

Health Sovereignty in the Ecuadorian Amazon: Design of a Sustainable Oxygen Plant Leveraging Local Atmospheric Resources.

Abstract— The COVID-19 pandemic revealed critical deficiencies in the health systems of low- and middle-income countries, such as Ecuador, where the distribution of medical oxygen is centralized and limited, severely impacting isolated regions like Sucumbíos. Given the vital importance of this resource, this technical report presents the development of an on-site oxygen generation plant based on Pressure Swing Adsorption (PSA) technology, with a capacity of 5 m³/h and adapted to the conditions of the Amazon region. This approach addresses the need to strengthen health sovereignty, reduce logistical dependence, and increase resilience to future crises.

The design incorporates Quality Function Deployment (QFD) methodology to ensure that the technical specifications meet regional clinical demands. Furthermore, safety is validated through finite element analysis (FEA) and computational fluid dynamics (CFD) simulations, complying with industry standards. The document presents innovations compared to the state of the art, analyzes limitations such as atmospheric purity and tropical humidity, and proposes strategies for industrial scaling and remote monitoring, guaranteeing a sustainable and autonomous supply for the Ecuadorian Amazon.

Keywords-- Medical oxygen, Health sovereignty, PSA, Resilience, Amazon.

Soberanía sanitaria en la Amazonía ecuatoriana: Diseño de una planta de oxígeno sostenible aprovechando los recursos atmosféricos locales.

Resumen— La pandemia de COVID-19 reveló deficiencias críticas en los sistemas de salud de países de ingresos bajos y medios, como Ecuador, donde la distribución de oxígeno medicinal es centralizada y limitada, afectando gravemente a regiones aisladas como Sucumbíos. Considerando la importancia vital de este insumo, se presenta un informe técnico que desarrolla una planta de generación de oxígeno in situ basada en tecnología de Adsorción por Oscilación de Presión (PSA), con capacidad de 5 m³/h y adaptada a las condiciones de la Amazonía. Este enfoque responde a la necesidad de fortalecer la soberanía sanitaria, reducir la dependencia logística y aumentar la resiliencia frente a futuras crisis. El diseño integra la metodología de Despliegue de la Función de Calidad (QFD) para asegurar que las especificaciones técnicas respondan a las demandas clínicas regionales. Además, se valida la seguridad mediante simulaciones de análisis de elementos finitos (FEA) y dinámica de fluidos computacional (CFD), cumpliendo estándares industriales. El documento expone innovaciones frente al estado del arte, analiza limitaciones como la pureza atmosférica y la humedad tropical, y plantea estrategias para el escalamiento industrial y la monitorización remota, garantizando un suministro sostenible y autónomo para la Amazonía ecuatoriana.

Palabras clave— Oxígeno medicinal, Soberanía sanitaria, PSA, Resiliencia, Amazonía.

I. INTRODUCCIÓN

Contexto Global y Crisis de Suministro de Oxígeno Medicinal

La pandemia originada por el virus SARS-CoV-2 en 2020 alteró de forma irreversible la percepción global sobre la infraestructura médica y la preparación ante emergencias sanitarias [1]. El oxígeno medicinal dejó de ser percibido como un suministro hospitalario rutinario, de fondo, para consolidarse en la conciencia pública y política como una tecnología que salva vidas de manera directa y urgente [2]. A pesar de que la Organización Mundial de la Salud incluyó al oxígeno en su lista de medicamentos esenciales desde 2017, las estimaciones previas a la pandemia indicaban que apenas el 20% de los pacientes en países de ingresos bajos y medios que requerían oxigenoterapia lograban acceder a ella [3]. Durante las sucesivas olas pandémicas, la incapacidad de suministrar este insumo no fue, en la mayoría de los casos, consecuencia de una carencia tecnológica a nivel global, sino el resultado directo de un fracaso sistémico en las arquitecturas de las cadenas de

distribución y una acentuada inequidad en la capacidad de producción local.

Para las regiones con geografías complejas, orografías accidentadas o infraestructuras viales precarias, este fallo logístico estructural se tradujo rápidamente en una catástrofe de salud pública inmanejable [1]. Los sistemas tradicionales de suministro, dependientes del transporte de oxígeno líquido criogénico (LOX) en camiones cisterna o del acarreo de pesados cilindros de acero de alta presión, demostraron ser inherentemente frágiles ante interrupciones de la cadena de suministro. Las lecciones extraídas de este colapso global subrayan la necesidad urgente de rediseñar las arquitecturas de suministro médico, transitando desde modelos dependientes y centralizados hacia sistemas de producción distribuida que garanticen la disponibilidad continua en el punto de atención.

