

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 529 198**

51 Int. Cl.:

B01D 53/047 (2006.01)

B01D 53/04 (2006.01)

F04D 27/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **24.03.2009 E 09723873 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.01.2015 EP 2285469**

54 Título: **Sistema y métodos para la separación de gas PSA utilizando un compresor centrífugo con motor de imán permanente de alta velocidad**

30 Prioridad:

27.03.2008 US 56887

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

17.02.2015

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**MANNING, MICHAEL, S.;
SMOLAREK, JAMES;
ABDELWAHAB, AHMED y
CHINTA, MURALI**

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 529 198 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

Sistema y métodos para la separación de gas PSA utilizando un compresor centrífugo con motor de imán permanente de alta velocidad

5 Campo técnico
La presente invención se refiere, en general, a procesos y sistemas de separación de gas utilizando motores de imán permanente de alta velocidad con un control de la velocidad del motor de frecuencia variable y compresores centrífugos para presurizar y/o evacuar recipientes adsorbentes dentro de tales sistemas.

10 Antecedentes de la Invención
Las separaciones de un gas de una mezcla con otros gases son procesos industriales importantes. En tales procesos el objetivo puede ser obtener un producto gaseoso potenciado en un gas particular o un producto a partir del cual se ha retirado un constituyente indeseado del mismo. Por ejemplo, hay procesos a escala comercial para separar aire para obtener nitrógeno, oxígeno y argón y para purificación de aire.

15 Más específicamente, la separación de aire puede conseguirse utilizando procesos de adsorción, en particular los tipos absorción con presión oscilante (PSA) y absorción con presión oscilante a vacío (VPSA). En los procesos PSA y VPSA, se bombea aire comprimido a través de un lecho fijo de un adsorbente que presenta una preferencia de adsorción por uno de los constituyentes principales, con lo que se obtiene una corriente de producto efluente potenciada en el constituyente no adsorbido (o menos adsorbido). En comparación con los procesos criogénicos, los procesos de adsorción para separación de aire requieren un equipo relativamente simple y son relativamente fáciles de mantener. Sin embargo, los procesos de adsorción típicamente tienen una menor recuperación de producto que muchos procesos criogénicos. Por esta razón, las mejoras en los procesos de adsorción siguen siendo objetivos importantes. Un medio principal de mejora es el descubrimiento y desarrollo de mejores adsorbentes. Algunos de tales adsorbentes han conducido a tiempos de ciclo reducidos dentro de un proceso de adsorción dado.

20 Sigue habiendo una demanda de plantas de PSA y VPSA con menor consumo de potencia. El proceso básico emplea un adsorbente selectivo para retirar al menos un componente de una mezcla de gas, empleando cuatro etapas de proceso básicas: (1) adsorción, (2) despresurización, (3) purga y (4) represurización. La mezcla de gas que contiene el componente más fácilmente adsorbible y un componente menos fácilmente adsorbible se hace pasar a través de al menos un lecho adsorbente capaz de adsorber selectivamente el componente más fácilmente adsorbible a una presión de adsorción (superior) predeterminada. La corriente de gas que sale del lecho a esta presión superior se concentra ahora en el componente menos fácilmente adsorbible y se retira, por ejemplo, como producto. Cuando el lecho queda saturado con el componente fácilmente adsorbible, el lecho posteriormente se despresuriza a una menor presión de desorción para desorber el componente fácilmente adsorbible, y este gas después se descarga del sistema. Algunos procesos pueden incluir etapas adicionales tales como eualización y presurización del producto.

30 En el documento US-A-5 555 749 se describe un método y aparato para utilizar un compresor centrífugo durante la parte de escape del ciclo en un recipiente a presión utilizado para separar componentes de una mezcla gaseosa por oscilación de presión o adsorción con oscilación a vacío. La entrada de energía al motor de un compresor de motor accionado eléctricamente se minimiza en el momento en el que se inicia la parte de escape del ciclo, permitiendo la rotación de la rueda del compresor para desacelerar por contacto con los componentes gaseosos adsorbidos hasta que la velocidad de rotación de las ruedas del compresor coinciden con la relación de compresión eficiente para el compresor y reactivando después el motor para aumentar la velocidad de rotación de la rueda del compresor de acuerdo con la curva de mejor eficiencia para dicho compresor hasta que se consigue una relación de presión completa de la salida a la entrada a través de dicho compresor.

35 En el documento GB-A-2 003 742 se describe un sistema de suministro de fluido que incluye una planta de adsorción con oscilación de presión, por ejemplo suministrando un gas rico en oxígeno a un reactor de lodos activados en una planta de aguas residuales. El producto gaseoso de la planta se suministra al aparato de utilización mediante un compresor a una velocidad dependiente de la demanda de gas, mientras que el gas residual se desorbe de la planta mediante una bomba de vacío. Cuando se utiliza la planta para separar oxígeno de una materia prima de aire la mayor proporción de la potencia consumida por la planta está representada por la bomba de vacío, que tiene que impulsar sustancialmente mayores volúmenes de gas que el compresor de producto. Para economizar la potencia consumida por la planta, la velocidad de suministro de la bomba de vacío se controla por medios que son sensibles a la demanda de la utilización del aparato para el gas producto, de manera que una reducción en la demanda del compresor de producto conduce a una reducción en el consumo de potencia de la bomba de vacío.

40 Los procesos PSA y VPSA convencionales emplean soplantes de desplazamiento positivo de tipo rotatorio, ya sea para presurización de gas o para evacuación en un lecho adsorbente. Estas soplantes de lóbulos rotativos convencionales típicamente tienen menores eficiencias y mayores costes de mantenimiento que los compresores centrífugos, pero se adaptan bastante bien a la naturaleza oscilatoria de los ciclos de presión oscilante. La Figura 1 muestra un historial de presión ejemplar de una demanda de presión de una soplante de alimentación para un ciclo VPSA y la Figura 2 muestra un historial de presión ejemplar de una demanda de presión de una soplante de vacío

para un ciclo VPSA. Una característica atractiva de las soplantes de lóbulos rotativos relacionada con un proceso de adsorción es que el consumo de potencia es proporcional a los requisitos de presión del sistema. El consumo de potencia teórico de la soplante es directamente proporcional al diferencial de presión del sistema (es decir, tiene una relación lineal entre el consumo de potencia y la presión). Esta respuesta de potencia lineal respecto a los requisitos de presión del sistema ha hecho que las soplantes de lóbulos rotativos sean el equipo de compresión de elección para la industria de PSA y VPSA. Sin embargo, las soplantes de lóbulos rotativos crean fuertes pulsaciones de presión en el sistema. Sin la mitigación apropiada, se sabe que las pulsaciones de presión de las soplantes de lóbulos rotativos provocan daños estructurales graves en los equipos de proceso aguas abajo. Aunque normalmente se utilizan recipientes que amortiguan la pulsación con soplantes de lóbulos rotativos, estos no eliminan el desajuste completamente, y siempre está presente un nivel de pulsación de presión considerable en el sistema.

En el pasado, se han considerado los compresores centrífugos a velocidades fijas con y sin álabes guía de entrada (IGV) y con un impulsor de frecuencia variable (VFD) para procesos PSA y VPSA debido a su mayor eficiencia cuando se comparan con las soplantes de lóbulos rotativos convencionales. La Figura 3 ilustra una disposición de sistema de compresor centrífugo convencional típico. Una caja de cambios 10 con un sistema de aceite lubricante 11 típicamente es necesaria para convertir la baja velocidad del motor de inducción (IM) 12 a la alta velocidad del compresor centrífugo 1, y el compresor centrífugo necesita funcionar a altas velocidades para una alta eficiencia. Para utilizar más eficazmente los compresores centrífugos en ciclos de presión oscilante altamente dinámicos, es necesario emplear IGV, un control de velocidad variable o una combinación de los dos. A medida que la presión del ciclo PSA o VPSA se desvía de la condición de presión diseñada de un compresor centrífugo de velocidad fija, la eficiencia de fase se deteriora sustancialmente, especialmente cuando se trabaja a relaciones de presión cercanas a 1 (estrangulamiento). Esto da como resultado un aumento del consumo de la potencia promedio y un deterioro de la eficiencia global promedio del compresor durante el ciclo PSA o VPSA. Sin embargo, variando continuamente las velocidades del compresor para hacer coincidir el requisito de cabeza de ambos lechos adsorbentes de presurización y de evacuación, el compresor puede funcionar teóricamente a sus eficiencias pico desde 100 % de la velocidad de diseño hasta una velocidad sustancialmente menor. El consumo de potencia resultará muy pequeño y, por tanto, la economía de potencia promedio y la eficiencia global del ciclo mejoran drásticamente respecto a las soplantes de lóbulos rotativos.

Aun así, esta tecnología no podía emplearse satisfactoriamente en el pasado. El uso de compresores centrífugos de velocidad fija convencionales con y sin IGV no es ideal debido a su intervalo operativo limitado. Un compresor centrífugo de velocidad variable convencional puede tener un intervalo operativo mejorado y ahorros de energía mejorados respecto al uso de IGV con una reducción en el flujo, pero es incapaz de adaptarse rápidamente a las condiciones de flujo transitorio del ciclo PSA o VPSA (debido a las grandes inercias de los engranajes y al gran motor IM que funciona de forma lenta).

En la técnica anterior, se han considerado los compresores centrífugos a velocidades fijas con y sin IGV y con un VFD para los procesos PSA y VPSA.

A. Abdelwahab, "Design of A Moderate Speed-High Capacity Centrifugal Compressor with Application to PSA and VPSA Air Separation Processes", Proceedings of PWR2005 ASME Power, 5-7 abril, 2005, analiza los fundamentos del ciclo VPSA que hacen uso de una velocidad moderada directa acoplada a compresores centrífugos con álabes guía de entrada.

Han tenido lugar diversos avances en los procesos PSA y VPSA en los últimos años. Algunos de estos avances incluyen: (a) una reducción significativa en la relación de presión de adsorción superior a presión de desorción inferior y (b) reducciones en el tiempo de ciclo (típicamente menores de un minuto) que conducen a inventarios de adsorbente reducidos. Un factor significativo para el requisito de energía total de un proceso PSA o VPSA es esta relación de presiones de adsorción a desorción. La presión de suministro durante el periodo de adsorción de un lecho por el dispositivo de compresión de aire de alimentación, así como la presión de succión durante el periodo de desorción mediante un dispositivo de evacuación, está cambiando constantemente a medida que progresa el ciclo. Para conseguir el consumo de potencia total más bajo o posible para un ciclo tal como este, es deseable que los dispositivos de compresión de alimentación y evacuación funcionen a una eficiencia pico durante un amplio intervalo de relaciones de presión.

