

Concentradores de Oxígeno para uso médico

50 años
CAAM
Casa abierta al tiempo

Fernando Prieto y Hernández
Centro de Investigación en Imagenología e Instrumentación Médica
(C²M). Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa

Resumen

Los concentradores de oxígeno son un recurso indispensable para tratar enfermedades y condiciones que afectan la función respiratoria de forma repentina, epidémica, endémica o crónica.

Los procesos de adsorción son un campo promisorio de investigación y desarrollo en las ciencias básicas, de materiales y de la salud.

También, son importantes, en ingeniería química, de energía, mecánica, electrónica y de control.

Los concentradores ocupan un nicho en crecimiento en el mercado del oxígeno, sobre todo si es conveniente o necesario producirlo en el sitio de uso.

Hemos desarrollado un prototipo de concentrador de pequeño tamaño y esperamos dar pasos firmes para su comercialización.

Desarrollos como este son de mucha trascendencia social.

Palabras clave: Concentrador de Oxígeno, Adsorción, Oxigenoterapia, Enfermedades Respiratorias.

Abstract

Oxygen concentrators are an essential asset in the care of diseases and conditions that affect respiratory function in a sudden, epidemic, endemic or chronic situation.

Adsorption processes are a promising research and development field in basic, materials, and health science; they are also important in chemical, energy, mechanical, electronic and control engineering.

Concentrators occupy a growing niche in the oxygen market especially when it is convenient or necessary to produce oxygen at the site of use.

We developed a small concentrator prototype and plan to take firm steps to commercialize it.

Developments like this are of high social significance.

Keywords: Oxygen concentrator, Adsorption, Respiratory diseases, Oxygen therapy.

Introducción

El oxígeno se ha utilizado para usos médicos desde hace más de un siglo. Hubo intentos pioneros como el de George Holtzaple en 1885 de usar oxígeno para personas con enfermedades respiratorias como la neumonía (Shultz SM, 2005). El médico estadounidense Alvan Barach sugirió que el oxígeno podría ser útil en el tratamiento a largo plazo de las enfermedades pulmonares, (Barach, 1922), continuó promoviendo su empleo y diseñó dispositivos para administrarlo a los pacientes.

En 1934 Arnold O. Beckman inventó el primer analizador electrónico de pH que alcanzó éxito comercial (Science History Institute). La poliomielitis, que azotó Europa y Norteamérica a mediados del siglo XX, fue un hecho inusitado que tomó a la comunidad médica sin medios diagnósticos y terapéuticos para enfrentarla. (Ballester R, 2012) El uso del oxígeno y de aparatos de ventilación artificial en diversas versiones, estuvieron entre los primeros recursos en desarrollarse. Los primeros analizadores de pH seguramente fueron de valor para diagnosticar y vigilar la falla respiratoria entre 1949 y 1952.

El análisis de O_2 , CO_2 y pH en la sangre arterial revolucionó el diagnóstico, vigilancia y tratamiento de la falla respiratoria. Su uso se extendió rápidamente desde mediados del siglo XX. Actualmente, en unidades de terapia intensiva, quirófanos y servicios de emergencia, es esencial contar con análisis de gases en sangre arterial inmediatos y repetidos. Los analizadores de gases en sangre, hoy en día, dan multitud parámetros no solamente gasométricos, sino de hemoglobina, equilibrio ácido-base, y metabólicos en segundos y en menos de 0.1 mL de sangre.

La oxigenoterapia ha salvado muchas vidas y mejora la calidad de vida de pacientes con insuficiencia respiratoria crónica. Para ello hay que contar con aportes confiables de oxígeno (cilindros de O_2 a presión, O_2 líquido en tanques criogénicos, concentradores de oxígeno móviles, estacionarios o portátiles) en los centros de atención médica, las ambulancias, a domicilio y portátiles. Este recurso es muy necesario para los pacientes agudos y crónicos, lo mismo el hospital o clínica, que en casa o durante sus actividades diarias. En 1965 el Dr. Thomas Petty (1932-2010) entonces joven docente médico en la Universidad de Colorado recibió el encargo de evaluar un novedoso prototipo de equipo para la oxigenoterapia, se apasionó con el tema y se dedicó a contrarrestar la idea de que el oxígeno era peligroso para los pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC); sus investigaciones sentaron las bases para la **oxigenoterapia a largo plazo (OTLP, LTOT en inglés)**, en pacientes ambulatorios (Heffner, 2013).

Los concentradores de oxígeno tuvieron un papel crucial en el tratamiento de pacientes durante la pandemia de COVID-19. Este

recurso contribuyó de manera crucial a la recuperación de muchos pacientes con niveles de oxígeno peligrosamente bajos que no pudieron ser tratados en un hospital.

Ventajas de los Concentradores de Oxígeno:

1. Se pueden utilizar en el hogar con más facilidad y menos riesgo que los cilindros de oxígeno.
2. Pueden proporcionar un suministro continuo de oxígeno mientras estén conectados a una fuente de energía eléctrica.
3. Al permitir que los pacientes con síntomas moderados reciban tratamiento en casa, ayudan a reducir la presión sobre los servicios hospitalarios y de emergencia.
4. La correcta oxigenación es crucial para la función celular y la recuperación general de los pacientes.