Realidad Ecuatoriana: Centralización, Geografía y Oligopolio

El mercado de gases medicinales e industriales en la República del Ecuador constituye un caso de estudio paradigmático sobre los riesgos de la centralización extrema. La industria se caracteriza por una estructura de mercado marcadamente oligopólica, donde el dominio de la fabricación, fraccionamiento y distribución a nivel nacional recae en un reducido número de corporaciones multinacionales y grandes empresas nacionales: Swiss Gas, Linde, Indura y Enox [1].

Para la provincia amazónica de Sucumbíos, y muy particularmente para su capital económica y administrativa, Lago Agrio, este modelo de suministro impone una cadena de custodia extremadamente vulnerable [1]. El oxígeno, en su estado líquido o comprimido, debe ser transportado a lo largo de rutas que superan los 250 kilómetros, atravesando la escarpada Cordillera de los Andes [3]. Esta ruta logística está permanentemente expuesta a interrupciones críticas derivadas de la inestabilidad geológica (deslaves), factores climatológicos adversos, y, con preocupante frecuencia, paralizaciones viales por inestabilidad sociopolítica [2].

Aporte Innovador de la Investigación frente al Estado del Arte

Ante este escenario de vulnerabilidad estructural, la transición hacia la generación autónoma de oxígeno mediante la tecnología de Adsorción por Oscilación de Presión (PSA) [1] emerge como una solución imperativa. Sin embargo, resulta esencial delimitar claramente cuál es el aporte verdaderamente innovador de la presente investigación frente al estado del arte existente en la ingeniería de gases medicinales.

Más aún, el proyecto innova en el ámbito socio técnico al proponer un diseño de manufactura abierta que utiliza materiales disponibles en la región (como el acero ASTM A36) y mano de obra local, promoviendo una transferencia tecnológica real que transforma a los antiguos distribuidores pasivos en núcleos activos de producción industrial [3]. Este enfoque socio-técnico redefine la infraestructura como un vehículo para la justicia social, superando el estado del arte que tradicionalmente aborda la provisión de oxígeno como un simple problema de adquisiciones comerciales.

II. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL

La viabilidad de descentralizar la producción de gases medicinales requiere una fundamentación teórica que entrelace la política de salud pública, el análisis físico-químico del entorno ambiental y la ciencia de materiales aplicada a la separación de gases.

A. La Soberanía Sanitaria como Eje de la Política Pública.

En el Ecuador, la soberanía sanitaria se alinea de manera convergente con los objetivos trazados en el Plan Decenal de Salud del Ecuador 2022-2031, una política pública diseñada de manera participativa que busca transformar estructuralmente el sistema nacional, promoviendo la equidad, el acceso descentralizado a las tecnologías y abordando los determinantes sociales de la salud desde un enfoque preventivo e integral [2]. Los Consejos de Salud locales y los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) están llamados a integrar estos objetivos en la gestión de sus territorios.

En este marco, la instalación de una red de plantas PSA en la Amazonía corrige una asimetría histórica de desarrollo industrial. Para los hospitales de la red pública en Sucumbíos, dejar de ser el eslabón final, pasivo y vulnerable de una cadena logística controlada desde la Costa y la Sierra representa una conquista tangible en términos de independencia y equidad [4]. Múltiples organismos multilaterales, incluyendo Unitaid, el Banco Mundial, la Alianza Mundial del Oxígeno (GO2AL) y el Fondo Mundial, han comenzado a priorizar de forma contundente la financiación de infraestructuras PSA in situ en el Sur Global, reconociendo que este modelo descentralizado es el mecanismo más eficaz para materializar la soberanía sanitaria a nivel comunitario [2].

B. Estado del Arte - Tecnología de Producción de Oxígeno

Para justificar la elección tecnológica del diseño, es imperativo establecer una comparación sistemática con los métodos alternativos de producción de oxígeno disponibles a nivel industrial y médico [1]. La separación del oxígeno contenido en el aire atmosférico se logra predominantemente mediante tres vías tecnológicas fundamentales:

Parámetro / Tecnología	Destilación Criogénica (ASU)	Adsorción por Oscilación de Presión (PSA)	Adsorción por Vacío y Presión (VPSA)
Principio Físico	Licuefacción por enfriamiento extremo (-196 °C) y destilación fraccionada por puntos de ebullición.	Separación de gases a temperatura ambiente usando tamices moleculares bajo alta presión.	Separación similar al PSA, pero la regeneración del lecho se realiza aplicando vacío.
Pureza Típica del Oxígeno	> 99.5% (Alta pureza)	90% - 96% (Típicamente 93% ± 3%)	90% - 93%
Escala de Producción	Masiva (Tonelaje industrial, cientos a miles de m3/h)	Pequeña a Mediana (1 a 200 m³ /h)	Mediana a Grande
CAPEX (Inversión Inicial)	Extremadamente alto (Requiere infraestructura civil compleja)	Moderado (Diseño modular y compacto)	Alto (Requiere bombas de vacío especializadas)
Consumo Energético	Muy alto en valores absolutos, pero eficiente para flujos masivos	Aproximadamente 1.0–1.5 kWh/m³	Más eficiente que PSA para escalas mayores, aprox. 0.5 kWh/m³
Flexibilidad Operativa	Baja (Requiere operación continua ininterrumpida; el encendido/apagado es lento y costoso)	Alta (Puede encenderse y apagarse según la demanda local en minutos)	Media

Tabla 2: Análisis comparativo de las tecnologías de separación de aire en el estado del arte.