Compendio de la Invención

La presente invención es un sistema para separación de gas como se define en la reivindicación 1 y un proceso para separación de gas como se define en la reivindicación 9. En particular, la presente invención se refiere a la aplicación de motores de velocidad variable de imán permanente de alta velocidad en sistemas PSA o VPSA. Los diseños que incorporan tales motores funcionan a una eficiencia óptima permitiendo la aceleración o desaceleración de los aparatos del sistema a velocidades iguales a o que superan los tiempos de ciclo (por ejemplo, aproximadamente 30-35 segundos) de los sistemas y procesos PSA y VPSA actuales. La presente invención se refiere más particularmente a procesos y sistemas de separación de gas tales como sistemas PSA o VPSA que tienen al menos un recipiente que contiene al menos un lecho adsorbente en su interior. El lecho adsorbente incluye al menos un material adsorbente. Al menos un lecho adsorbente se presuriza cíclicamente mediante al menos un compresor de alimentación y, en ocasiones, se evacua mediante al menos un compresor de vacío, siendo al menos

uno de el al menos un compresor de alimentación o el al menos un compresor de vacío un compresor centrífugo accionado por un motor de imán permanente (PM) de alta velocidad asociado diseñado para funcionamiento a velocidad variable. El compresor que no es un compresor centrífugo puede ser una soplante de lóbulos rotativos accionada por un motor de inducción (IM). En algunas realizaciones de la presente invención, el al menos un lecho adsorbente se presuriza cíclicamente mediante al menos un compresor centrífugo de alimentación impulsado por un motor de velocidad variable de imán permanente de alta velocidad y, se evacua mediante al menos un compresor centrífugo de vacío accionado por un motor de velocidad variable de imán permanente de alta velocidad asociado. Más específicamente y de acuerdo con la presente invención, el compresor o compresores de alimentación centrífuga y/o el compresor o compresores de vacío centrífugo son accionados por motores de imán permanente (PM) de alta velocidad impulsados de forma directa para funcionamiento a velocidad variable de manera que la combinación o combinaciones de compresor y motor de imán permanente de alta velocidad puede acelerarse desde una baja velocidad hasta una alta velocidad y desacelerarse desde una alta velocidad hasta una baja velocidad a velocidades rápidas requeridas en los tiempos de ciclo corto (por ejemplo, aproximadamente 30 segundos) de los sistemas y procesos PSA o VPSA actuales.

El uso de motores de imán permanente de alta velocidad de control de velocidad variable de acuerdo con la presente invención permite una mejora de un orden de magnitud respecto a los sistemas de motor de inducción/caja de cambios convencionales en su capacidad de acelerar y ralentizar un compresor centrífugo en un proceso PSA o VSA. Utilizar motores de imán permanente de alta velocidad de acuerdo con la invención permite la eliminación de la necesidad de cajas de cambio y, de esta manera, permite igualmente la eliminación de la necesidad de sistemas de aceite lubricante. Por tanto, el compresor o compresores centrífugos pueden estar soportados sobre cojinetes sin aceite. Adicionalmente, en algunas realizaciones, se espera que los sistemas impulsores propuestos de la presente invención sean más eficientes en más de 7 puntos porcentuales con la eliminación de los engranajes y pérdidas de fricción de aceite de cojinetes, pérdidas de sistema de aceite lubricante y una capacidad mejorada de potencia de conducción/retardo. En un ejemplo hipotético, se llegó a las siguientes conclusiones cuando se evaluaba una rueda de compresor de 40,64 cm (16") con un sistema impulsor de 932 kW (1250 caballos potencia (HP)) cuando se accionaba mediante una disposición de motor de inducción-caja de cambios frente a un motor de velocidad variable de imán permanente de alta velocidad: (1) el momento de inercia de masa polar del rotor de un motor de imán permanente (PM) de alta velocidad es de aproximadamente 1/6 de el de un motor de inducción (IM); (2) la inercia del rotor de un motor PM de alta velocidad es más de un orden de magnitud menor que la de un IM más su sistema de caja de cambios (GB) asociado; (3) el sistema de motor PM y compresor puede acelerar desde un 40 % de la velocidad hasta la velocidad de diseño máxima en aproximadamente 2 segundos, mientras que el sistema de IM, GB y compresor tarda un orden de magnitud más tiempo (aproximadamente 31 segundos, debido a la diferencia de inercia significativa entre los sistemas); y (4) respecto a la desaceleración, el sistema de motor PM y compresor puede ir desde la velocidad de diseño máxima hasta el 40 % de la velocidad en aproximadamente 2 segundos. En este caso, se espera que el pico de potencia de frenado sea el mismo que la potencia nominal del motor. Sin embargo, si fuera necesario que la desaceleración fuera más rápida, entonces la potencia de frenado pico puede aumentarse mediante frenado dinámico como se analiza en la presente memoria más adelante. La rápida desaceleración necesaria para los tiempos de ciclo de los sistemas PSA o VPSA actuales típicamente no puede conseguirse con un sistema de motor de inducción convencional debido a las grandes inercias de los engranajes y el gran rotor IM que funciona de forma lenta.

En las realizaciones preferidas de la invención y como se analiza en la presente memoria, los compresores funcionan a lo largo de una línea de mejor eficiencia. La línea de mejor eficiencia es una línea dibujada en un mapa de rendimiento del compresor. Como se analiza en la presente memoria, un mapa de rendimiento del compresor (relación de presión frente a flujo másico/flujo másico_{diseño} a diversas velocidades) se genera a partir del coeficiente de trabajo isentrópico a diversas velocidades para una temperatura de entrada específica al compresor. La línea de mejor eficiencia representa las localizaciones de puntos que corresponden a todos los puntos de eficiencia pico de las curvas operativas del compresor a diferentes velocidades y condiciones de proceso (presión de entrada al compresor, presión de descarga del compresor y temperatura de entrada al compresor). Trabajando a lo largo de la línea de mejor eficiencia, el compresor o compresores pueden funcionar en su modo más eficiente en términos de consumo de potencia. El mapa o mapas de rendimiento también pueden estar en forma de tablas de consulta o referencia generadas a partir de coeficiente de trabajo isentrópico. Los mapas de rendimiento y las líneas de mejor eficiencia resultantes pueden almacenarse en un controlador lógico programable (PLC) e integrarse con los sistemas PSA y VPSA.

Breve descripción de los dibujos

Para una compresión más completa de la presente invención y las ventajas de la misma debe hacerse referencia a la siguiente descripción detallada junto con los dibujos adjuntos, en los que:

La Figura 1 es una representación gráfica de un historial de presión ejemplar de la demanda de presión de la soplante de alimentación para un ciclo VPSA.

La Figura 2 es una representación gráfica de un historial de presión ejemplar de una demanda de presión de la soplante de vacío para un ciclo VPSA.

La Figura 3 es un esquema que ilustra un compresor centrífugo con una caja de cambios y un motor de inducción.

La Figura 4 es un esquema que ilustra un compresor centrífugo con un motor de velocidad variable de imán permanente de alta velocidad de impulsión directa de acuerdo con la presente invención.

La Figura 5 es un esquema que ilustra un sistema VPSA con motores de velocidad variable de imán permanente de alta velocidad de impulsión directa y compresores centrífugos de acuerdo con una realización de la presente invención.

La Figura 6A es una representación gráfica del coeficiente de trabajo isentrópico del compresor ejemplar frente a las curvas de relación del coeficiente de flujo ($\Phi/\Phi_{\text{diseño}}$) a diferentes números de Mach del compresor.

La Figura 6B es una representación gráfica de la eficiencia de compresor ejemplar (η) frente a las curvas de relación del coeficiente de flujo ($\Phi/\Phi_{\text{diseño}}$) a diferentes números de Mach del compresor obtenidas por medición experimental del rendimiento del compresor para el compresor utilizado en la Figura 6A.

La Figura 7 es una representación gráfica de un mapa de rendimiento de compresor ejemplar (relación de presión (PR) frente a flujo másico/flujo másico_{diseño} a diversas velocidades) correspondiente a una temperatura de entrada específica.

La Figura 8 es una representación gráfica de una respuesta ejemplar de un compresor de alimentación teórica-ideal durante un ciclo VPSA típico.

La Figura 9 es una representación gráfica de una respuesta ejemplar de un compresor de alimentación hipotética-real durante un ciclo VPSA típico.

La Figura 10 es una representación gráfica de un mapa de rendimiento de compresor ejemplar utilizando un regulador de succión en la línea de la velocidad más baja.

Descripción detallada

Como se ha mencionado anteriormente, la presente invención se refiere al uso de motores de imán permanente de alta velocidad en sistemas PSA o VPSA. Como se utiliza en la presente memoria "alta velocidad" con referencia a motores de imán permanente se refiere a motores de imán permanente capaces de funcionar a velocidades mayores de 3600 RPM. El diseño y velocidad real de tales motores de alta velocidad podría variar dependiendo de los sistemas y procesos en los que el motor o motores de imán permanente se van a implementar. La presente invención se refiere más particularmente a procesos y sistemas de separación de gas, tales como sistemas PSA o VPSA, que tienen al menos un recipiente que contiene al menos un lecho adsorbente en su interior. El lecho adsorbente incluye al menos un material adsorbente. El al menos un lecho adsorbente se presuriza cíclicamente mediante al menos un compresor de alimentación y en ocasiones se evacua mediante al menos un compresor de vacío, siendo al menos uno de el al menos un compresor de alimentación o el al menos un compresor de vacío un compresor centrífugo impulsado mediante al menos un motor de velocidad variable de imán permanente (PM) de alta velocidad asociado. El compresor que no es un compresor centrífugo puede ser una soplante de lóbulos rotativos accionada por un motor de inducción (IM). En algunas realizaciones de la presente invención, el al menos un lecho adsorbente se presuriza cíclicamente mediante al menos un compresor centrífugo de alimentación impulsado por un motor de imán permanente de alta velocidad asociado y, se evacua mediante al menos un compresor centrífugo de vacío impulsado mediante al menos un motor de imán permanente de alta velocidad asociado. Más específicamente y de acuerdo con la presente invención, el compresor o compresores de alimentación centrífuga y/o el compresor o compresores de vacío centrífugo se impulsan mediante un motor o motores de imán permanente (PM) de alta velocidad de impulsión directa asociados diseñados para funcionamiento a velocidad variable, de manera que la combinación o combinaciones de compresor y motor de imán permanente pueden acelerarse desde una baja velocidad hasta una alta velocidad y desacelerarse desde una alta velocidad hasta una baja velocidad a las rápidas velocidades requeridas por los cortos tiempos de ciclo (por ejemplo, aproximadamente 30-35 segundos) de los sistemas y procesos PSA o VPSA actuales. Las disposiciones de la presente invención permiten, por tanto, que los compresores sean sensibles a las características de tiempo de ciclo corto de los sistemas y procesos PSA y VPSA actuales.