Durante la pandemia de COVID-19 aumentó grandemente la demanda de concentradores de oxígeno. La oferta no se pudo satisfacer debido a factores como:

1. Saturación de los servicios hospitalarios.
2. Restricciones de movilidad.
3. Interrupciones en la producción y el transporte de dispositivos.
4. Desigualdad en el acceso a servicios médicos entre países y grupos sociales (Ross M, 2023).

En el Centro de Investigación en Imagenología e Instrumentación Médica (CI³M) en la UAM-Iztapalapa, comenzamos a tra-

bajar en un prototipo de concentrador de oxígeno para uso médico, el cual pensamos escalar a un prototipo para producción. Con esto deseamos servir a la comunidad y aportar al conocimiento científico y tecnológico. Pensamos desarrollar primeramente un concentrador portátil, en segundo lugar uno adecuado para su instalación en aparatos de anestesia y por último un concentrador estacionario de mediano tamaño para uso en el domicilio o en pequeñas clínicas.

Obtención de Oxígeno a partir del aire *Composición del Aire*

El aire es una mezcla de gases. Sus principales componentes son nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y argón (Ar), con cantidades pequeñas de otros gases. (Figura 1.)

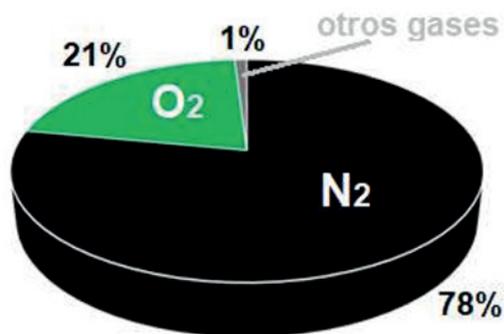


Figura 1. Composición aproximada del aire seco.

Nota: el aire húmedo contiene cierta cantidad de vapor dependiendo de la humedad relativa y de la temperatura ambiente.

Ilustración del autor.

Destilación fraccionada del aire líquido

La destilación fraccionada es el método más utilizado para obtener oxígeno puro del aire. Este proceso requiere grandes plantas industriales y produce grandes cantidades de nitrógeno, oxígeno, argón, xenón y neón. Hasta el momento domina

el mercado industrial, médico y científico de estos gases.

Concentradores por Adsorción

La adsorción consiste en que una sustancia, denominada adsorbato, que está dispersa o disuelta en un fluido (gaseoso o líquido) se adhiere a la superficie de otra sustancia sólida denominada adsorbente. Los adsorbentes, con frecuencia actúan atrapando el adsorbato por su tamaño o cargas moleculares, en ese caso se les conoce también como tamices moleculares.

Es muy conveniente y útil que la adsorción sea, por lo general, reversible. El proceso inverso a la adsorción se llama desorción y consiste en que el adsorbato se desprende del adsorbente, lo cual se puede favorecer mediante cambios de presión o de temperatura y mediante corrientes de fluido capaces de separar el adsorbato del adsorbente.

En la actualidad, para la separación del aire por adsorción, se cuenta con adsorbentes cada vez más eficientes.

Condiciones para la Separación del Aire

La separación del aire depende de los siguientes factores:

1. Tipo de adsorbente.
2. Selección del adsorbente
3. Diseño y control del proceso cíclico de adsorción-desorción.
4. Dimensiones y diseño de las columnas de adsorción.

