

SISTEMA DE VPSA EFICIENTE ENERGÉTICO CON COMPRESORES
CENTRÍFUGOS DE ALTA VELOCIDAD DE ACCIONAMIENTO DIRECTO

CAMPO DE LA INVENCION

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

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

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

usarlo en otros procesos tales como la separación criogénica de aire en sus gases componentes.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

La presente invención se relaciona con un método y sistema para mejorar la eficiencia energética y de capital de la planta de VPSA a través de la optimización de los compresores de alimentación, vacío, y/o productos centrífugos de velocidad variable de accionamiento directo para lograr un menor costo de producción de productos de gas unitarios. Más específicamente, la presente invención se relaciona con un nuevo proceso y sistema de VPSA eficiente energético que usa compresores centrífugos de accionamiento directo de alta velocidad para lograr un rango de producción más amplio. Puede lograrse un consumo de energía significativamente menor durante la vida útil de la operación de la planta mediante el uso de compresores dimensionados con la demanda ambiental y producción promedio, usando un rango operativo y velocidad de los compresores centrífugos de alta velocidad variable de accionamiento directo para satisfacer la demanda de producción deseada. Dado que la mayoría de las plantas tienden a funcionar por debajo del pico de producción, la mayor parte de la vida útil de la planta. Además, la máquina

de menor tamaño ofrece ahorros de capital de la planta a partir de la inversión inicial.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS FIGURAS

La Figura 1 ilustra una planta de VPSA típica con 3 piezas de equipo rotatorio.

La Figura 2 muestra el mapa de rendimiento del compresor para el compresor V30C ilustrativo impulsado por un motor de alta velocidad y VFD.

La Figura 3 muestra un mapa de compresor para un compresor de producto de oxígeno.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

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

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

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

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

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

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

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

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

una capacidad de diseño menor debido a los cambios en la demanda del cliente y en las condiciones ambiente, reduciendo la eficiencia de la operación de reducción. Contrariamente a la filosofía de diseño convencional de la planta en tamaño para satisfacer los requerimientos de capacidad máxima en la condición ambiental más alta, la presente invención disminuye el capital de la planta al diseñar la planta de VPSA para los requerimientos de producción promedio y las condiciones ambiente, acelerando las máquinas para satisfacer los requerimientos de capacidad máxima cuando sea necesario. Los compresores de velocidad variable son ideales para lograr los requerimientos de flujo y presión deseados para producir los requerimientos de producción promedio mientras se mantiene la eficacia óptima del compresor. Cuando los requerimientos de producción exceden los requerimientos de producción promedio, las velocidades del compresor se incrementan para aumentar las velocidades de flujo a fin de satisfacer las demandas de producción. Los requerimientos de producción promedio del sistema varían, típicamente, de aproximadamente 50 a aproximadamente 90 % de los requerimientos de capacidad de diseño máxima para el sistema a la temperatura ambiente más alta. En otra modalidad, los requerimientos de producción promedio del sistema varían, típicamente, de aproximadamente

60 a aproximadamente 90 %, en otra modalidad, de aproximadamente 70 a aproximadamente 90 % y, en aún otra modalidad, de aproximadamente 80 a aproximadamente 90 % de los requerimientos de capacidad de diseño máxima para el sistema a la temperatura ambiente más alta.

La presente invención se relaciona más particularmente con procesos y sistemas de separación de gas tales como sistemas de adsorción de PSA o VPSA que tienen al menos un recipiente que contiene al menos un lecho adsorbente en este. El lecho adsorbente incluye al menos un material adsorbente. En algunas modalidades, al menos un lecho adsorbente está cíclicamente presurizado por al menos un compresor de alimentación y a veces está evacuado por al menos un compresor de vacío, con el al menos un compresor de alimentación o el al menos un compresor de vacío siendo un compresor centrífugo accionado por un motor de inducción de alta velocidad asociado diseñado para una operación de alta velocidad variable. En tales modalidades, el compresor que no es un compresor centrífugo puede ser un soplador de lóbulo giratorio accionado por el motor de inducción. En algunas modalidades de la presente invención, el lecho adsorbente se presuriza cíclicamente mediante al menos un compresor centrífugo de alimentación accionado por un motor de velocidad variable de inducción de alta velocidad