También como se ha analizado anteriormente, el uso de motores de imán permanente de alta velocidad de acuerdo con la presente invención permite una mejora de un orden de magnitud sobre los sistemas de motor de inducción/caja de cambios convencionales en su capacidad de acelerar y ralentizar un compresor centrífugo en un proceso PSA o VPSA. Utilizar motores de imán permanente de acuerdo con la invención permite la eliminación de la necesidad de cajas de cambios y, por tanto, permite análogamente la eliminación de la necesidad de sistemas de aceite lubricante. Por tanto, el compresor o compresores centrífugos pueden estar soportados sobre cojinetes sin aceite.

Aunque sin considerarla limitante, la presente invención puede implementarse en procesos y sistemas de separación de gas tales como procesos PSA o VPSA que separan un gas, tal como aire en oxígeno y nitrógeno. Otros procesos de separación de gas que pueden beneficiarse del uso de las combinaciones de compresor-motor de imán permanente de la presente invención incluyen, aunque sin limitación, separaciones PSA y VPSA que implican la recuperación de gases tales como O₂, N₂, CO₂, H₂ o helio.

En la Figura 4 se muestra una disposición ejemplar de compresor-motor de velocidad variable PM de alta velocidad de impulsión directa adecuado para su uso de acuerdo con la invención. Tal disposición puede permitir el uso de fases de compresor centrífugas en los ciclos de PSA o VPSA. Más específicamente, la Figura 4 muestra un compresor centrífugo 1 con abertura de entrada 2 y abertura de salida 3, que conduce desde o hacia el sistema PSA o VPSA. Como se muestra adicionalmente en la Figura 4, el compresor centrífugo 1 está fijado a un motor de imán

permanente (PM) de alta velocidad 4 diseñado para funcionamiento a velocidad variable, que está conectado eléctricamente a un impulsor de frecuencia variable 5 (FVD) a través de la línea 7. La línea de referencia 6 en la Figura 4 representa el área de la Figura 3 que no se requeriría más debido fundamentalmente a la eliminación del sistema de aceite lubricante y el uso de un motor PM que es de menor tamaño que un motor de inducción.

El motor 4 puede ser un motor de imán permanente de tierras raras o de otro tipo diseñado para funcionar a velocidad variable. Tales motores están disponibles en el mercado con velocidades operativas de aproximadamente 70.000 RPM. El tamaño del motor o motores utilizados en la invención variará dependiendo del tipo de requisitos del proceso y el sistema. El tipo de máquina centrífuga no se considera limitante. El compresor centrífugo 1 puede seleccionarse a partir de cualquier compresor centrífugo capaz de funcionar en las condiciones requeridas del sistema y el proceso. Se conocen los impulsores de frecuencia variable (VFD) y son sistemas para controlar la velocidad rotacional de un motor eléctrico de corriente alterna (AC) controlando la frecuencia de la potencia eléctrica suministrada al motor.

El uso de motores de velocidad variable de imán permanente de alta velocidad para impulsar los compresores centrífugos puede ofrecer una mejora de un orden de magnitud sobre los sistemas de motor de inducción/caja de cambios convencionales en su capacidad de acelerar y ralentizar un compresor centrífugo en un proceso PSA o VPSA. Adicionalmente, se espera que los sistemas de impulsión de la presente invención sean más eficaces en más de 7 puntos porcentuales con la eliminación de las pérdidas de fricción del aceite de engranajes y de cojinetes, las pérdidas del sistema de aceite lubricante y una capacidad mejorada para potencia de conducción/retardo. En un ejemplo hipotético, se obtuvieron las siguientes conclusiones cuando se evaluaba una rueda de compresor de 40,64 cm (16") con un sistema de impulsión de 932 kW (1250 HP) cuando se impulsaba mediante una disposición de motor de inducción-caja de cambios frente a un motor de velocidad variable de imán permanente de alta velocidad: (1) el momento de inercia de la masa polar del rotor de un motor de imán permanente (PM) es aproximadamente 1/6 el de un motor de inducción (IM); (2) la inercia del rotor de un motor PM de alta velocidad es más de un orden de magnitud menor que la de un IM más su sistema de caja de cambios (GB) asociado; (3) el sistema de motor PM y compresor puede acelerarse desde un 40 % de la velocidad hasta la velocidad de diseño máxima en aproximadamente 2 segundos, mientras que el sistema de IM, GB y compresor tarda un orden de magnitud más de tiempo (aproximadamente 31 segundos, debido a la diferencia de inercia significativa entre los sistemas); y (4) respecto a la desaceleración, el sistema de motor PM y compresor puede pasar de la velocidad de diseño máxima hasta el 40 % de la velocidad en 2 segundos. En este caso, se espera que la potencia de frenado pico sea la misma que la potencia nominal del motor.

Si fuese necesario que la desaceleración fuese más rápida, entonces puede obtenerse cualquiera de frenado dinámico (la energía se alimenta a un resistor de frenado) o frenado regenerativo (la energía se alimenta de vuelta a la red eléctrica) con impulsiones de frecuencia variable en aplicaciones que requieren paradas rápidas. Este concepto de frenado dinámico o regenerativo que es factible para un sistema de motor PM no es factible con un sistema IM debido a las grandes inercias de los engranajes y el gran motor IM que funciona de forma lenta. Por lo tanto, la rápida desaceleración necesaria para los cortos tiempos de ciclo de los sistemas PSA y VPSA actuales no puede conseguirse cuando se utiliza un compresor centrífugo engranado con VFD y un motor IM.

En referencia ahora a la Figura 5, se ilustra un sistema VPSA de acuerdo con una realización de la presente invención. El sistema 20 mostrado en la Figura 5 incluye un compresor de alimentación 22, una unidad de lecho adsorbente 40 y un compresor de vacío de una sola etapa 50 para producir eficazmente un gas adsorbido menos selectivamente (por ejemplo, oxígeno del aire). Al menos uno del compresor de alimentación 22 y el compresor de vacío 50 es un compresor centrífugo impulsado directamente por un motor de imán permanente de alta velocidad. En las realizaciones preferidas, tanto el compresor de alimentación 22 como el compresor de vacío 50 se impulsan directamente mediante motores de imán permanente de alta velocidad como se describe en la presente memoria. Sin embargo, debe apreciarse que en algunas realizaciones solo uno del compresor de alimentación 22 o el compresor de vacío 50 puede ser impulsado directamente por un motor de imán permanente de alta velocidad. Los expertos en la materia deberían apreciar también que para los sistemas PSA, la soplante o compresor de vacío no se utiliza como en un sistema VPSA.

En referencia de nuevo a la Figura 5, el compresor de alimentación 22 incluye un compresor centrífugo monofásico, impulsado directamente (es decir, sin caja de cambios) por un motor de imán permanente de alta velocidad 29 que tiene una entrada 24 para dirigir un gas, tal como aire, y dirigir un flujo de aire presurizado a través de un postenfriador de aire de alimentación 27 y después a través de un colector de descarga 26 a la líneas de entrada paralelas 28, 30 respectivas.

La primera y segunda válvulas de control de presurización 32, 34 respectivas se conectan en los extremos distales de las líneas respectivas para presurizar selectivamente las porciones respectivas de la unidad de lecho adsorbente 40. Se conecta una válvula de purga 36 a una porción intermedia del colector 26 para alejar selectivamente el flujo de aire de la unidad lecho. Las válvulas se secuencian a través de un controlador lógico programable (PLC) 31 de acuerdo con la temporización correspondiente a las etapas de proceso para el método de la presente invención.

En referencia de nuevo a la Figura 5, la unidad de lecho adsorbente 40 comprende un sistema de lecho adsorbente

5 doble, teniendo el lecho A y el lecho B porciones inferiores respectivas 42, 44 dispuestas aguas abajo de la primera y segunda válvulas de control de presurización 32, 34 en una disposición paralela alternativa. Las porciones superiores respectivas 43, 45 proporcionan un interfaz conveniente para conectar un mecanismo de suministro de producto 60 que comprende un único tanque de regulación de producto 66. Como se ha mencionado anteriormente, los sistemas alternativos de acuerdo con la presente invención podrían emplear un lecho adsorbente o más de dos lechos adsorbentes.

10 Cada lecho adsorbente está contenido en un recipiente, preferentemente de tipo flujo radial. Se conocen recipientes de flujo radial e incluyen un extremo de alimentación ampliado de sección transversal asimétrica global del flujo de gas. Los recipientes de flujo en realidad se adaptan a intervalos de flujo de gas grandes y proporcionan únicamente una baja caída de presión (D_p) a través del lecho en la dirección del flujo de gas. Los recipientes de flujo radial también proporcionan una distribución de flujo más uniforme con el lecho y típicamente ofrecen un lecho adsorbente con impedimentos con un área de entrada ampliada. Sin embargo, debe observarse que pueden utilizarse en la presente invención recipientes de flujo alternativo tales como lechos axiales u horizontales.

15 El compresor de vacío 50 se conecta a la primera y segunda válvulas de control de despresurización 52, 54 respectivas que se conectan a un colector de vacío 56. Las válvulas se conectan en relación opuesta paralela a la primera y segunda válvulas de control de presurización 32, 34. Al igual que las válvulas de presurización, las válvulas de despresurización y purga se secuencian mediante el PLC 31. El colector termina en un compresor de vacío centrífugo monofásico 50, impulsado directamente por un motor de imán permanente de alta velocidad 51 diseñado para funcionamiento a velocidad variable para evacuar los lechos A y B respectivos durante las etapas de ciclo predeterminadas de acuerdo con el método de la presente invención.

20 Como puede apreciarse a partir de la Figura 5, P_1 puede permanecer constante (por ejemplo en condiciones ambiente) mientras que P_2 será sensible a las condiciones en los lechos adsorbentes (P_2 puede variar o permanecer constante durante la presurización, despresurización y durante la fabricación del producto). A medida que varía P_2 , la relación P_2/P_1 variará de forma análoga. Similarmente, P_4 puede permanecer constante (por ejemplo en condiciones ambiente) mientras que P_3 será sensible a las condiciones en los lechos adsorbentes (P_3 puede variar o permanecer constante durante la presurización, despresurización y durante las etapas de fabricación del producto). A medida que varía P_3 , la relación P_3/P_4 puede variar también. De esta manera, las relaciones de presión para los compresores de alimentación y vacío puede variar o permanecer constante basándose en las condiciones en el lecho o lechos. La retroalimentación al PLC 31 respecto a las relaciones de presión puede permitir que la velocidad operativa del compresor se ajuste apropiadamente. Por consiguiente, variando continuamente las velocidades del compresor para hacer coincidir el requisito de cabeza (es decir, la relación de presión (PR) que es variable debido a la presurización y evacuación de los lechos adsorbentes) de la presurización y evacuación de los lechos adsorbentes, los compresores pueden funcionar cerca de y, preferentemente a, sus eficiencias pico desde una velocidad de diseño del 100 % hasta una velocidad sustancialmente menor. Esto puede conseguirse utilizando la información, cálculos y mapas de rendimiento que están almacenados (es decir, modificable) en el PLC, que después envía una señal al VFD y al motor PM asociado. Se apreciará que en el sistema VPSA ejemplar para la producción de oxígeno mostrado en la Figura 5, P_4 y P_1 podrían estar a o cerca de condiciones ambiente.