El análisis técnico demuestra inequívocamente que, para el contexto de un sistema descentralizado orientado a abastecer

centros de salud regionales con demandas de alrededor de 5 a 20 m^3 /h, la tecnología de destilación criogénica resulta inviable debido a la falta de economías de escala y su dependencia de una red eléctrica de altísima potencia [1],[2]. Por otro lado, aunque la tecnología VPSA ofrece eficiencias energéticas marginalmente superiores, introduce una complejidad mecánica indeseada al requerir sistemas de vacío sofisticados, lo cual es contraproducente en zonas remotas.

En consecuencia, la tecnología PSA, con su equilibrio óptimo entre modularidad, costo de capital, y producción de oxígeno al 93% (plenamente avalado por farmacopeas internacionales para terapia respiratoria), se erige como el estándar más apropiado.

C. Dinámica Atmosférica y Concentración de Oxígeno.

El diseño propuesto se apoya en un dato empírico preliminar de inmenso valor: mediciones de campo realizadas in situ durante la fase de estudio en el cantón Lago Agrio indicaron una concentración volumétrica de oxígeno atmosférico del 22% [1]. Para fundamentar esta anomalía local registrada por la instrumentación de campo, el diseño se alinea con investigaciones publicadas en *Frontiers in Marine Science* (Gagne-Maynard et al., 2017) que documentan cómo la alta densidad de biomasa, la respiración del ecosistema y los regímenes de precipitación en la cuenca del Amazonas provocan variaciones y desviaciones espaciales en la dinámica de gases disueltos y atmosféricos frente a los promedios globales estandarizados [2]. Esta desviación empírica del 1% por encima de la media global (20.95%) proporciona una ventaja termodinámica y molar significativa para la separación inicial, requiriendo teóricamente un volumen menor de aire procesado [3].

Aunque las altas tasas de transpiración en la selva ecuatorial amazónica son críticas, la estacionalidad de estas bolsas microclimáticas y los efectos de inversión térmica implican que una alta saturación del 22% podría representar anomalías temporales. Por ende, si bien el equipo dimensionó eficazmente los caudales tomando este registro medido in situ, se subraya metodológicamente la inclusión de factores de seguridad conservadores dentro de las lógicas de automatización de las válvulas, permitiendo que la máquina produzca eficientemente incluso si la atmósfera retorna a su composición volumétrica general (20.95%).

III. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Síntesis y Optimización del Diseño Técnico

A. Función de Calidad (QFD) y Dimensionamiento

El diseño de infraestructura crítica en países en desarrollo a menudo fracasa porque las especificaciones técnicas no se ajustan a la realidad clínica, operativa y económica del entorno de destino. Para sortear este escollo, el proyecto adoptó la

metodología de Despliegue de la Función de Calidad (QFD), una técnica estructurada que captura la "Voz del Cliente" (en este caso, las prioridades de los directores de los 13 establecimientos de salud encuestados en el cantón Lago Agrio) y la traduce algorítmicamente en especificaciones de ingeniería medibles y verificables [1].

Las encuestas determinaron que los factores críticos para los establecimientos médicos eran la constancia en el suministro (evitar rupturas de inventario crónicas) y la seguridad operativa del sistema bajo las variables climáticas locales [5]. Estos requerimientos impulsaron el dimensionamiento de una planta con capacidad nominal de 5 m^3 /h, permitiendo procesar hasta 120 m^3 diarios operando en tres turnos (24 horas) [2]. Esta volumetría no solo es suficiente para cubrir la demanda histórica del mercado local, sino que ofrece una capacidad ociosa estratégica que puede ser dirigida a clínicas privadas o pequeñas industrias metalmeccánicas de la zona.

A partir de la capacidad deseada, el dimensionamiento termodinámico se fundamentó en un flujo de entrada del compresor primario de 10,000 m^3 /h de aire ambiental, calculado a partir de las condiciones de presión ($P=101,325$ Pa) y temperatura base ($T=293$ K) de Lago Agrio.

Para validar matemáticamente este dimensionamiento y garantizar el cumplimiento riguroso de la Ley de los Gases Ideales ($PV=nRT$), es imprescindible someter el análisis al factor de compresibilidad (Z). De acuerdo con los textos fundamentales de termodinámica aplicada y las bases de datos de propiedades de fluidos de la National Institute of Standards and Technology (NIST), el factor Z evalúa la desviación de un gas real frente al comportamiento ideal [3].