Tipo de Adsorbente

Las zeolitas son minerales cristalinos com-

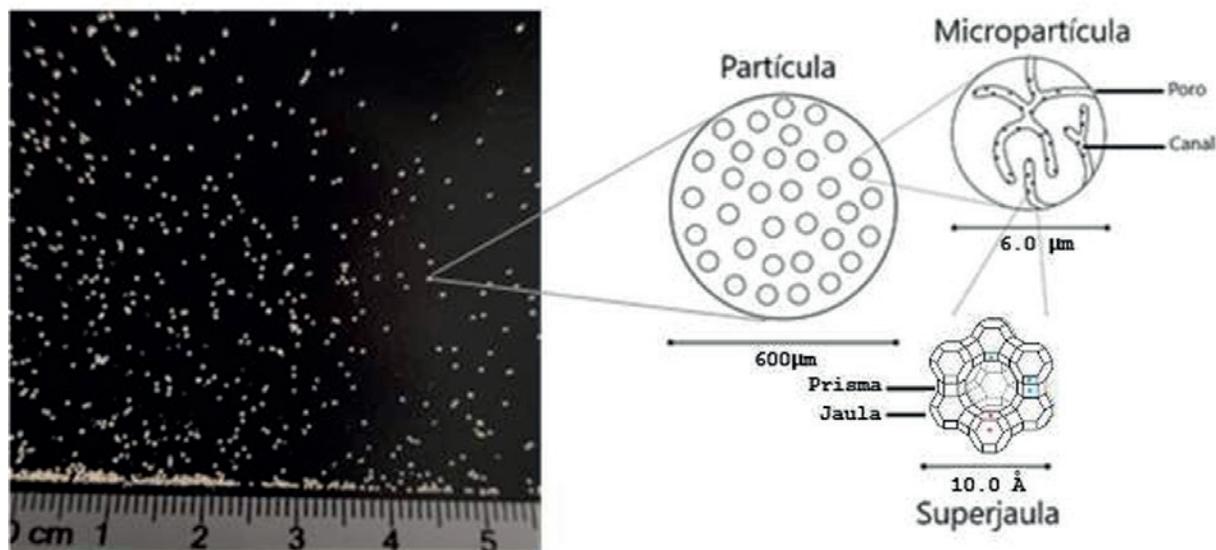


Figura 2. Zeolita LiLSX a diferente magnificación.

Izquierda: fotografía de las perlas de zeolita LiOX101® de Jalon®

Derecha, estructura microporosa (partícula y micropartícula) y cristalina (superjaulas, jaulas y prismas); los puntos de color en la superjaula son los sitios de los cationes no estructurales.

Fotografía del autor: Diagrama simplificado de: (Mingfei P, 2017) y de (Overweg, 1998).

puestos por aluminio silicatos con una estructura tridimensional de tetraedros de SiO_4 y AlO_4 . Cada tetraedro comparte átomos de oxígeno con tetraedros vecinos y van formando así estructuras mayores (Mitra S, 2021).

A simple vista es evidente que se trata de materiales porosos. Los estudios al microscopio electrónico y por refracción de Rayos X revelan que se trata de materiales microporosos.

La menor carga positiva del aluminio es compensada de forma natural por cationes como sodio, potasio, calcio y otros. Estos cationes no forman parte del armazón cristalino básico, por lo que se les llama cationes no estructurales, pero ocupan si-

tios específicos dentro del armazón y son importantes para la adsorción. (Figura 2). Los cationes no estructurales se pueden cambiar mediante técnicas de intercambio iónico, esto permite modificar la capacidad adsorbente de la zeolita.

La zeolita que ha resultado más eficaz para adsorber nitrógeno y dejar pasar oxígeno es la zeolita LiLSX. En esta zeolita los iones nativos de sodio (Na^+) se han intercambiado por iones de litio (Li^+),¹ tiene baja proporción silicio/aluminio (LS: Low Silicon) y su estructura es del tipo X.²

El material viene en forma de *esferitas* o *perlas* de zeolita (*beads* en inglés)³ cuya forma y

¹ Existen también zeolitas sustituidas con calcio, plata y otros metales.

Todas las zeolitas de tipo X (faujasitas con Li, Ca, Ag y otros cationes) han probado ser útiles en la separación del aire.

² Las faujasitas existen en dos tipos de estructura X e Y. Las tipo Y tienen menor proporción Si/Al.

³ Diminutas esferas de 0.4 a 0.8 mm de diámetro.

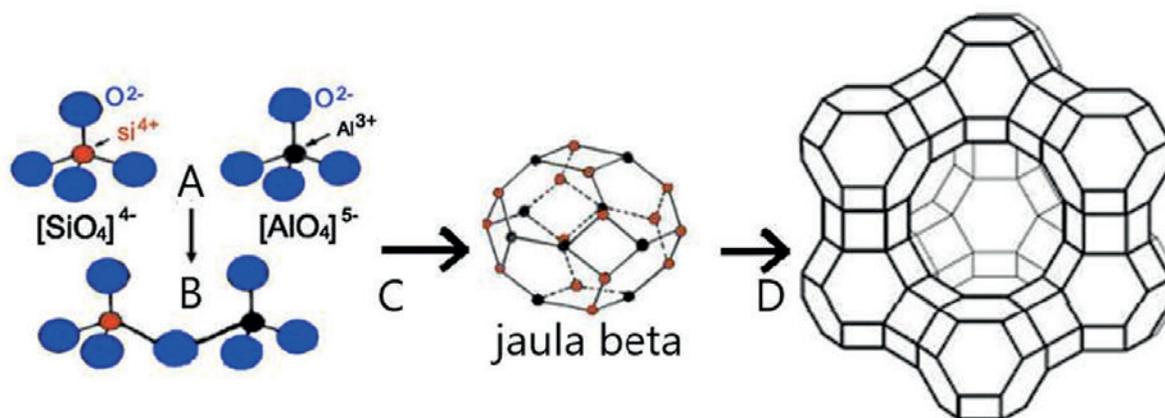


Figura 3. AlO_4 y SiO_4 en la estructura de las zeolitas.

A Oxidos de aluminio y de silicio. **B** tetraedros de aluminio-silicato. **C** jaulas beta (nótese la presencia de silicio (círculos rojos) y aluminio (círculos negros) y cómo la estructura de tetraedros da origen a jaulas y prismas. **D** superjaulas formadas por prismas hexagonales y octaedros truncados que se unen formando anillos de 12 caras.