45 Continuando con la referencia a la Figura 5, el mecanismo de suministro de producto 60 incluye una primera y segunda válvulas de salida de producto 62, 64 respectivas dispuestas en la parte superior de las porciones superiores 43, 45 respectivas de los lechos A y B para dirigir el flujo de producto (es decir, oxígeno) desde cada lecho para purgar el otro lecho, igualar la presión en el otro lecho o hacer fluir hacia el tanque de regulación 66 para su almacenamiento. Una válvula de aislamiento 68 interpuesta entre el tanque de regulación 66 y las válvulas de salida 62, 64 coopera con las válvulas de salida 62, 64 de acuerdo con las órdenes de secuenciación desde el controlador para efectuar los procedimientos de purga y/o eualización.

50 En la Patente de Estados Unidos N° 6.010.555 de Smolarek et al. se describe una descripción detallada del sistema VPSA para el mostrado en la Figura 5. Sin embargo, en la presente invención, al menos una o ambos de las disposiciones de soplante de lóbulos rotativos descritas en la Patente de Estados Unidos N° 6.010.555 se reemplaza con una máquina o máquinas centrífugas de mayor eficiencia, impulsadas directamente por un motor de velocidad variable de imán permanente de alta velocidad. Preferentemente, ambas soplantes de lóbulos rotativos descritas en la Patente de Estados Unidos N° 6.010.555 se reemplazan por una máquina o máquinas centrífugas de mayor eficiencia, estando cada una impulsada directamente por un motor de velocidad variable de imán permanente de alta velocidad. Aunque las condiciones de proceso descritas en la Patente de Estados Unidos N° 6.010.555 pueden permanecer similares a las de la presente invención, el modo de operación del compresor centrífugo es bastante diferente y se explica a continuación en la presente memoria.

60 La disposición mostrada en la Figura 5 pretender ser ejemplar y podrían implementarse otras diversas disposiciones (tal como un recipiente o más de dos recipientes) de acuerdo con la presente invención. Por ejemplo, y sin considerarlo limitante, otros sistemas en los que pueden utilizarse las disposiciones de compresor-motor de imán permanente de la invención incluyen aquellos tales como los descritos en la Patente de Estados Unidos N° 5.656.068 de Smolarek et al, la Publicación de Solicitud de Patente de Estados Unidos N° 2007/0095208 A1 de Baksh et al, y la Publicación de Solicitud de Patente de Estados Unidos N° US 2008/006151 A1 de Baksh et al.

Podrían utilizarse también otras disposiciones de PSA o VPSA alternativas de acuerdo con la presente invención.

En referencia ahora a la Figura 6A, se muestran curvas ejemplares del coeficiente de trabajo isentrópico del compresor centrífugo monofásico frente a la relación del coeficiente de flujo ($\Phi/\Phi_{\text{diseño}}$) para un gas ideal a diferentes Números de Mach de la máquina, Este coeficiente trabajo isentrópico, $Q_{\text{isentrópico}}$, es un parámetro adimensional y puede calcularse de la siguiente manera:

$$Q_{\text{isentrópico}} = \frac{T_i C_p \left(PR^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)}{U_{\text{punta}}^2} \quad (\text{ecuación 1});$$

donde T_i es la temperatura de entrada, C_p es el calor específico del gas a presión constante, γ es igual a C_p/C_v donde C_v es el calor específico del gas a volumen constante, PR es la relación de presión de la etapa y U_{punta} es la velocidad de la punta del álabe del impulsor del compresor definida como

$$U_{\text{punta}} = \frac{\pi DN}{60} \quad (\text{ecuación 2});$$

donde N la velocidad rotacional del álabe del impulsor en RPM y D es diámetro del álabe del impulsor. El Número de Mach de la máquina, M, es un parámetro adimensional y se define como

$$M = \frac{U_{\text{punta}}}{\sqrt{\gamma RT_i}} \quad (\text{ecuación 3});$$

donde R es la constante de la ley de gases ideales.

El coeficiente de flujo, Φ , es un parámetro adimensional que se define como:

$$\phi = \frac{V_s}{2\pi ND^3} \quad (\text{ecuación 4});$$

donde V_s es el caudal volumétrico de succión del compresor y todos los demás términos son los mismos como se ha definido anteriormente. La información de diseño del compresor en la ecuación 4 se utiliza para determinar $\Phi_{\text{diseño}}$.

Las curvas de coeficiente de trabajo isentrópico del compresor ($Q_{\text{isentrópico}}$) frente a la relación del coeficiente de flujo ($\Phi/\Phi_{\text{diseño}}$) a diferentes velocidades de la Figura 6A y las curvas de eficiencia (η) frente a la relación del coeficiente de flujo ($\Phi/\Phi_{\text{diseño}}$) a diferentes velocidades de la Figura 6B se obtienen por medición experimental del rendimiento del compresor. Se entiende que la eficiencia puede determinarse utilizando patrones industriales. Para ilustrar cómo utilizar estas curvas para hacer funcionar el compresor a lo largo de su línea de mejor eficiencia, se genera un mapa de rendimiento del compresor (relación de presión frente a flujo másico/flujo másico_{diseño} a diversas velocidades) en primer lugar a partir del coeficiente de trabajo isentrópico a diversas velocidades para una temperatura de entrada específica al compresor.

A continuación, se establece la línea de mejor eficiencia en el mapa de rendimiento del compresor utilizando la información de la Figura 6B. Esta representa las localizaciones de puntos que corresponden a todos los puntos de eficiencia pico de las curvas operativas del compresor a diferentes velocidades y condiciones del proceso. Trabajando a lo largo de esta línea, el compresor puede funcionar en su modo más eficiente en términos de consumo de potencia. Tales mapas de rendimiento, junto con sus líneas de mejor eficiencia resultantes, pueden programarse (es decir, modificarse) en el PLC del sistema PSA o VPSA en forma de una curva o curvas de la tabla o tablas de referencia.

La Figura 7 es una representación gráfica de un mapa de rendimiento de un compresor ejemplar que corresponde a una temperatura de entrada específica (por ejemplo 21,1 °C (70 °F)). Se generaría una familia de mapas de rendimiento, tal como la mostrada en la Figura 7, para las temperaturas que un compresor podría encontrarse en su entrada (basado en condiciones ambiente variables para el compresor de alimentación y temperaturas de lecho adsorbente variables para el compresor de vacío). De esta manera, podrían generarse mapas de rendimiento similares para las diferentes temperaturas de entrada. Supervisando la presión y temperatura de entrada del compresor y la presión de descarga, podría utilizarse el mapa de rendimiento apropiado para identificar la velocidad del compresor necesaria para trabajar a lo largo de su línea de mejor eficiencia. Sin embargo, existen regiones lejos

de la línea de mejor eficiencia del mapa de rendimiento donde su eficiencia es sustancialmente menor que la de una soplante de lóbulos rotativos. Para conseguir una eficiencia superior respecto a la soplante de lóbulos rotativos, es por lo tanto importante hacer trabajar el compresor centrífugo a o cerca de su línea de mejor eficiencia en todo momento.

5 Los compresores centrífugos teóricamente pueden tener una eficiencia 15 puntos mayor respecto a las soplantes de lóbulos rotativos, pero esto es únicamente si la velocidad de la máquina se controla para que coincida sustancialmente (es decir, esté en o cerca de) el requisito de cabeza (es decir, siga el ciclo PSA o VPSA o trabaje en su mejor eficiencia para cualquier punto dado en el tiempo). De esta manera, el uso de motores de imán permanente de alta velocidad para funcionamiento a velocidad variable con compresores centrífugos de acuerdo con la presente invención proporciona sistemas y procesos que no solo son capaces de responder a los cortos tiempos de ciclo de los sistemas PSA y VPSA y procesos; tales disposiciones también permiten eficiencias de proceso significativamente mejoradas con respecto a las disposiciones de soplante de lóbulos rotativos de la técnica anterior.

15 Los siguientes Ejemplos 1 y 2 son ejemplos hipotéticos y se pretende que sean ilustrativos de la invención.

Ejemplo 1

La Figura 8 es una representación gráfica de una respuesta de compresor de alimentación ideal ejemplar durante un ciclo VPSA típico. Con referencia de nuevo a la Figura 5 y la Figura 8, por ejemplo, en cualquier instante en el tiempo durante un ciclo VPSA, la temperatura T_1 , las presiones P_1 y P_2 , la temperatura T_2 y las presiones P_3 y P_4 se miden a través de un transductor o transmisor de presión típico y se registran en el PLC 31 de la planta. Específicamente y para fines de ilustración, observando el compresor de alimentación 22 durante una etapa de alimentación de presión creciente (punto A en la Figura 8), el sistema de control calcula la relación de presión (PR) a través de la máquina de alimentación dividiendo P_2 por P_1 . Utilizando esta relación de presión calculada y la temperatura de entrada T_1 , el sistema de control PLC 31 determina entonces la velocidad operativa del motor/compresor utilizando el mapa de rendimiento del compresor y dando como resultado la línea de mejor eficiencia que se generó para T_1 , como se ilustra en el punto A (en este caso, la velocidad operativa del motor/compresor es aproximadamente un 67 % de la velocidad máxima) en la Figura 7. Esta información se comunica después al VFD 33 para dirigir el compresor 22 y el motor 29 para que funcionen a una velocidad como esta. Se consiguen determinaciones y comunicaciones similares análogamente con respecto al compresor de vacío centrífugo 50 y el motor PM 51.

Ejemplo 2

35 Durante una alimentación a presión constante con la etapa de fabricación de producto (véase por ejemplo el punto B en la Figura 8), la temperatura de entrada T_1 y la relación de presión actualizada a través de la máquina de alimentación obtenida dividiendo P_2 por P_1 sirven como entradas para determinar la velocidad operativa del motor/compresor utilizando el mapa de rendimiento del compresor y dando como resultado la línea de mejor eficiencia que se generó para la T_1 actualizada como se ilustra en el punto B (velocidad máxima 100 %) en la Figura 7. Esta información se comunica después al VFD 33 para dirigir el compresor 22 y el motor 29 para que funcionen a una velocidad como esta. Se consiguen determinaciones y comunicaciones similares análogamente con respecto al compresor de vacío centrífugo 50 y el motor PM 51.