La literatura demuestra consistentemente que para el aire atmosférico (compuesto mayoritariamente por nitrógeno y oxígeno) operando a una temperatura ambiente aproximada de 293 K (20 °C) y a presiones moderadas de hasta 10 MPa (100 bar), el factor de compresibilidad se mantiene convergiendo de manera casi perfecta hacia la unidad ($Z \approx 1$). Dado que la presión interna de diseño de la planta no excede los 1.2 MPa (12 bar), la desviación respecto al gas ideal es estadísticamente insignificante (menor al 1%), lo que avala sólidamente el uso de la ecuación $PV=nRT$ sin introducir errores de desviación de masa en el cálculo del flujo de ingeniería.

B. Validación mediante Elementos Finitos (FEA)

Los sistemas a presión representan un riesgo latente significativo; un fallo por fatiga en un cilindro o tanque acumulador de aire comprimido puede tener consecuencias destructivas. Para mitigar estos riesgos de manera cuantitativa, se modeló el diseño físico tridimensional empleando la plataforma CAD SOLIDWORKS y se ejecutó un Análisis de Elementos Finitos (FEA) avanzado en el entorno de simulación ANSYS Workbench [1].

El diseño se estandarizó en torno al uso de planchas de acero al carbono ASTM A36 con un espesor constante de media pulgada (1/2"), material seleccionado deliberadamente por su balance óptimo entre resistencia mecánica, alta tenacidad y, fundamentalmente, su facilidad de soldadura (utilizando electrodos comunes E7018) y mecanizado por parte de técnicos y artesanos metalmecánicos locales, lo cual reduce drásticamente la dependencia de componentes de importación especializados.

El análisis FEA sometió el diseño geométrico a una presión hidrostática uniforme de 1.2 MPa (12 bar) como condición de borde límite. El mallado de simulación se refinó en las zonas de mayor estrés geométrico: las soldaduras de las boquillas de entrada/salida y las juntas con las tapas hemisféricas.

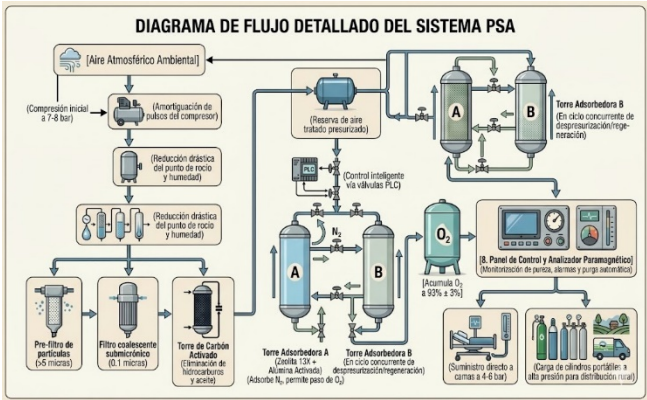


Fig. 1 Diagrama de flujo

El análisis de tensiones equivalentes de Von Mises arrojó un Factor de Seguridad (FS) global mínimo de 2.3 [2] para los componentes principales. Considerando la teoría de diseño de recipientes a presión y los códigos internacionales como ASME Sección VIII, un FS superior a 2.0 garantiza un margen de confiabilidad amplio, indicando que el tanque podría tolerar incrementos incidentales de presión (sobrepresión de hasta 27.6 bar) sin experimentar fluencia plástica ni fallas estructurales [3]. Asimismo, el cilindro secundario diseñado para la estación de almacenamiento reportó un factor de seguridad excepcional de 7.41 [4], un sobredimensionamiento calculado intencionalmente para contrarrestar los abusos mecánicos y el trato rudo típico del transporte de cilindros por vía terrestre y fluvial en el entorno amazónico [5].

TABLA I. MATRIZ QFD

Requisito del Cliente (Qué)	Importancia	Especificación Técnica (Cómo)	Valor Meta
Pureza del Oxígeno	5/5	Concentración de O ₂	93% ± 3%
Suministro Continuo	5/5	Capacidad de Producción	5 m ³ /h
Seguridad Operativa	5/5	Presión de Trabajo	12 Bar

Costo Competitivo	4/5	Eficiencia Energética	< 1.2 kWh/Nm
Facilidad de Llenado	4/5	Capacidad de Manifold	10 cilindros

C. Dinámica de Fluidos y Control de Transferencia de Masa

El ciclo básico del proceso PSA, conocido como ciclo de Skarstrom, demanda el paso de grandes volúmenes de aire a alta velocidad a través de un lecho densamente empacado de material adsorbente poroso. Comprender cómo fluye el gas a través de este medio poroso es vital para el rendimiento del equipo. La simulación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permitió mapear la distribución de presiones y velocidades dentro de los tanques [5], confirmando que las velocidades de entrada del fluido (43.58 m/s) logran estabilizarse uniformemente al atravesar los difusores superiores antes de penetrar el lecho granulado.