Diagrama adaptado de la Figura 1 de (Mitra S, 2021)

tamaño pueden variar según el tipo de concentraador. Las *perlas* se forman al aglutinar polvo de zeolita con caolín u otras arcillas.

La estructura microporosa y cristalina de la Zeolita que estamos utilizando es muy interesante y se ilustra en las Figuras 2 y 3.

Los tetraedros de SiO_4^{4-} y AlO_4^{5-} son la estructura primaria de la zeolita; entre ellos crean la estructura secundaria: un arreglo geométrico de cuadrados y hexágonos que a su vez se asocian formando prismas hexagonales y otros cuerpos geométricos tridimensionales, como el notable octaedro truncado o *tetrakaidecaedro*,⁴ que se ha encontrado en numerosos minerales porosos y en las espumas de polímeros viscoelásticos. El conjunto de estos armazones geométricos (superjaulas y más) va formando una estructura cada vez más compleja.

Como amante de la fisiología respiratoria, me fascina que en escritos recientes se habla del uso de patrones geométricos parecidos a estos con el fin de obtener modelos matemáticos multinivel que conducen desde las propiedades viscoelásticas de cada acino pulmonar⁵ hasta las del pulmón completo, y predicen los resultados de los estudios de la función pulmonar en la salud y la enfermedad. (Hurtado DE, 2023)

Selección del Adsorbente

Para caracterizar el desempeño de los adsorbentes en la separación del aire, se utiliza algunos de los siguientes parámetros y técnicas:

- Capacidad de Adsorción estática y dinámica:
 - o La primera mide la cantidad de gas ad-

⁴ El nombre deriva del griego: tetrakaideca que significa 14. La figura está formada por ocho caras hexagonales y seis cuadradas.

⁵ Unidad anatómica y funcional del pulmón que se define como la porción del pulmón que recibe aire de un solo bronquiolo terminal.

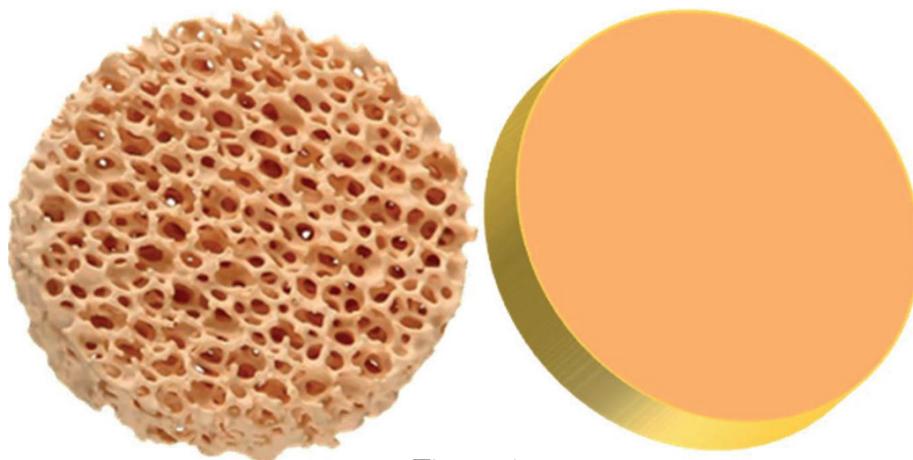


Figura 4.

A: Material poroso

B: material macizo

Aun suponiendo una afinidad similar por el adsorbato, un adsorbente poroso presenta una mayor superficie para la adsorción.

sorbido por unidad de masa del adsorbente en condiciones de equilibrio.

- o La segunda la cantidad de gas adsorbido en flujo continuo antes de que el adsorbente se sature.

- Área de superficie y porosidad:

- o Son, respectivamente el área por unidad de masa que el adsorbente ofrece para la adhesión del adsorbato, y la distribución de tamaño de sus poros. Son características que determinan la capacidad de adsorción. (Figura 4).

- Selectividad:

- o La selectividad es la diferencia en la capacidad para adsorber cada componente. Puede medirse en mezclas de gases o en los gases puros por separado. (Figuras 5 y 6)

- Cinética de Adsorción:

- o Mide la rapidez con la que el adsorbente

captura el gas.

- Isotermas de Adsorción:

- o Las isotermas indican cómo cambia la adsorción de cada gas a diferentes presiones y temperaturas. (Figuras 5 y 6)

- Estabilidad:

- o Evalúa el comportamiento del adsorbente a través de múltiples ciclos de adsorción y desorción.

- Resistencia Mecánica:

- o Cuánto tiempo resiste el adsorbente la abrasión y compresión que experimenta en condiciones operativas.

- Termogravimetría (TGA):

- o Proporciona información sobre la estabilidad térmica.