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

El uso de motores de inducción o imanes permanentes de alta velocidad controlados a velocidad variable permite una mejora del orden de magnitud sobre los sistemas convencionales de motor/caja de engranajes de inducción de baja velocidad en su capacidad de acelerar y ralentizar el compresor centrífugo en un proceso de PSA o VPSA. El uso de motores de alta velocidad permite la eliminación de la necesidad de cajas de engranajes y, por lo tanto, permite igualmente la eliminación de la necesidad de sistemas de aceite lubricante. Por lo tanto, el o los compresores centrífugos pueden estar sostenido en soportes libres de aceite. Además, en algunas modalidades, se

espera que los sistemas de accionamiento propuestos de la presente invención sean más eficientes por más de 7 puntos porcentuales con la eliminación de pérdidas de fricción de aceite de engranaje y soportes, pérdidas del sistema de aceite lubricante y una capacidad mejorada para impulsar/retrasar la energía.

Para lograr la alta eficiencia de los compresores centrífugos, es esencial que los compresores funcionen a lo largo de una línea de máxima eficiencia. La línea de eficiencia máxima es una línea dibujada en un mapa de rendimiento del compresor. Como se describe en la presente descripción, un mapa de rendimiento del compresor, es decir la relación de presión en comparación con el flujo de masa a varias velocidades, se genera a partir del coeficiente de trabajo isentrópico en varias velocidades para una temperatura de entrada específica al compresor. La línea de máxima eficiencia representa los locus de puntos que corresponden a todos los puntos de máxima eficiencia de las curvas de operación del compresor en diferentes velocidades. Al operar a lo largo de la línea de máxima eficiencia, el o los compresores pueden operarse en su modo más eficiente en términos de consumo de energía.

El o los mapas de rendimiento también pueden tener forma de tablas de búsqueda o de referencia generadas a

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

Con la metodología de diseño de la invención, uno o más compresores centrífugos se dimensionan para la demanda promedio del producto, en donde la velocidad puede aumentarse para cumplir con los requerimientos de capacidad más altos. Es importante diseñar el impulsor del compresor con una característica de curvas de eficiencia planas para minimizar la reducción de eficiencia cuando la máquina se opera fuera de las condiciones del diseño.

Como se mencionó anteriormente, las plantas de VPSA se diseñan convencionalmente para satisfacer los requerimientos máximos de producción aunque los clientes requieren frecuentemente una menor cantidad de producción de oxígeno la mayor parte del tiempo. Las condiciones ambiente, la temperatura y la elevación pueden tener un impacto significativo en la producción de la planta de VPSA. Con los compresores centrífugos de velocidad variable de accionamiento directo, se puede aprovechar la velocidad del compresor para diseñar una planta de VPSA para el requerimiento de producción promedio y condición ambiente, acelerar la máquina para

satisfacer el requerimiento de capacidad máxima cuando sea necesario. Este enfoque de diseño ofrece ahorros de capital y energía en comparación con la filosofía de diseño convencional para diseñar siempre la planta para cumplir con el requerimiento de máxima capacidad.

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

Usando el compresor de V30C como ejemplo, se puede abrir el flujo en ~50 % a una relación de presión constante mientras se mantiene una eficacia alta. Si se desea un flujo adicional, la máquina puede empujarse aún más hacia la estrangulación a expensas de la eficiencia. Por supuesto, será necesario dimensionar el tamaño del motor para tener suficiente energía para cubrir el aumento de flujo.

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

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

Usando compresores centrífugos con motores de alta velocidad y VFD, puede diseñarse una planta de VPSA y puede seleccionarse un equipo rotativo para producir una cierta cantidad de oxígeno y también puede producir más oxígeno al aumentar la velocidad del compresor cuando sea necesario

debido a la demanda del cliente o al cambiar las condiciones ambiente. La mayor capacidad se logra aumentando la velocidad del compresor ajustando la velocidad del motor a través del VFD. Las tres máquinas deberán ajustarse juntas, es decir, si aumenta la velocidad de la máquina de alimentación para añadir más aire a la planta, necesitará más capacidad de vacío para eliminar el nitrógeno residual adicional y más capacidad de compresor del producto para manejar el oxígeno adicional producido por la planta.