La literatura termodinámica advierte que, si la temperatura de operación de un lecho de zeolita excede los 40 °C, la isoterma de adsorción decrece drásticamente, disminuyendo la afinidad electrostática por el nitrógeno y permitiendo que este pase junto con el oxígeno, lo que contamina el producto final [2]. Las simulaciones CFD del presente diseño verificaron que el caudal, combinado con el diseño geométrico, permite mantener el gradiente de temperatura operativa confinado en una banda segura y altamente estable de entre 18.40 °C y 21.22 °C, protegiendo así la integridad cinética de la separación de gases [3].

D. Diagrama de Flujo Detallado del Sistema PSA

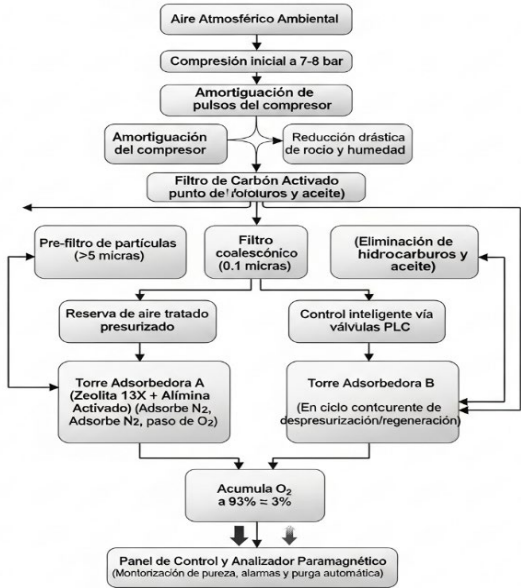


Fig. 2 Diseño de la planta completa

IV. VIABILIDAD, SOSTENIBILIDAD Y TRANSICIÓN ENERGÉTICA

A. Estructura de Costos del Proyecto (CAPEX y OPEX)

El enfoque de manufactura semilocal y diseño abierto propuesto logra comprimir los gastos de capital (CAPEX) requeridos para el montaje inicial [6]. A diferencia de las plantas PSA pre-ensambladas importadas desde el hemisferio norte o Asia, cuyo precio suele incorporar altísimos márgenes comerciales, costos logísticos e impuestos arancelarios, el prototipo en este estudio prioriza el abastecimiento interno [2].

El desglose económico indica que los materiales primarios (incluyendo las láminas de acero estructural ASTM A36, gases de soldadura TIG/MIG y consumibles) ascienden a \$3,412.71 USD [7]. La integración de mano de obra local calificada (soldadores, ingenieros, ayudantes) suma \$820.00 USD, lo que sitúa el costo total de manufactura del prototipo de los recipientes en unos notables \$4,232.71 USD (excluyendo compresores de terceros y electrónica especializada).

En cuanto a los gastos operativos recurrentes (OPEX), la planta proyecta un costo de servicios básicos en torno a \$2,163.75 USD mensuales, siendo el rubro eléctrico el componente dominante de la factura. Con una producción nominal estabilizada de $5 \text{ m}^3/\text{h}$, la planta es capaz de generar 3,600 metros cúbicos de oxígeno puro al mes si operase en un régimen de 24 horas continuas [8]. Al prorratear el OPEX sobre el volumen generado, el costo de producción unitario in situ se derrumba a aproximadamente \$0.18 USD por metro cúbico.

Este valor representa un ahorro cuando se contrasta con la realidad del mercado externo en la región amazónica. Históricamente, la compra de cilindros foráneos (de 6 m^3) ha supuesto costos para Lago Agrio que oscilan entre los \$20 y \$30 USD por unidad, es decir, entre \$3.33 y \$5.00 USD por cada metro cúbico [1]. La implementación de la planta local se traduce en un ahorro de costos operativos directos que supera el 90%. Este diferencial extraordinario asegura un rápido retorno de la inversión (ROI) para los inversores o el sector público [9].

B. Sostenibilidad, Eficiencia y Alimentación Renovable

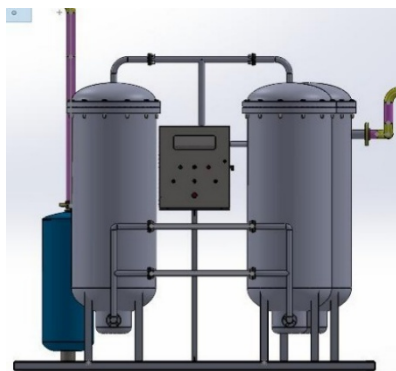


Fig. 3 Tanque principal (de mezcla y acumulador)

Además del beneficio económico, el abandono del paradigma centralizado conlleva un dividendo ambiental sustancial, alineándose con las normativas globales de des carbonización de los sistemas sanitarios [10]. El ciclo logístico tradicional implica el movimiento constante de toneladas métricas de acero a través de camiones alimentados por combustibles fósiles, una huella de carbono que el sistema on-site erradica por completo [2].