El artículo de Wu (Wu C-W, 2014), contiene estudios experimentales cuidadoso-

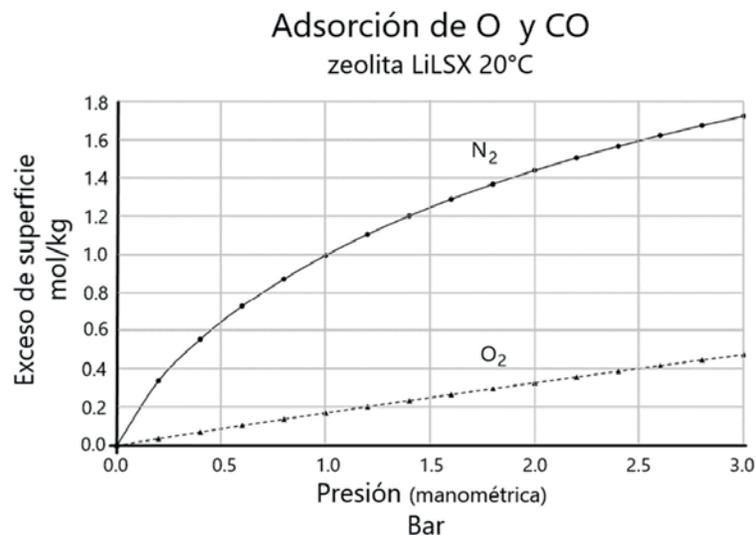


Figura 5. La diferente capacidad de adsorción de N₂ comparada con la de adsorción de O₂ se aprovecha para obtener oxígeno a partir del aire.

Gráfica basada en (Mingfei P, 2017)

En zeolita LiLSX comercial y es el único que encontré en la literatura que da una descripción detallada de las propiedades de adsorción de N₂ y O₂ puros y ante mezclas con diferentes proporciones de N₂ y O₂. (Figura 6)

Diseño y Control del Proceso Cíclico de Adsorción-desorción

La afinidad la zeolita LSLiX por el nitrógeno es mayor que por el oxígeno (Figura 5). El grado de afinidad aumenta con la presión y disminuye con la temperatura, sin embargo las isotermas son más rectilíneas y con pendientes menores para el O₂ que para el CO₂. (Figura 6).

Por tal razón, el proceso de adsorción-desorción se realiza en dos fases, una con mayor presión que la otra, por lo que es un proceso de adsorción por alternancia de presión (PAAP). Se suele emplear dos co-

lumnas,⁶ para que una esté en la fase de mayor presión (adsorción) mientras la otra está en la de menor presión (desorción).

En años recientes se ha preferido usar un proceso en el que la presión baja es menor que la atmosférica, en este caso se trata de un proceso de adsorción por alternancia de presión y vacío (PAAVP).

Dimensiones y Diseño de las Columnas de Adsorción.

El diseño de las columnas de adsorción y del proceso debe basarse en modelado y simulación numérica para elegir los parámetros óptimos tanto en dimensiones como en tiempos.

Existen varios programas de simulación que son una ayuda clave en este tema al permitir modelado dinámico y simulación de alternativas de diseño y cambios de

⁶ Existen diseños que usan una sola columna de adsorción, o más de una, por lo general en números pares.