45 En general, la relación de presión a través del compresor fluctúa como respuesta a los cambios de presión del sistema (tal como ocurre durante la presurización y evacuación del lecho o lechos adsorbentes). La velocidad del compresor se varía continuamente desde la velocidad de diseño del 100 % hasta una velocidad sustancialmente menor (por ejemplo 40 % es el extremo inferior típico para las condiciones aerodinámicas) de manera que funcione en su mejor punto de eficiencia para cualquier relación dada de presión y temperatura de entrada. El caudal del compresor resultante es una respuesta dictada por la curva de mejor eficiencia. Podría programarse una serie de líneas de mejor eficiencia determinada experimentalmente generadas para diversas temperaturas de entrada (es decir, codificación permanente) en el PLC 31. Como se ha mencionado anteriormente, tal información puede programarse también en el PLC 31 en forma de tablas de referencia.

55 Durante el funcionamiento de la planta, el PLC 31 supervisa continuamente la temperatura de entrada, calcula la relación de presión a través del compresor, selecciona la velocidad operativa apropiada a partir de la línea de mejor eficiencia que corresponde a la temperatura de entrada y finalmente envía una señal al VFD 33, que se comunica con su motor PM 29 y compresor centrífugo de alimentación 22 respectivos. Ambas velocidades de máquina de alimentación teórica-ideal e hipotética-real (es decir, conseguible de forma práctica) y relación de presión durante un ciclo de VPSA entero típico se ilustran respectivamente en las Figuras 8 y 9. Se observa que la Figura 9 es para un proceso real hipotético. De una manera simultánea, el PLC 31 podría utilizar la temperatura de entrada T_2 y las presiones P_3 y P_4 para determinar la velocidad óptima del compresor de vacío utilizando sus propias líneas de mejor eficiencia o tablas de referencia programadas en el PLC 31. Como con la máquina de alimentación, el PLC 31 podría enviar una señal diferente al VFD 53 y el VFD 53 podría entonces comunicarse con su motor PM 51 y compresor centrífugo de vacío 50 respectivos.

65 Típicamente a velocidades muy bajas, el margen de regulación de un compresor centrífugo se reduce en gran medida. Para evitar problemas operativos, la velocidad más baja del compresor se mantiene por lo tanto

preferentemente a un porcentaje razonable de la velocidad de diseño, en este caso particular un 40 % de la velocidad de diseño. Una vez que el compresor alcanza esta velocidad, la velocidad del motor se fija y el compresor funciona a lo largo de su curva característica de velocidad particular (por ejemplo, entre relaciones de presión de 1,0 y 1,1 como se muestra en la Figura 7).

5 Los compresores impulsados directamente por motores PM de alta velocidad diseñados para funcionar a velocidad variable eliminan los componentes de gran inercia (por ejemplo, los engranajes y el gran motor IM que funciona de forma lenta) en los sistemas compresor-motor y permiten la respuesta adecuada (por ejemplo, el compresor de alimentación puede responder al perfil como se ilustra por ejemplo en las Figuras 8 y/o 9) del compresor a los requisitos del ciclo PSA o VPSA. Más particularmente, las disposiciones de la presente invención permiten por tanto que los compresores sean sensibles a las características de tiempo de ciclo corto de los actuales sistemas y procesos PSA y VPSA. Para unos caballos de potencia dados, la inercia rotatoria de un motor PM de alta velocidad generalmente es aproximadamente 1/6 de la de un motor de inducción comparable cuando se utiliza cualquiera de ellos para impulsar un compresor centrífugo.

15 Continuando con la referencia a la Figura 9, la velocidad de aceleración y desaceleración del motor (es decir, entre el 100 % y el 40 % de la velocidad máxima) es del orden de 11 segundos de los puntos C a D y de 6 segundos de los puntos D a E, respectivamente. Como se ha mencionado anteriormente en la presente memoria, las máquinas tales como los compresores centrífugos impulsados por un motor de inducción no pueden acelerar o ralentizarse a las rápidas velocidades requeridas por los tiempos de ciclo corto de los sistemas PSA o VPSA (es decir, tales máquinas son incapaces de adaptarse rápidamente a las condiciones de flujo transitorio del ciclo (debido a las grandes inercias de los engranajes y el gran rotor IM que funciona de forma lenta)). En contraste, el uso de motores de imán permanente de alta velocidad para impulsar compresores centrífugos de acuerdo con la presente invención permite que tales máquinas sean sensibles a los cortos tiempos de ciclo de los actuales sistemas y tiempos de ciclo.

25 Una manera alternativa de realizar de forma práctica esta invención es utilizar una válvula reguladora de succión junto con el motor de velocidad variable de alta velocidad. Tal válvula reguladora de succión podría implementarse en un sistema PSA o VPSA por ejemplo entre el compresor de alimentación y la entrada (por ejemplo aguas arriba del compresor de alimentación 22 y aguas abajo de la entrada 24 en la Figura 5). La válvula reguladora de succión podría utilizarse a la menor velocidad operativa (es decir, un 40 % de la velocidad máxima por la misma razón indicada anteriormente) para reducir adicionalmente el consumo de potencia del compresor. Esto se realiza reduciendo la densidad de entrada, es decir, el flujo másico al compresor, mientras funciona a un 40 % de la velocidad máxima.

35 La Figura 10 es una representación gráfica de un mapa de rendimiento de un compresor ejemplar en el que se utiliza un regulador de succión en la línea de velocidad más baja. Por ejemplo, como se muestra en el punto F en la Figura 10, una vez que se ha alcanzado una relación de presión de aproximadamente 1,1, la válvula reguladora de succión empezaría a cerrarse de nuevo mediante una cantidad preprogramada en el PLC 31, dando como resultado un intervalo operativo descendente mejorado que tiene un menor consumo de potencia que en el caso sin la válvula reguladora de succión.

40 Otra realización de la presente invención incluye un sistema que utiliza álabes guía de entrada (IGV) en el compresor o compresores centrífugos junto con el motor de alta velocidad. Los álabes guía de entrada pueden utilizarse cuando se desea el control de capacidad de los compresores centrífugos. Son piezas internas dentro de la máquina. El IGV puede utilizarse ya sea a una velocidad fija o con una velocidad de compresor variable.

45 Aunque la invención se ha descrito en detalle con referencia a ciertas realizaciones preferidas los expertos en la materia reconocerán que hay otras realizaciones dentro del alcance de las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema para separación de gas, que comprende:

5 al menos un recipiente que contiene al menos un lecho de adsorción (A, B) que incluye al menos un material de adsorción;
 al menos un compresor de alimentación (22) y opcionalmente al menos un compresor de vacío (50), en el que al menos uno del al menos un compresor de alimentación o el al menos un compresor de vacío es un compresor centrífugo impulsado por un motor asociado que comprende un motor de velocidad variable de imán permanente (29; 51) capaz de funcionar a velocidades mayores de 300 RPM; y
 10 medios de controladores (31) para recibir señales de datos para las condiciones en el sistema y para comunicar al motor de velocidad variable de imán permanente (29; 51) que impulsa el al menos un compresor centrífugo (22; 50) en respuesta a las condiciones tales que el al menos un compresor centrífugo puede funcionar a una velocidad diseñada, en la que las condiciones comprenden presión de entrada (P_1 ; P_3), presión de salida (P_2 ; P_4) y temperatura de entrada (T_1 ; T_2) para el al menos un compresor centrífugo (22; 50)
 15 y
 en el que al menos un lecho (A, B) está configurado para presurización y despresurización cíclica durante el funcionamiento.

20 2. El sistema de la reivindicación 1, en el que el medio controlador (31) está configurado para determinar la relación de presión (P_2/P_1 ; P_4/P_3) para el al menos un compresor centrífugo (22; 50) y en el que el medio controlador (31) comunica al motor de velocidad variable de imán permanente (29; 51) una velocidad a la cual funcionar como respuesta a la relación de presión (P_2/P_1 ; P_4/P_3) y la temperatura de entrada (T_1 ; T_2) para el al menos un compresor centrífugo.

25 3. El sistema de la reivindicación 1, en el que dicho al menos un compresor centrífugo (22) comprende al menos un compresor de alimentación, comprendiendo además el sistema al menos un segundo compresor de alimentación impulsado por un motor asociado, en el que el al menos un segundo compresor de alimentación es una soplante de lóbulos rotativos y el motor asociado es un motor de inducción.

30 4. El sistema de la reivindicación 1, en el que dicho al menos un compresor centrífugo (22) comprende al menos un compresor de alimentación, comprendiendo además el sistema al menos un compresor de vacío impulsado por un motor asociado, en el que el al menos un compresor de vacío es una soplante de lóbulos rotativos y el motor asociado es un motor de inducción.

35 5. El sistema de la reivindicación 1, en el que dicho al menos un compresor centrífugo (22) comprende al menos un compresor de alimentación, comprendiendo además el sistema al menos un compresor centrífugo de vacío (50) y un motor de velocidad variable de imán permanente asociado (51).

40 6. El sistema de la reivindicación 5, que comprende además al menos un segundo compresor de vacío impulsado por un motor asociado, en el que el al menos un segundo compresor de vacío es una soplante de lóbulos rotativos y el motor asociado es un motor de inducción.

45 7. El sistema de la reivindicación 5, en el que dicho el motor asociado (29) de el al menos un compresor centrífugo de alimentación (22) está en comunicación con al menos un impulsor de frecuencia variable (VFD) (33) asociado y el al menos un impulsor de frecuencia variable (VFD) asociado está en comunicación con el medio controlador (31) y en el que el motor (51) asociado de el al menos un compresor centrífugo de vacío (50) está en comunicación con al menos un impulsor de frecuencia variable (VFD) (53) asociado y el al menos un impulsor de frecuencia variable (VFD) asociado está en comunicación con el medio controlador (31).

50 8. El sistema de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el al menos un motor de velocidad variable de imán permanente (29; 51) comprende al menos un motor de velocidad variable de imán permanente de tierras raras.

55 9. Un proceso para separación de gas, comprendiendo el proceso:

comprimir un gas de alimentación con al menos un compresor de alimentación (22);
 introducir un gas de alimentación en al menos un recipiente que contiene al menos un lecho adsorbente (A, B) que incluye al menos un material adsorbente, comprendiendo el gas de alimentación al menos un
 60 componente menos fácilmente adsorbible y al menos un componente más fácilmente adsorbible;
 hacer pasar el gas a través de al menos un material adsorbente de manera que el componente más fácilmente adsorbible se adsorba por el al menos un material adsorbente;
 extraer un gas enriquecido en el componente menos fácilmente adsorbible; y
 extraer opcionalmente un gas enriquecido en el componente más fácilmente adsorbible con al menos un
 65 compresor de vacío (50); y
 en el que el al menos un lecho adsorbente (A, B) se presuriza cíclicamente y se despresuriza durante el

proceso;

en el que al menos uno de el al menos un compresor de alimentación (22) o el al menos un compresor de vacío (50) es un compresor centrífugo impulsador por un motor de velocidad variable de imán permanente (29; 51) asociado capaz de funcionar a velocidades mayores de 3600 RPM:

5 el proceso comprende adicionalmente supervisar el proceso utilizando un medio controlador (31) para recibir señales de datos para condiciones en el sistema y para comunicarlas al motor de velocidad variable de imán permanente (29; 51) asociado con el al menos un compresor centrífugo (22; 50) en respuesta a las condiciones de manera que el al menos un compresor centrífugo puede funcionar a una velocidad diseñada, en el que las condiciones del sistema comprenden presión de entrada (P_1 ; P_3), presión de salida (P_2 ; P_4) y temperatura de entrada (T_1 ; T_2) para el al menos un compresor centrífugo.