Las patentes de los EE. UU. núms. 7.785.405 y 8.529.665 enseñan el funcionamiento de un compresor centrífugo con motor de alta velocidad y VFD mediante el ajuste de la velocidad de la máquina de alimentación y vacío para mantener el funcionamiento en la línea de eficiencia máxima a medida que la presión de VPSA cambia durante el ciclo. Es importante operar a lo largo de esta línea de máxima eficiencia para capturar la ventaja de energía total de estas máquinas. Sin embargo, si se requiere oxígeno adicional debido a la demanda del cliente o a cambios en las condiciones ambiente, la línea de operación puede desplazarse hacia la estrangulación al aumentar la velocidad del compresor. El aumento en la velocidad se logra mediante la aplicación de un multiplicador a la velocidad calculada.

Para el compresor centrífugo de producto con motor de alta velocidad y VFD, a diferencia de las máquinas de alimentación y vacío, el compresor funcionará en el punto de diseño del compresor (presión, flujo, y velocidad). De manera similar a las máquinas de alimentación y vacío, se puede aumentar el flujo de esta máquina al aumentar la velocidad mientras se mantiene la misma presión de salida.

La Figura 2 muestra el mapa de rendimiento del compresor para el compresor V30C ilustrativo impulsado por un motor de alta velocidad y VFD. El mapa se generó siguiendo el protocolo de prueba PTC-10. La máquina funciona a una velocidad constante. Se usa una válvula reguladora de succión para variar el flujo y la presión a medida que la máquina pasa del estrangulamiento a la sobrecarga de dicha velocidad constante. Los puntos de datos se recolectan usando mediciones de temperatura, presión y flujo para formar una curva de relación de flujo en comparación con presión. Se usan mediciones de temperatura para determinar la eficiencia de la máquina en cada uno de los puntos a lo largo de la curva y para determinar el punto de eficiencia máxima para dicha velocidad. Esta prueba se repitió para varias velocidades de 40 % a 110 % de velocidad de diseño del compresor para formar el mapa de rendimiento completo.

El punto de diseño para el compresor se muestra en el mapa. El punto de diseño incluye un flujo, relación de presión, y velocidad a la que el impulsor del compresor se diseña para operar para satisfacer los requerimientos del proceso. Para compresores típicos con motor de velocidad fija y caja de engranajes, el compresor funciona en o cerca de este punto de diseño. Para compresores accionados por motores de alta velocidad y VFD, el compresor puede operar sobre todo el mapa que incluye a lo largo de la línea de eficiencia máxima a velocidades diferentes. El compresor también puede funcionar con un flujo más alto en el mismo cabezal al aumentar la velocidad del motor. Esto proporciona la flexibilidad para diseñar un compresor para un cierto flujo y presión, pero funciona a flujos más altos si cambian los requerimientos del proceso.

En la Figura 2, la línea 1 muestra los puntos de eficiencia máxima en todas las velocidades. Esto incluye el punto de diseño para el compresor y la línea a lo largo de la cual se desea operar la máquina para mantener la máxima eficiencia. La línea 2 en la Figura 2 muestra una línea de operación de flujo más alta en la que la máquina podría funcionar para proporcionar más flujo al proceso.

Tradicionalmente, si la demanda del cliente o las condiciones ambiente dictan un caso de flujo más alto, la

planta y el equipo de compresión asociado estarían diseñados para producir el flujo más alto. La reducción del proceso se usará para casos operativos normales o condiciones ambiente normales.

Sin embargo, con la centrífuga de impulso directo, el compresor y el motor de alta velocidad con VFD, la planta podría diseñarse para el caso de flujo normal (línea 1) y, después, encenderse para el caso de flujo superior (línea 2). Operar en este modo, usaría un compresor más pequeño y tendría menor capital. También funcionaría a menor potencia para la demanda promedio ya que un compresor diseñado para el flujo promedio tiene mayor eficiencia cuando se opera en el punto de diseño que un compresor más grande que opera en modo de reducción.

La Figura 3 muestra un mapa de compresor para un compresor de producto de oxígeno. El punto de diseño para el compresor se muestra en el mapa. El punto de diseño incluye un flujo, relación de presión, y velocidad a la que se diseña la rueda para operar para satisfacer los requerimientos del proceso. Para compresores típicos que usan motor de velocidad fija y caja de engranajes, el compresor funciona en o cerca de este punto de diseño. Para el accionamiento de compresores por motores de alta velocidad y VFD como se describe en la patente, el compresor

puede operar sobre todo el mapa. El compresor también puede funcionar con un flujo más alto en el mismo cabezal al aumentar la velocidad del motor. Esto proporciona la flexibilidad para diseñar un compresor para un cierto flujo y presión, pero funciona a un mayor flujo si cambian los requerimientos de producción.