Para incrementar esta sostenibilidad y asegurar la autonomía durante cortes de red, se analizó la viabilidad de alimentar la planta mediante energía solar fotovoltaica. Un desglose energético revela dos escenarios distintos:

Alimentación Solar del Sistema de Control (Viabilidad Alta): El cerebro de la planta, compuesto por el PLC, la pantalla HMI, los sensores paramagnéticos de pureza y las electroválvulas neumáticas, exige una potencia eléctrica continua muy moderada, estimada en unos 0.5 kW (500 W). Operando 24 horas, esto equivale a una demanda de 12 kWh/día. Dado que la radiación solar promedio en la provincia de Sucumbíos es de aproximadamente $4.35 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$, se requeriría una potencia fotovoltaica instalada de apenas unos 3.5 kWp. Para dotar al sistema de control de una autonomía de 48 horas sin insolación directa, bastaría con un banco de baterías con capacidad útil de 24 kWh (por ejemplo, baterías de litio a 48 V de unos 500 Ah). Esta implementación es factible, poco costosa y crítica, pues previene la desconfiguración del PLC o el fallo de las alarmas ante fluctuaciones de la red.

Alimentación Solar de la Planta Completa (Viabilidad Limitada): Alimentar toda la carga mecánica es un desafío de otra magnitud. Una planta PSA de $5 \text{ m}^3/\text{h}$ incluye compresores de aire industriales pesados y secadores frigoríficos que elevan el consumo base continuo a más de 10 kW. En régimen 24/7, la planta demandaría unos 240 kWh/día. Para satisfacer esta carga en la región amazónica con energía solar, se requeriría un campo fotovoltaico de al menos 75 kWp (aproximadamente 375 m^2 de espacio físico continuo) y un banco de baterías de respaldo de entre 480 y 600 kWh de capacidad. Si bien el escalamiento a energía 100% renovable es técnicamente posible, en la etapa inicial supondría un incremento del CAPEX que amenazaría la viabilidad económica del proyecto para los presupuestos de salud de los gobiernos locales. Por ello, la estrategia híbrida es la más prudente.

C. Secador de Succión y Tanques de Compensación

La humedad es el principal enemigo de la zeolita, ya que el agua se adsorbe de forma irreversible y bloquea los poros del tamiz molecular [11]. El diseño incluye un secador de succión de calor con dos torres gemelas para operación alterna.

Integridad Mecánica: El secador mostró un desplazamiento máximo de 0.2 mm y un FS de 1.57, garantizando una operación estable bajo 12 bar.

Temperatura del Gas: En el secador, la temperatura máxima alcanza los 50.13°C durante la fase de regeneración térmica,

enfriándose rápidamente antes de la salida para proteger el lecho de adsorción.

Tanques de Compensación: Diseñados para mitigar las pulsaciones del compresor, estos tanques presentaron un FS de 3.51, lo que los convierte en los componentes más robustos del sistema, capaces de soportar presiones de hasta 42.12 bar.

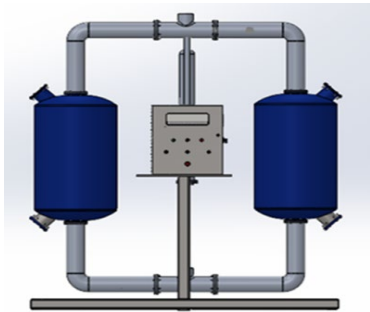


Fig. 4 Compresor de aspiración

D. Estación de llenado

El sistema se completa con una estación de llenado capaz de procesar hasta 10 tanques simultáneamente [12].

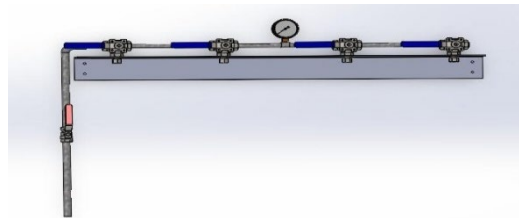


Fig. 5 Tuberías de conexión de cilindros

Cilindro de Gas: El cilindro diseñado para almacenamiento tiene un factor de seguridad de 7.41. Este valor extraordinariamente alto es deliberado, dado que los cilindros están sujetos a manipulación ruda, transporte frecuente y golpes mecánicos durante su distribución en la selva [14].

Seguridad en Válvulas: El cuerpo de válvulas de llenado utiliza tuberías de 1/2" y válvulas de 3 vías con 2 posiciones, permitiendo un venteo seguro de las mangueras antes de la desconexión [13].