10. El proceso de la reivindicación 9, en el que el medio controlador (31) está configurado para determinar la relación de presión (P_2/P_1 ; P_4/P_3) para el al menos un compresor centrífugo, en el que el medio controlador comunica al motor de velocidad variable de imán permanente (29; 51) asociado con el al menos un compresor centrífugo (22; 50) una velocidad a la cual funcionar como respuesta a la relación de presión (P_2/P_1 ; P_4/P_3) y la temperatura de entrada (T_1 ; T_2) para el al menos un compresor centrífugo.

11. El proceso de la reivindicación 10, en el que el motor de velocidad variable de imán permanente (29; 51) asociado con el al menos un compresor centrífugo (22; 50) se acopla directamente con el al menos un compresor centrífugo de manera que el al menos un compresor centrífugo puede funcionar a lo largo de una línea de eficiencia predeterminada.

12. El proceso de la reivindicación 9, en el que:

25 el gas enriquecido en el componente más fácilmente adsorbible se extrae utilizando al menos un compresor centrífugo de vacío (50) impulsado por un motor de velocidad variable de imán permanente (51) asociado.

13. El proceso de la reivindicación 12, que comprende además supervisar el proceso utilizando un medio controlador (31) para recibir señales de datos para las condiciones en el sistema y para comunicarse con el motor de velocidad variable de imán permanente (29) asociado con el al menos un compresor centrífugo de alimentación (22) como respuesta a las condiciones, de manera que el al menos un compresor centrífugo puede funcionar a una velocidad diseñada y adicionalmente comprende supervisar el proceso utilizando un medio controlador (31) para recibir señales de datos para las condiciones en el sistema y para comunicarse con el motor de velocidad variable de imán permanente (51) asociado con el al menos un compresor centrífugo de vacío (50) como respuesta a las condiciones, de manera que al menos un compresor centrífugo de vacío pueda funcionar a una velocidad diseñada.

14. El proceso de la reivindicación 13, en el que las condiciones en el sistema comprenden presión de entrada (P_1), presión de salida (P_2) y temperatura de entrada (T_1) para el al menos un compresor centrífugo de alimentación (22) y en el que las condiciones en el sistema comprenden presión de entrada (P_3), presión de salida (P_4) y temperatura de entrada (T_2) para el al menos un compresor centrífugo de vacío (50) y en el que el medio controlador (31) está configurado para determinar la relación de presión (P_2/P_1) para el al menos un compresor centrífugo de alimentación (22) y en el que el medio controlador (31) está configurado para determinar la relación de presión (P_4/P_3) para el al menos un compresor centrífugo (50).

15. El proceso de la reivindicación 14, en el que medio controlador (31) comunica al motor de velocidad variable de imán permanente (29) asociado con al menos un compresor de alimentación centrífugo (22) una velocidad a la cual funcionar como respuesta a la relación de presión (P_2/P_1) y la temperatura de entrada (T_1) para el al menos un compresor centrífugo de alimentación (22) y en el que el medio controlador (31) comunica al motor de velocidad variable de imán permanente (51) asociado con el al menos un compresor centrífugo de vacío (50) una velocidad a la cual funcionar como respuesta a la relación de presión (P_4/P_3) y la temperatura de entrada (T_2) para el al menos un compresor centrífugo de vacío (50).

16. El proceso de la reivindicación 15, en el que el motor de velocidad variable de imán permanente (29) asociado con el al menos un compresor centrífugo de alimentación (22) está acoplado directamente a el al menos un compresor centrífugo de alimentación de manera que el al menos un compresor centrífugo de alimentación puede funcionar a lo largo de una línea de eficiencia predeterminada y en el que el motor de velocidad variable de imán permanente (51) asociado con el al menos un compresor centrífugo de vacío (50) está acoplado directamente a el al menos un compresor centrífugo de vacío de manera que el al menos un compresor centrífugo de vacío puede funcionar a lo largo de una línea de eficiencia predeterminada y en el que el proceso comprende un proceso VPSA.