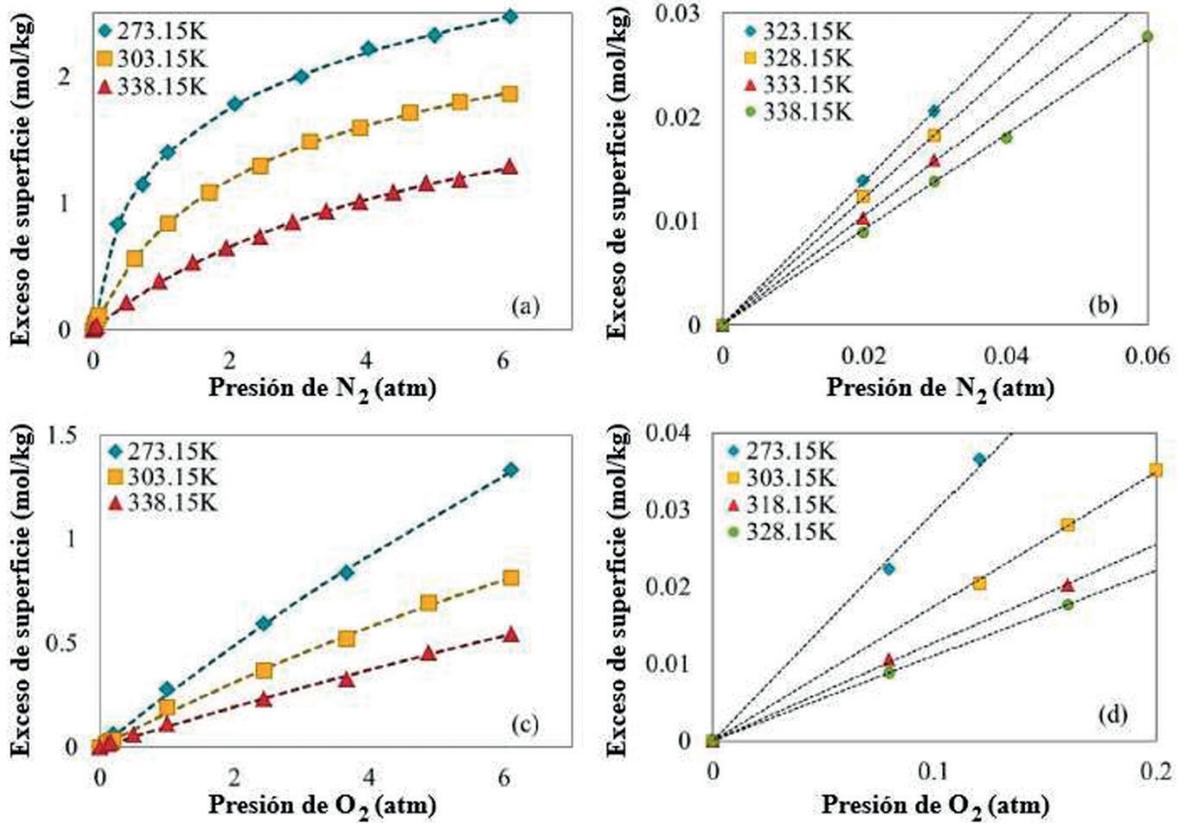


Figura 6. Isothermas de adsorción de N₂ y O₂ en zeolita LiLSX
Del lado derecho: Adsorción, medida como “Exceso de superficie” a presiones entre 0 y 6 atm y tres temperaturas, arriba para el N₂ y abajo para el O₂.
Del lado izquierdo: Adsorción a presiones bajas. La adsorción de N₂ disminuye aunque sigue siendo, mayor que la del O₂.

Del lado izquierdo: Presiones en la región donde es válida la ley de Henry y cuatro temperaturas
 Gráficas basadas en (Wu C-W, 2014)

parámetros de operación. Algunas publicaciones reportan desarrollo de diseños poco comunes para la separación de aire en procesos de adsorción, tales como flujo radial, direccionamiento con válvulas giratorias, alternancia rápida de la presión.

El diseño y la construcción del sistema tienen que basarse en:

1. Conocimiento detallado de los procesos de adsorción pertinentes.

2. Uso de programas o plataformas para modelado y simulación numérica y optimización de parámetros.

3. Excelencia en los materiales, manufactura y dispositivos.

En esta etapa de la construcción y prueba de nuestro prototipo, hemos enfrentado problemas cuando no cumplimos estrictamente las normas anteriores.

Usos del Oxígeno Concentrado.

Los segmentos del mercado del oxígeno concentrado son principalmente el **industrial** (más de 70% de la demanda) y el **médico** (más de 20% de la demanda), principalmente en la oxigenoterapia de enfermedades respiratorias crónicas en los hospitales y a largo plazo (a domicilio o durante actividades diversas fuera de casa).

Nichos importantes son: aeroespacial, laboratorios, actividades recreativas o productivas a gran altitud, actividades laborales a mediana altitud (2000 a 4000 msnm).

Nuestro Proyecto

Desde la pandemia 2020 nos propusimos estudiar, diseñar y producir un concentrador de oxígeno para uso médico (COM).

Retos y Decisiones

Estábamos ante un conjunto de retos y decisiones:

1. Tipo de COM.
2. Campo de aplicación.
3. Tamaño.
4. Rendimiento.
5. Costo.
6. Rentabilidad.

Cada uno de ellos es un reto importante y una decisión riesgosa.

Por razones prácticas, comenzamos con un prototipo pequeño pero no miniaturizado. Queremos reunir características que puedan significar ventajas competi-

tivas y que cubran necesidades percibidas. Sabemos que aunque la pandemia estimuló la producción de concentradores de oxígeno de uso médico, no todos los productos en venta cumplen con los requisitos mínimos.

Clientes Potenciales.

Necesitamos conocer mejor a nuestros clientes potenciales y sus requerimientos. ¿Quiénes son nuestros clientes potenciales? Entre ellos, por supuesto, están los siguientes:

- Pacientes respiratorios.
 - Agudos
 - Crónicos (oxigenoterapia a largo plazo)
- Proveedores de servicios de salud.
 - Clínicas pequeñas poblaciones pequeñas).
 - Sector público.
 - Sector privado.
- Familiares de pacientes.
- Proveedores de aparatos médicos.
- Servicios de Gestión de equipos médicos.
- Fabricantes de equipos que incorporen un concentrador de oxígeno.

Proceso de Adsorción por Alternancia de Presión y Vacío (PAAPV)

La Figura 7 muestra un diagrama de bloques que contiene los pasos principales y muestra las seis vías del proceso.

Empleamos dos columnas de adsorción verticales y tres pequeños tanques de almacenamiento: aire comprimido, producto y vacío.