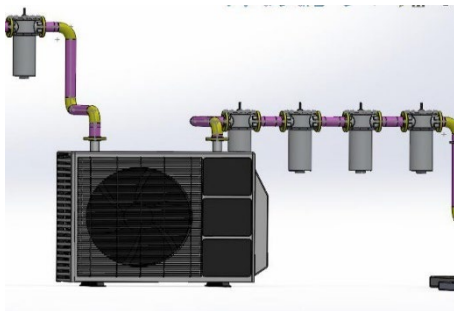


Fig. 6 Compresor de almacenamiento

V. LIMITACIONES DEL ESTUDIO Y DESAFÍOS FUNDAMENTALES DE IMPLEMENTACIÓN

Todo diseño mecatrónico teórico, independientemente de su sofisticación en entornos CAD, se enfrenta al choque empírico cuando se expone a las rigurosas condiciones del mundo real [15].

A. El Desafío Crítico de la Humedad Tropical y el Envenenamiento de la Zeolita

La limitación técnica más formidable y urgente para el éxito de una planta PSA operando en la provincia de Sucumbíos no radica en la integridad de las soldaduras, sino en la alta reactividad química de la resina sintética de separación [17].

En Lago Agrio, el clima de bosque tropical húmedo dicta condiciones atmosféricas con temperaturas que rondan los 32 °C y una humedad relativa superior al 80% e incluso 90%. Bajo estos parámetros termodinámicos, la humedad absoluta del aire ambiente amazónico ingresando al sistema alcanza picos masivos de aproximadamente 30 g/m³ [18]. En la fase de adsorción, la Zeolita 13X es intrínseca y agresivamente hidrofílica; su afinidad por el agua es muchísimo más fuerte que su afinidad por el nitrógeno [19].

El contraste técnico es drástico: para alcanzar el grado médico, las farmacopeas y la norma ISO 10083 exigen que el oxígeno final tenga concentraciones de vapor de agua no mayores a 67 ppm, lo que equivale a un punto de rocío de diseño de -73 °C [20]. A ese punto de rocío, la humedad absoluta permitida en el lecho molecular no debe superar los 0.002 g/m³. Esto implica que el sistema de pretratamiento de la planta está obligado a retirar el 99.99% de la masa de agua atmosférica de manera ininterrumpida [22].

La viabilidad de que un sistema convencional logre esta remoción es muy baja si se depende exclusivamente de secadores frigoríficos. Un secador refrigerativo estándar solo logra condensar la humedad hasta un punto de rocío de unos +3 °C (dejando alrededor de 6 g/m³ de vapor latente), una cantidad más que suficiente para envenenar la zeolita irreversiblemente en pocas semanas [25].

Por lo tanto, el diseño debe integrar obligatoriamente—como principal elemento del tren de filtrado—un secador de adsorción de purga o "torres gemelas de desecante" (Zero-Gas-consumption Absorption Dryer) cargado con alúmina activada [30]. Aunque esta arquitectura es plenamente viable para remover la humedad restante y proteger el lecho principal de zeolita, en la Amazonía la frecuencia de regeneración y la saturación del material alúmina será de tres a cuatro veces superior a la de un clima templado, requiriendo rutinas de mantenimiento más agresivas de las inicialmente estipuladas [32].

TABLA II.
MATERIALES Y COSTOS

Categoría de Costo	Ítem	Costo (USD)
--------------------	------	-------------

Materiales	Acero ASTM A36, Consumibles, Gases (Argón/CO2)	\$3,412.71
Mano de Obra	Soldador, Ingeniero Metalográfico, Ayudantes	\$820.00
Equipamiento	Compresor TIG, Espectrómetro, Microscopio	(Activos fijos)
Total Inversión	Fase de Prototipo	\$4,232.71

A nivel operativo (OPEX), la planta requiere un presupuesto mensual de servicios básicos que se amortiza rápidamente frente al ahorro en transporte.

TABLA III
GASTOS EN SERVICIOS BÁSICOS

Servicio Mensual	Valor (USD)	Anual (USD)
Eléctrico	\$754.55	\$9,054.60
Seguridad	\$600.00	\$7,200.00
Control de Plagas	\$300.00	\$3,600.00
Otros (Agua, Internet, etc)	\$509.20	\$6,110.40
Total Operativo	\$2,163.75	\$25,965.00

Considerando que el costo por metro cúbico generado *in situ* es de aproximadamente \$0.18 USD, producir $5 \text{ m}^3/\text{h}$ ($3,600 \text{ m}^3$ mensuales en operación de 24h) costaría \$648 USD en insumos energéticos directos. Comparado con la compra externa de cilindros, que en Lago Agrio puede alcanzar los \$20 - \$30 por cilindro de 6 m^3 (\$3.33 - \$5.00 por m^3), el ahorro operativo supera el 90% [5].

