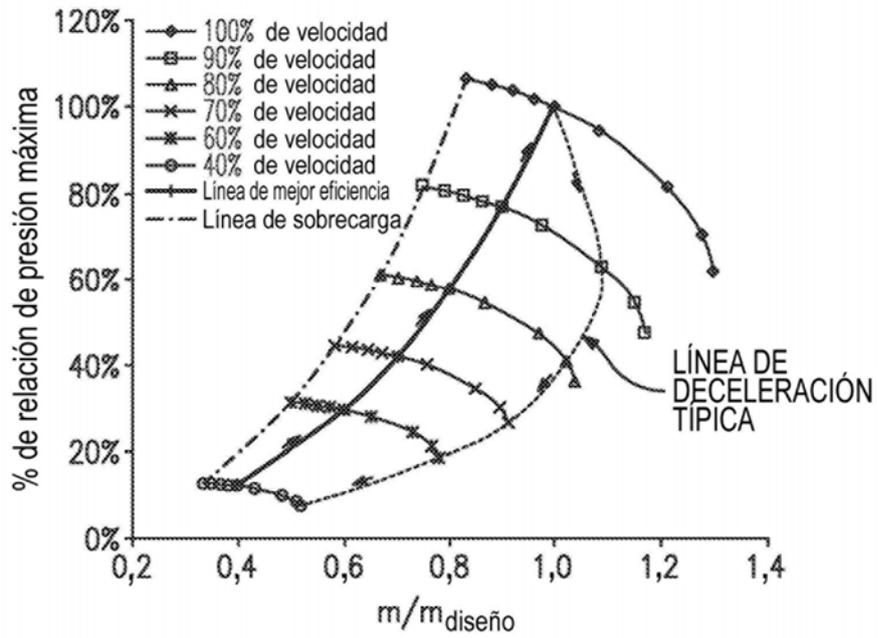


FIG. 4

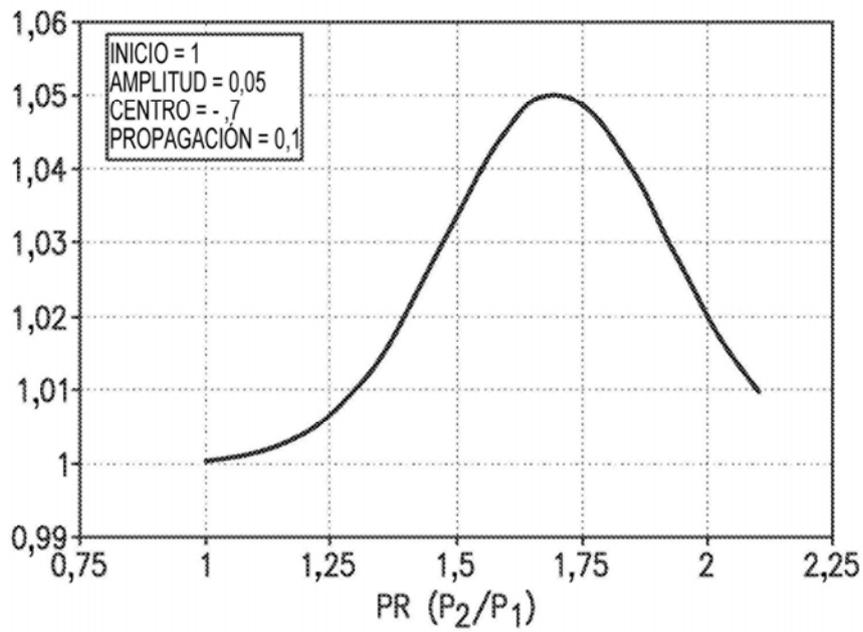