Ciclo

El ciclo de nuestro prototipo es de dos fases: Las fases difieren solamente en cuál de las dos columnas está en producción (adsorción de N_2 para producir O_2 concentrado) y cuál en recuperación (desorción de N_2 y descarga del aire pobre en O_2).

Etapas del Ciclo (Tabla 1):

- a. El extremo superior de ambas columnas está cerrado. Por su extremo inferior: la columna que estará en producción se conecta con, el tanque de aire comprimido hasta que sus presiones se igualan (**etapa de presurización**). La columna que estará en recuperación, se abre al aire ambiente (**etapa de descompresión pasiva**).
- b. El extremo superior de la columna en producción, se abre a la vía de producto y el producto se almacena en el tanque respectivo; una válvula de control garantiza que la columna no entregue producto a presión menor a 2 Bar; esto mantiene la presión del proceso a esa misma presión (**etapa de producción inicial**). El extremo superior de columna en recuperación sigue cerrado, y el extremo inferior se conecta a la vía de vacío (**etapa de evacuación**).
- c. El extremo inferior de la columna continúa conectado al aire comprimido, y su extremo superior continúa conectado a la vía de producto (**etapa de producción**); su extremo inferior continúa conectado al aire comprimido. Una electroválvula conecta la vía de producto con la vía de purga, de forma que la mayor parte del producto siga yendo al tanque de producto, mientras una parte menor va, por la vía de purga, al extremo superior de la columna en recuperación (**etapa de purga**), si es necesario, se permite que parte de la purga sea con aire ambiente.
- d. El extremo inferior de ambas columnas se cierra al tiempo que se interconectan sus extremos superiores. Esto iguala las presiones y prepara ambas columnas para que, en la siguiente fase (**etapa de equalización de presiones**). En cada nueva fase, repiten las cuatro etapas, pero las columnas cambian roles.

Vías del flujo (Figura 7)

- **Vía de Aire Comprimido:** El aire ambiente, comprimido por una bomba, se almacena en un pequeño tanque, pasa por filtros de partículas y humedad, y se envía a la columna en fase de producción.
- **Vía de Producto:** El oxígeno concentrado se almacena en un tanque, del cual la mayor parte se usa para administrarlo al paciente. Una parte menor se utiliza para que la columna en fase de recuperación (a presión inferior a la atmosférica) reciba una mezcla pobre en nitrógeno, facilitando así la desorción del N_2 y la recuperación de la capacidad de adsorción del adsorbente.
- **Vía de "Vacío":** Consta de una bomba de vacío que genera una presión de 0.6 Bar por debajo de la presión atmosférica y un tanque que contiene el aire a baja presión. Esta vía aplica esta presión subatmosférica a la columna que entrará en fase de recuperación.
- **Vía de "Purga":** Conduce una parte del producto y una parte del aire ambiente hacia la columna que está conectada a la vía de "vacío".

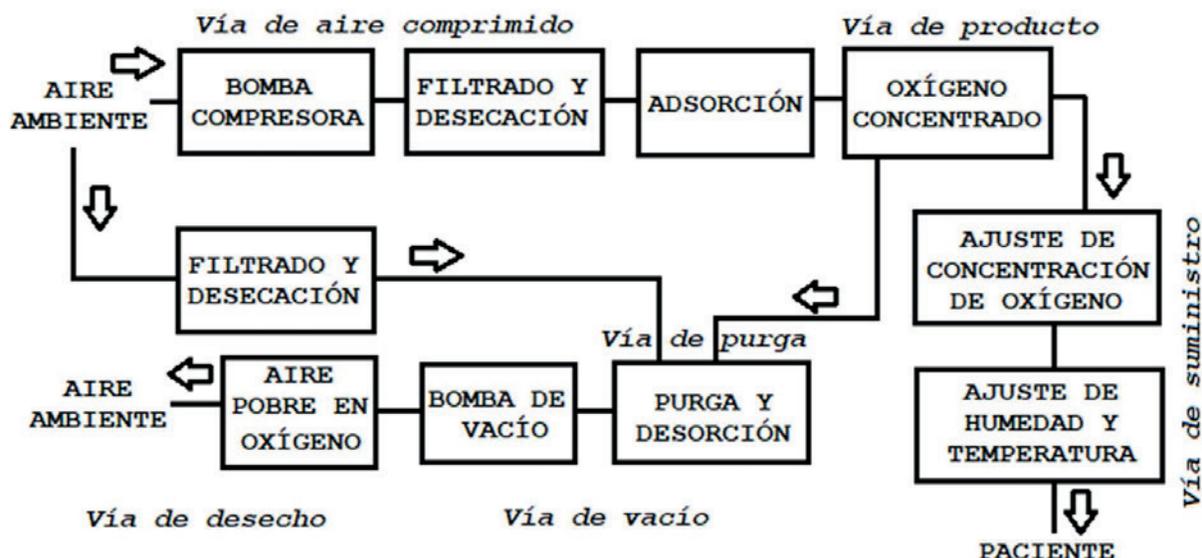


Figura 7. Proceso de adsorción por alternancia de presión y vacío (PAAPV)
(Descripción en el texto)

- Vía de Suministro: Conduce la mayor parte del producto hacia el paciente; se ajusta la concentración de oxígeno (menor concentración permite mayor caudal), la humedad y la temperatura, y finalmente el caudal.
- Vía de Desecho: Es la vía por la que sale a la atmósfera el aire pobre en oxígeno.