Para un compresor de producto tradicional, el compresor se diseñaría para satisfacer las más altas demandas del cliente o las peores condiciones ambiente. Cuando la demanda es menor, el flujo del compresor al cliente se reduciría al recircular el gas de descarga de regreso a la entrada del compresor. Esto usa la potencia total del compresor como si estuviera a la velocidad de flujo más alta. Por lo tanto, el compresor de producto siempre será operado a potencia máxima incluso si se reduce la demanda del producto. Para un compresor centrífugo con motor de alta velocidad y VFD, el compresor puede dimensionarse para un flujo promedio o condiciones ambiente promedio y, después, para mayor demanda o la condición ambiente peor de los casos, la cantidad máxima de producción puede lograrse al aumentar la velocidad del compresor a través del aumento de la velocidad del motor a través del VFD. Este concepto se muestra en la Figura 3, donde se muestra el punto de diseño del compresor. A esta velocidad,

el compresor producirá flujo para condiciones normales. Después, para mayor demanda, se aumenta la velocidad del compresor, lo que desplaza el punto de funcionamiento del compresor hacia la derecha en donde produce más flujo a la misma presión. Esto ahorra capital y energía ya que puede usarse un compresor más pequeño para satisfacer la mayor demanda y un compresor que opera en el punto de diseño promedio usó menos energía que un compresor más grande que opera en modo de recirculación.

Suponiendo que la demanda de producción promedio es 75 % de la demanda máxima, los impactos de capital y energía del compresor para una planta de VPSA de oxígeno se ilustran en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1: Impacto de capital del tamaño de compresor convencional por demanda máxima en comparación con la capacidad de planta de tamaño de demanda promedio propuesta

	Demanda máxima			Demanda promedio		
Oxígeno (ton/día)	150			112,5		
	Alimentación	Vacío	Producto	Alimentación	Vacío	Producto
Compresor, KW	800	1000	375	640	800	280
Impacto de capital	100 %	100 %	100 %	80 %	80 %	80 %

Tabla 2: Comparación de potencia del compresor convencional dimensionado por demanda máxima en comparación con la demanda promedio propuesta, con raíces y VPSA centrífuga

Impacto de energía	VPSA convencional			VPSA centrífuga		
	Raíces + Reciprocantes			Compresores: dimensionados por demanda promedio (75 % máximo)		
	Alimentación	Vacío	Producto	Alimentación	Vacío	Producto
Demanda máxima (150 ton/día de oxígeno, 100 %)	100 %	100 %	100 %	101 %	101 %	101 %
Demanda promedio (112,5 ton/día de oxígeno, 75 % máximo)	85 %	85 %	100 %	75 %	75 %	75 %

A partir de las Tablas 1 y 2, puede observarse claramente que una planta de VPSA con compresores dimensionados por demanda promedio de producción presenta ventaja en el capital. Para la producción de la demanda máxima, el tamaño de la máquina para la condición promedio consumirá energía ligeramente más alta debido a que esa máquina funcionará ligeramente por debajo de la eficiencia máxima. Sin embargo, en la ventana de operación de la planta real, el impacto del aumento de energía será mínimo. La planta diseñada por demanda promedio tendrá un alto potencial para alcanzar ahorros de energía durante la vida

útil de la operación de la planta debido al hecho de que la mayoría de las plantas funcionan por debajo de la demanda máxima la mayor parte del tiempo.

Una alternativa menos eficiente de energía que usar los compresores centrífugos de alta velocidad de accionamiento directo propuestos es dimensionar los compresores por demanda máxima de producción del cliente. Estas máquinas se operarán en modo desactivado menos eficiente cuando la demanda de producción del cliente sea menor que el nivel máximo.

Una opción intermedia será solo usar compresor centrífugo de inducción de alta velocidad o magnético permeante de alta velocidad de accionamiento directo como compresor de producto mientras se usa soplador de raíces de desplazamiento positivo convencional para presurizar y despresurizar los recipientes de adsorción. El compresor centrífugo de producto puede dimensionarse por demanda promedio, mientras que los sopladores radiculares necesitarán dimensionarse para satisfacer la demanda máxima de producción del cliente.