FIG. 5

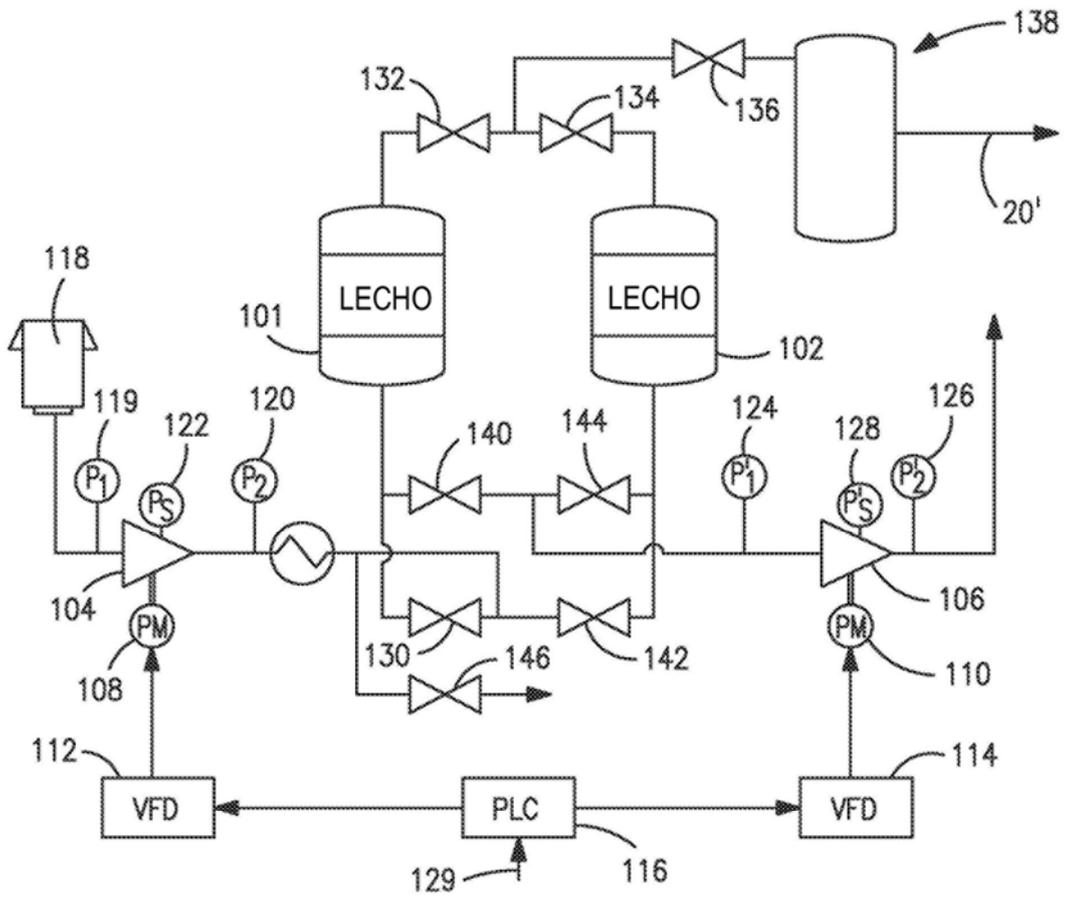


FIG. 6