El cierre o apertura de cada vía, la dirección y sentido del flujo de aire se regulan mediante electroválvulas y diferencias de presión.

El aire ambiente pasa por dos filtros: uno de partículas y agua de condensación y otro desecante; bien sea que se dirija a la vía de aire comprimido o a la vía de purga.

En puntos clave, tenemos sensores de presión o de caudal y reguladores de caudal. Una válvula reguladora de presión co-

rriente arriba⁷ regula la presión del proceso de adsorción.

Visión a futuro

Las siguientes son áreas de oportunidad:

1. Colaboración con centros de investigación y educación superior.
2. Colaboración con la industria.
3. Conocimiento del mercado de los concentradores de oxígeno.
4. Planeación estratégica y de negocio.
5. Conocimiento, modelado y optimización del proceso.
6. Pruebas intensivas de laboratorio.
7. Pruebas extensivas de campo de aplicación.

⁷ Se trata de una válvula muy simple pero ideal para este uso. Consiste en un diafragma sujeto a la presión piloto por un lado, y a la presión corriente arriba por el otro (cámara de entrada). Si la presión a la entrada supera a la presión piloto, el diafragma se eleva y permite el paso de la cámara de entrada a la de salida; si la presión descende, el diafragma también descende y bloquea el paso hacia la cámara de salida.

8. Mejores sistemas electrónicos, de control, información y comunicación, en el prototipo y en el dispositivo final.

Conclusiones

Los concentradores de oxígeno de uso médico son esenciales en la atención de enfermedades y condiciones que afectan la función respiratoria, tanto en su fase aguda como crónica.

Los concentradores de oxígeno basados en adsorción de nitrógeno están ocupando un lugar cada vez más importante en todas las aplicaciones donde se requiere de oxígeno concentrado, desde litros por minuto hasta metros cúbicos por hora.

Referencias

Ballester R, P. M. (2012). La lucha europea contra la presencia epidémica de la poliomielitis: una reflexión histórica. *Dynamis*, 32(2), 273. 285. doi:<https://dx.doi.org/10.4321/S021195362012000200001>

Barach, A. (26 de 08 de 1922). The Therapeutic Use of Oxygen. *The Journal of the American Medical Association*, 79(9), 693 - 699. Recuperado el 4 de 09 de 2024, de <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/9JPKkAw4/>

Heffner, J. (01 de 2013). The Story of Oxygen. *Respiratory Care*, 58(1), 18 - 30. doi:10.4187/respcare.01831

Hurtado DE, A.-R. N. (25 de 06 de 2023). Multiscale modeling of lung mechanics: From alveolar microstructure to pulmonary function. *J Mech Phys Solids*, 179, 1 - 17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2023.105364>

Mingfei P, H. O. (25 de 07 de 2017). *www.mdpi.com/journal/nanomaterials*. doi:<https://doi.org/10.3390/nano7080195>

[tps://doi.org/10.3390/nano7080195](https://doi.org/10.3390/nano7080195)

Mitra S, S. V. (10 de 05 de 2021). Diffusion of confined fluids in microporous zeolites and clay materials. *Reports on Progress in Physics*, 84(066501), 49 pp. doi:10.1088/1361-6633/abf085

Overweg. (01 de 01 de 1998). The preparation, modification and characterization of some molecular sieve materials. [PhD Thesis 1 (Research TU/e / Graduation TU/e), Chemical Engineering and Chemistry], 1 - 119. Eindhoven, Bravante Septentrional, Países Bajos. doi:<https://doi.org/10.6100/IR515647>

Ross M, W. S. (2023). Oxygdn inequity in the COVID-19 pandemic and beyond. *Glob Health Sci Pract*, 11(1), e2200360 (7 pp). doi:<https://doi.org/10.9745/GHSP-D-22-00360>

Science History Institute. (s.f.). <https://www.sciencehistory.org/>. Recuperado el 25 de 09 de 2024, de <https://www.sciencehistory.org/education/scientific-biographies/arnold-o-beckman/>

Shultz SM, H. P. (2005). George E Holzapple (1862-1946) and Oxygen Therapy for Lobar Pneumonia: The First Reported Case (1877) and Review of the Contemporary Literature to 1899. *Journal of Medical Biography*, 13(4), 201 - 206. doi:10.177/09777200501300405

Wu C-W, K. M. (2014). Equilibrium Adsorption Isotherms of Pure N₂ and O₂ and Their Binary Mixtures on LiLSx Zeolite: Experimental Data and Thermodynamic Analysis. 53, 7195 - 7201. doi:[doi:doi.org/10.1021/ie500268s](https://doi.org/10.1021/ie500268s)