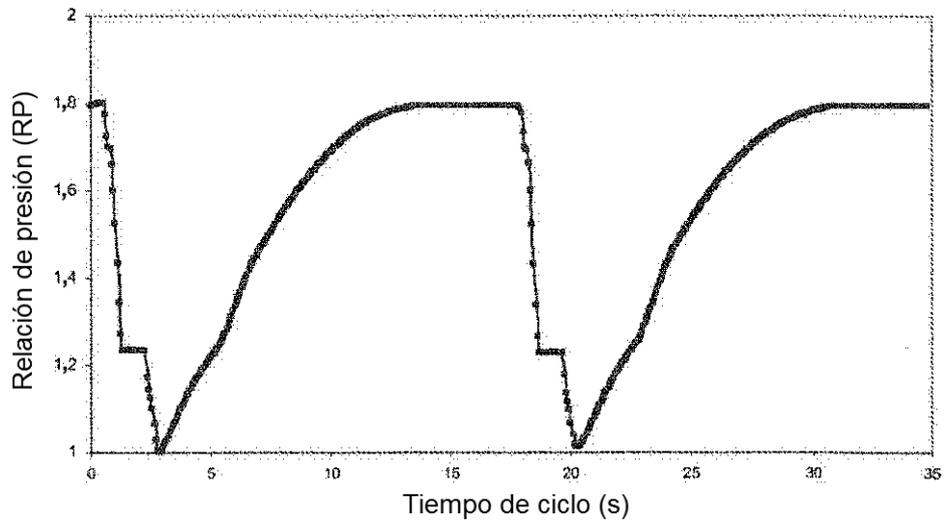


FIGURA 1

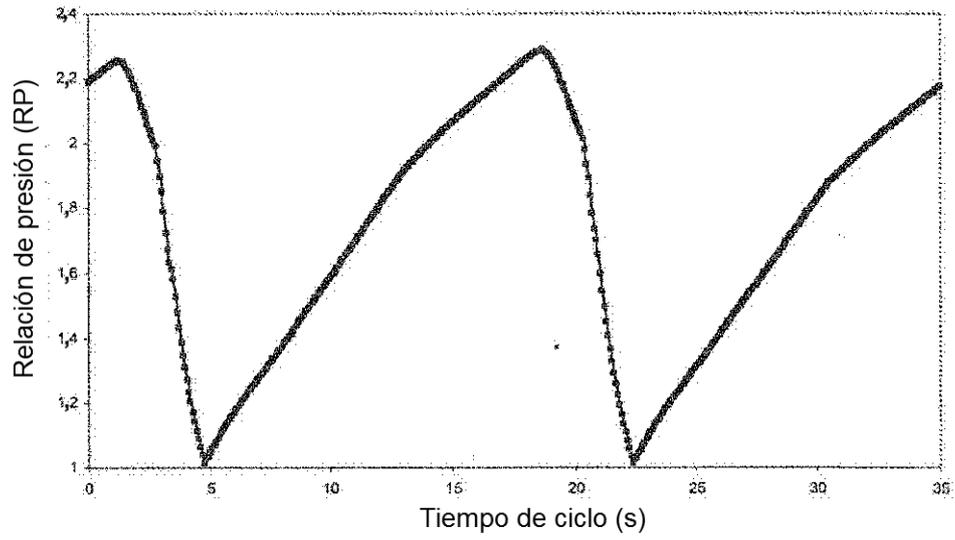


FIGURA 2

TÉCNICA ANTERIOR

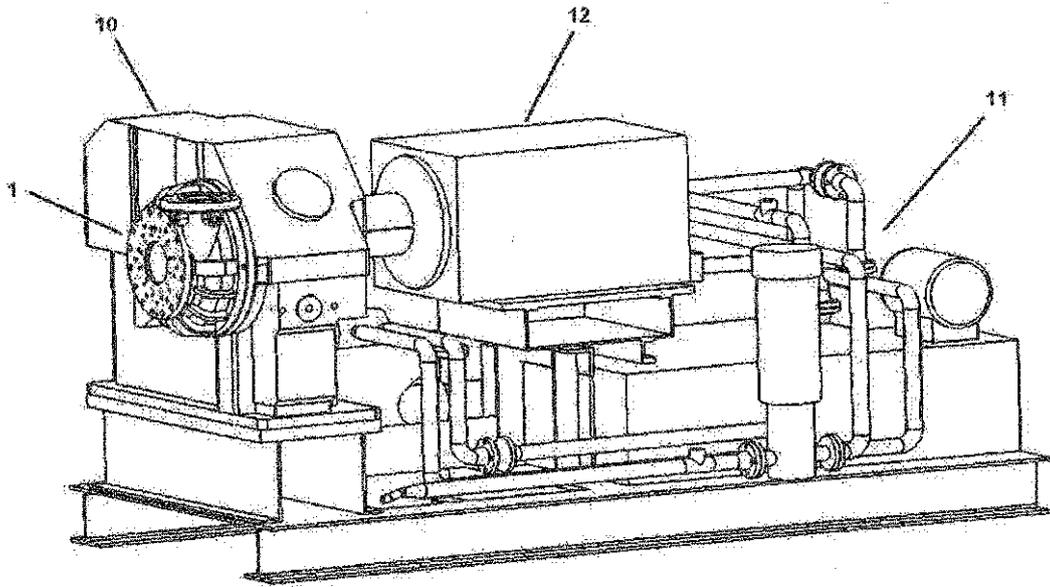


FIGURA 3

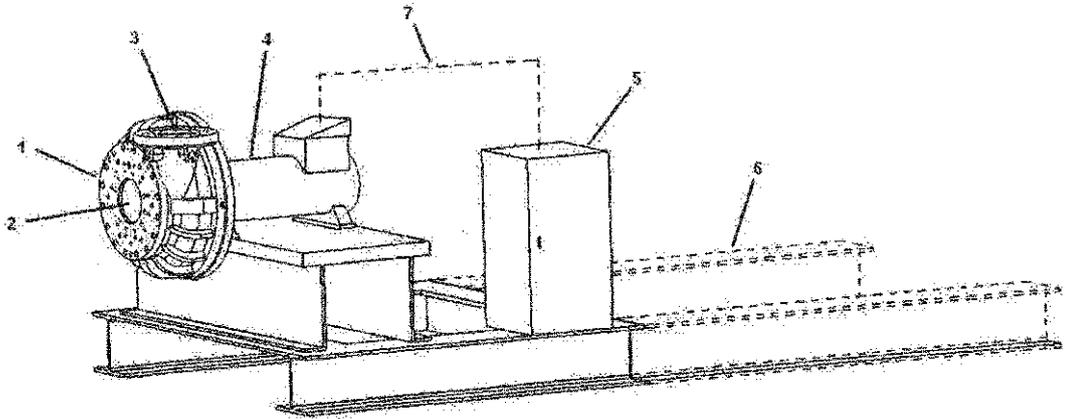


FIGURA 4

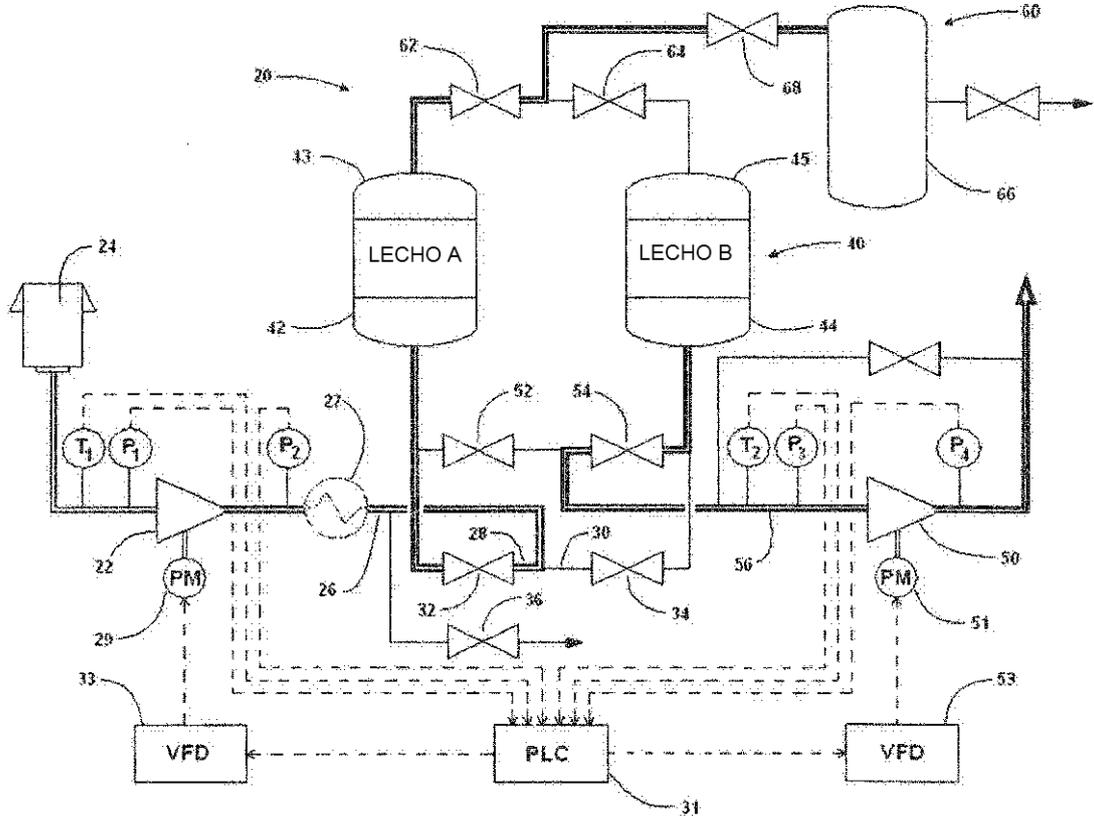


FIGURA 5