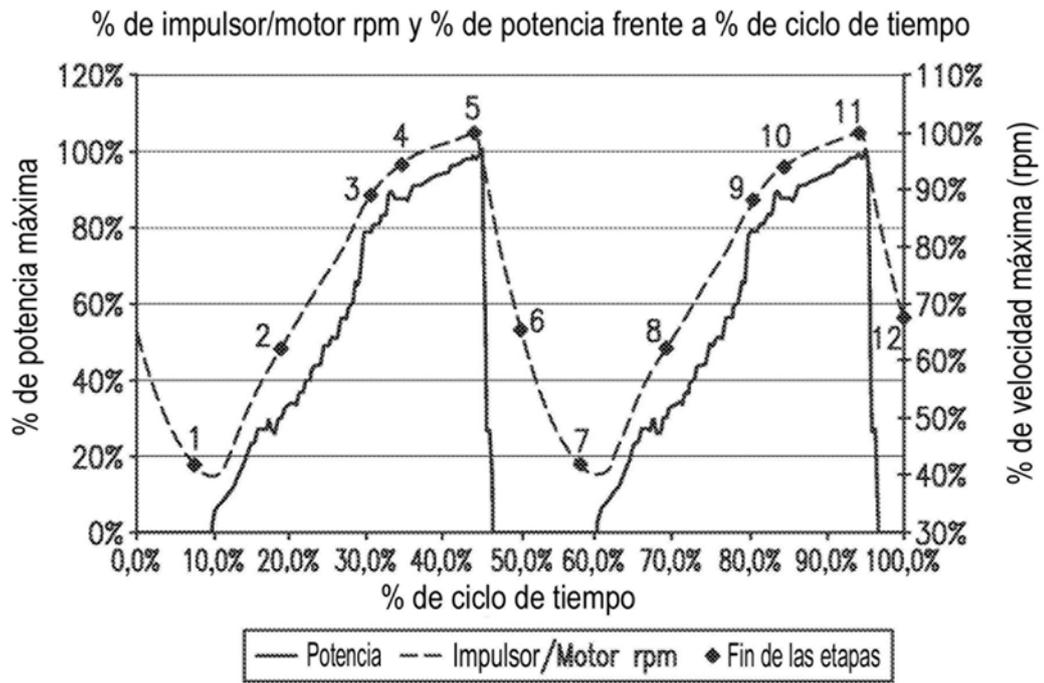


FIG. 7

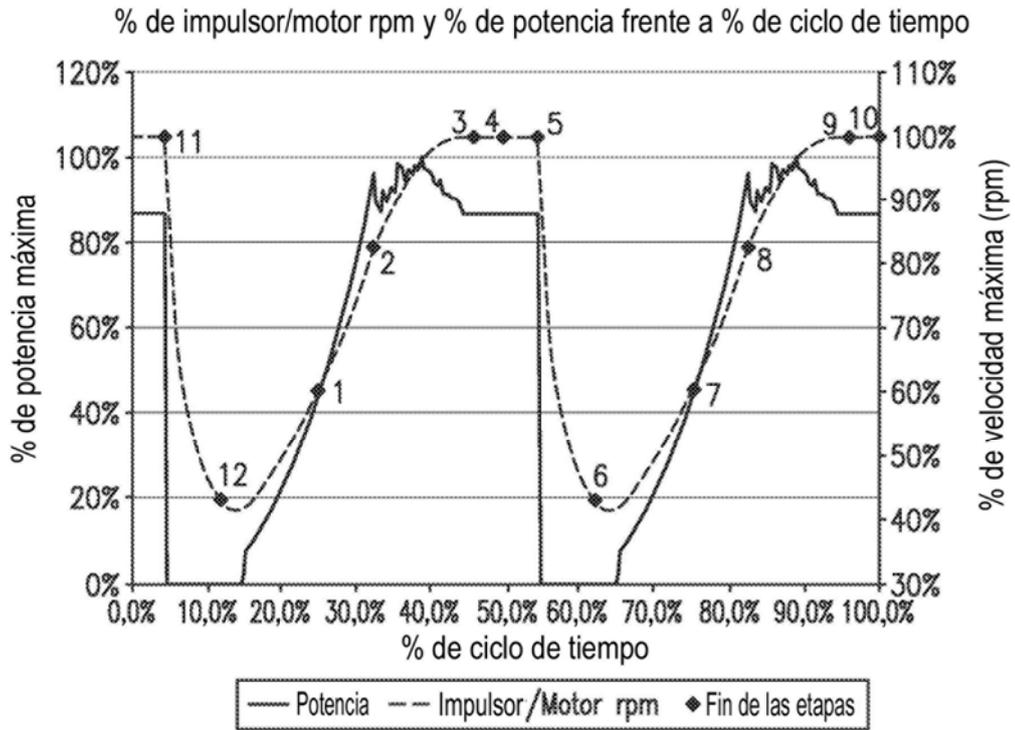


FIG. 8