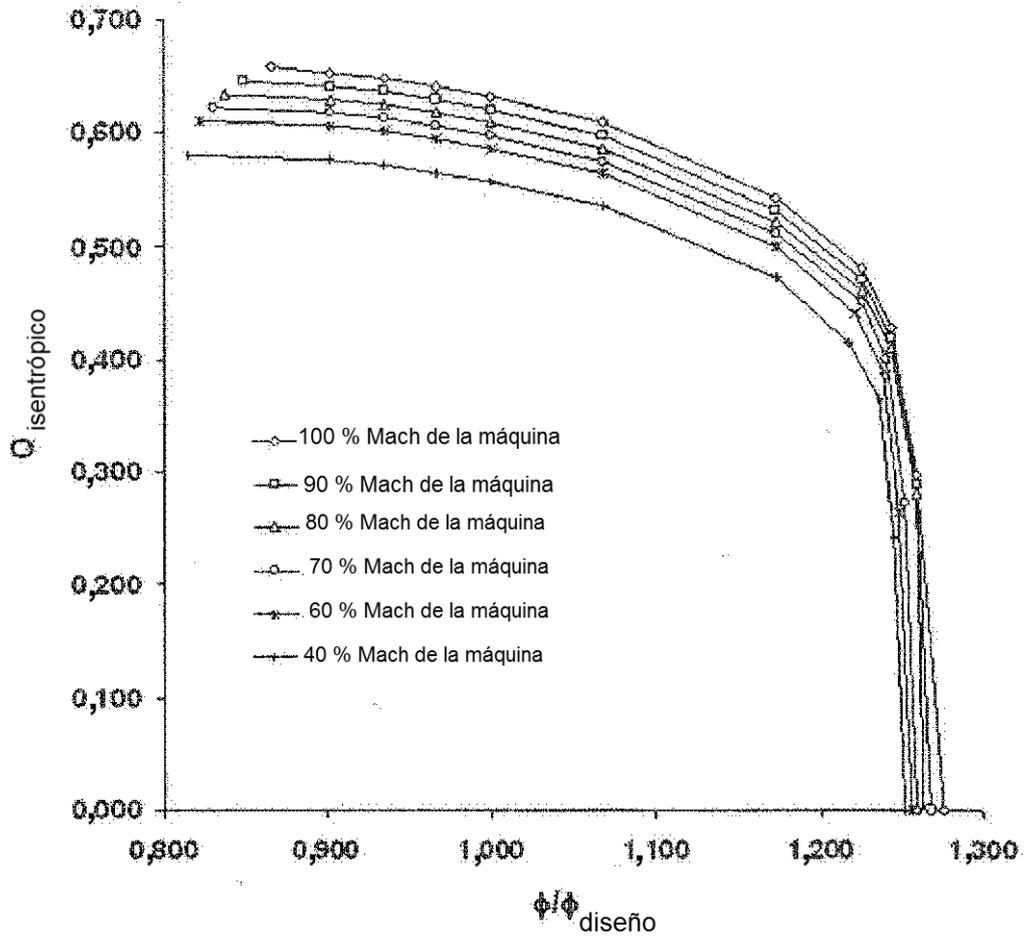


FIGURA 6A

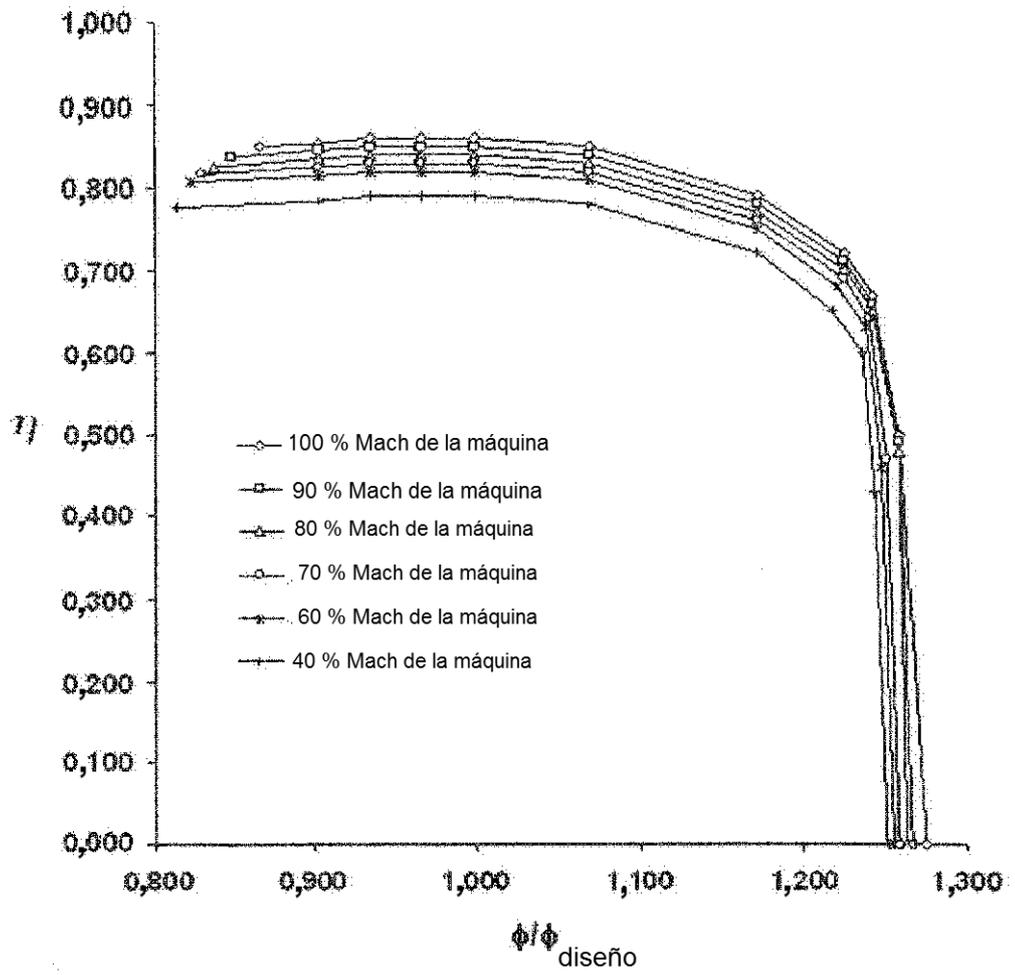


FIGURA 6B

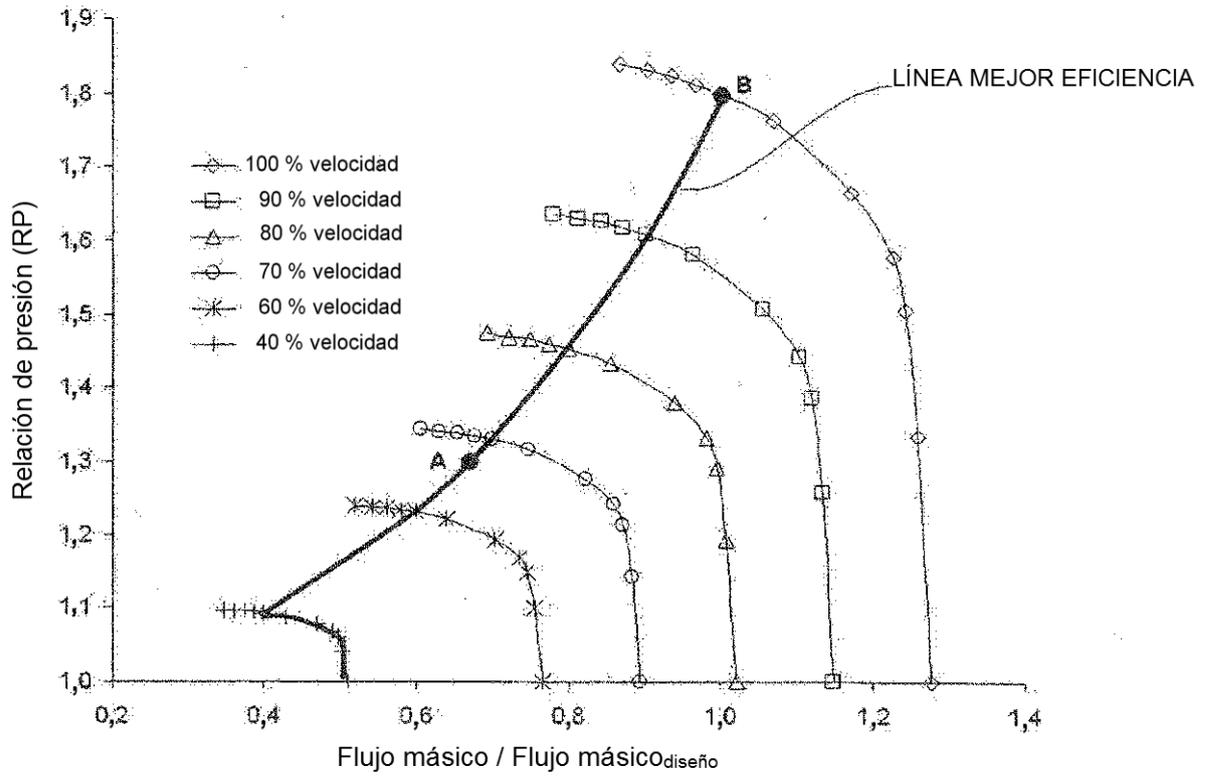


FIGURA 7

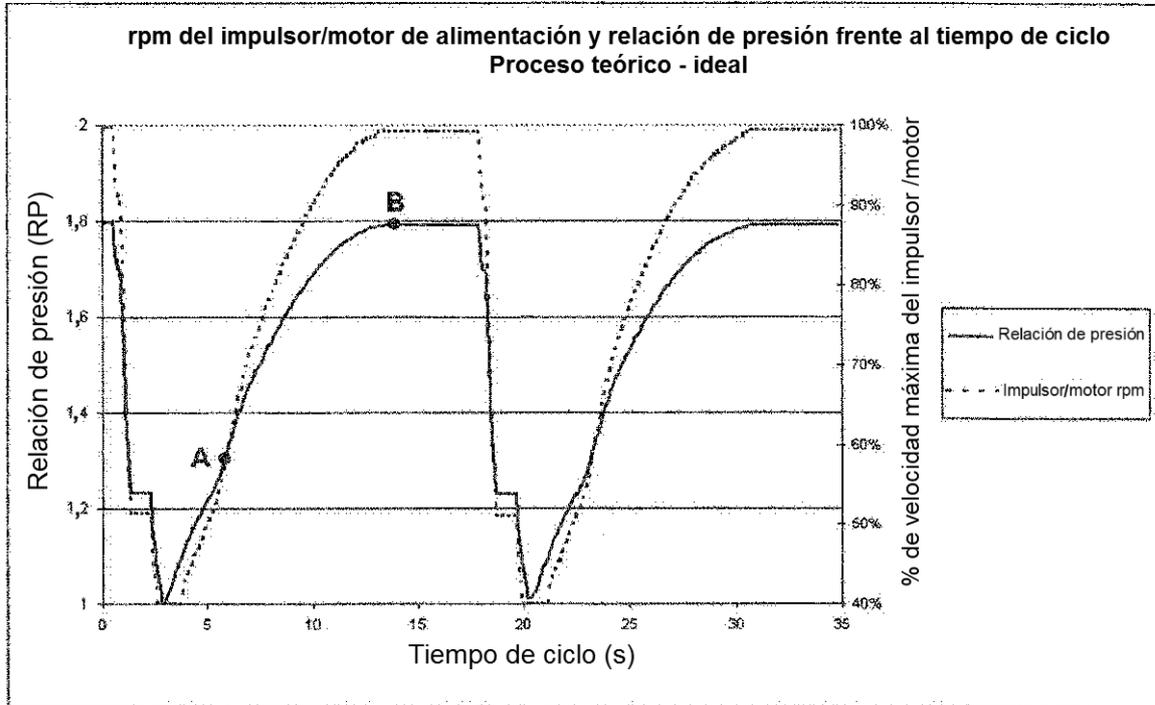


FIGURA 8

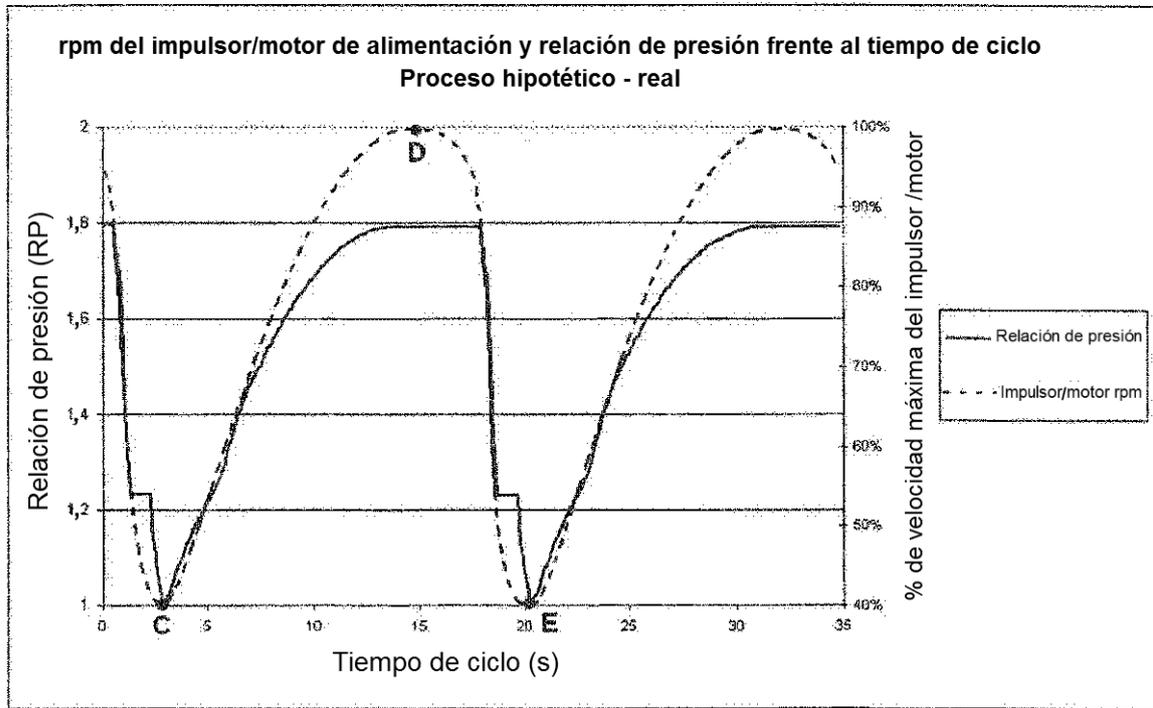


FIGURA 9

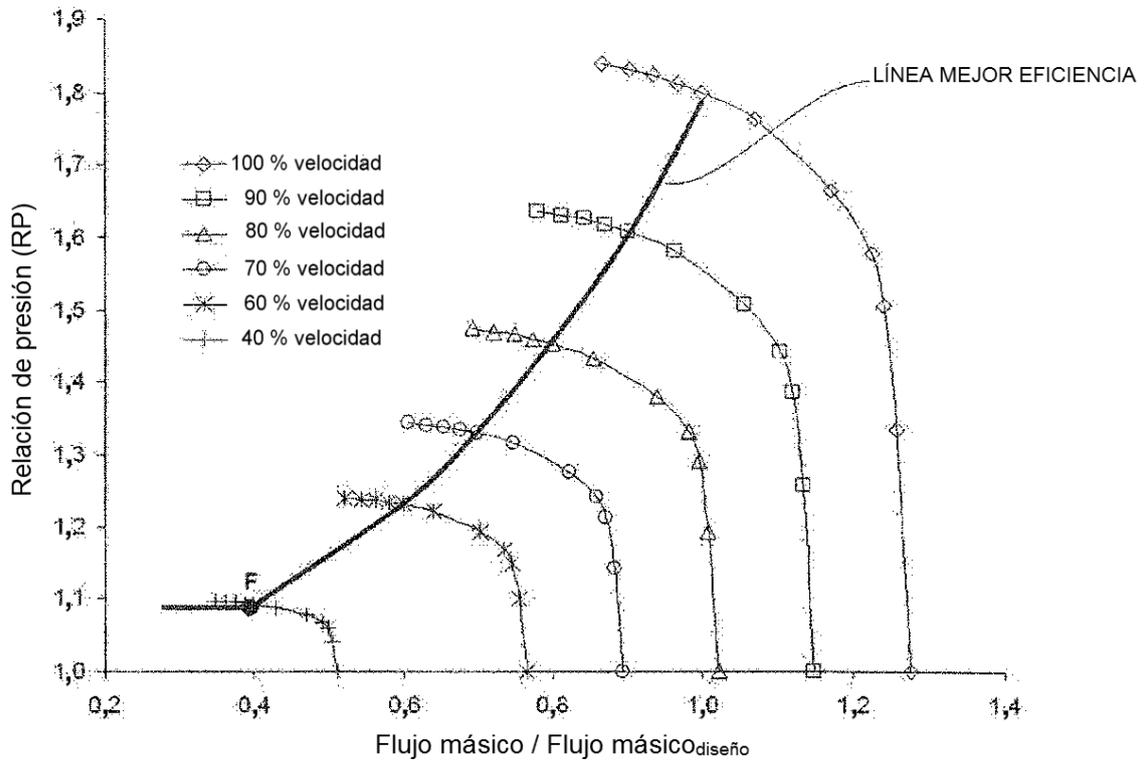


FIGURA 10