B. Variabilidad Atmosférica y Calibración del Sistema Termodinámico

El aprovechamiento termodinámico de una media empírica de 22% de oxígeno requiere, no obstante, calibraciones flexibles. La limitación subyace en que si las lógicas de automatización de las válvulas neumáticas, los tiempos del ciclo de igualación de presión, y las tasas de flujo del compresor se programan rígidamente basándose en la premisa de una entrada excepcionalmente enriquecida, el sistema podría rendir por debajo de sus especificaciones de diseño cuando la atmósfera recupere su estado global de mezcla bien proporcionada del 20.95%. Para mitigar esta variabilidad, la instrumentación de la planta requiere implementar lógicas de control adaptativas que ajusten en tiempo real la duración de los ciclos Skarstrom basándose en lecturas fluctuantes de concentración y presión de alimentación.

B. Brechas Operativas y de Ecosistema Técnico

Finalmente, el diseño documenta impecablemente los aspectos electromecánicos, pero el ecosistema operativo que rodea a la máquina es a menudo su punto más débil. Evaluaciones de campo del Banco Mundial, USAID y The Global Fund indican que las instalaciones de plantas PSA en hospitales rurales fallan comúnmente no por errores de diseño original, sino por deficiencias de mantenimiento.

La ausencia crónica de Técnicos de Equipo Biomédico (BMETs) calificados en zonas alejadas de los centros metropolitanos implica que problemas menores y rutinarios—tales como la obstrucción parcial de los filtros de entrada HEPA por partículas, la coalescencia de aceite proveniente del compresor primario, o la fatiga de los relés en las válvulas de solenoide terminen desencadenando paradas de emergencia prolongadas debido a la falta de personal capaz de diagnosticar y ejecutar mantenimientos preventivos y correctivos o calibrar los sensores analizadores paramagnéticos.

VI. LÍNEAS FUTURAS, ESCALAMIENTO Y ESTRATEGIAS DE IMPLEMENTACIÓN REAL

La superación de las limitaciones mencionadas requiere concebir el proyecto no como un prototipo estático, sino como un elemento fundacional dentro de una red sanitaria dinámica. Las siguientes líneas estratégicas futuras son fundamentales para asegurar que el escalamiento, desde el esquema conceptual hasta la implementación clínica en Ecuador, sea exitoso, duradero y resiliente.

A. Escalamiento Arquitectónico: Del Modelo Aislado a la Red Hub-and-Spoke.

La primera línea futura para escalar la solución estriba en abandonar la idea de construir únicamente una planta centralizada gigante para sustituir al antiguo proveedor [36]. La literatura de gestión logística en salud en países en vías de desarrollo (como las exitosas iniciativas de Unitaid en África subsahariana y proyectos de la Fundación Clinton) recomienda decididamente un modelo de red radial conocido como Hub and Spoke (cubo y radios) [46].

En este paradigma, la instalación de la planta PSA de $5 \text{ m}^3/\text{h}$ (escalable posteriormente a un rango de 10 a $50 \text{ m}^3/\text{h}$ instalando módulos en paralelo) se emplaza en un hospital provincial principal, como el Hospital General de Lago Agrio (el "Hub") [47]. Esta instalación alimenta de forma directa, continua e inmediata las Unidades de Cuidados Intensivos, Quirófanos y áreas de neonatología a través de un sistema de tuberías empotradas en la pared de cobre medicinal (Sistema de Gasoductos Médicos o MGPS). Simultáneamente, el robusto compresor de refuerzo (booster) de alta presión y el manifold múltiple de llenado de 10 vías ya previstos en el diseño permiten envasar continuamente cilindros portátiles [48-49].

B. Estrategias de Deshumidificación y Regeneración

Considerando la ya mencionada sensibilidad extrema de la Zeolita 13X al envenenamiento por agua, una línea de innovación de alta prioridad implica la integración de arquitecturas de lechos estratificados (layered beds) [40]. En lugar de un tanque homogéneamente llenado con zeolita, la entrada del flujo ascendente se encontraría con una capa protectora robusta de desecante pesado, típicamente alúmina activada, la cual posee una altísima capacidad para atrapar moléculas de humedad y dióxido de carbono sin sufrir una degradación estructural significativa [49]. Esta primera capa actuaría como un "escudo sacrificial" frente a los embates de humedad extrema, asegurando que el aire que alcance la zona superior de Zeolita 13X se encuentre en un estado hiper-seco, prolongando por años la vida útil del adsorbente principal. La literatura científica reciente ha explorado la desorción de los lechos contaminados empleando tecnologías térmicas asistidas por microondas [50].

A diferencia de los métodos de horneado convectivo tradicional, los campos de microondas logran excitar selectiva y profundamente los cationes polares móviles (como el Sodio) confinados dentro de la estructura cristalina de la zeolita [51-53]. Investigaciones demuestran que la irradiación con microondas puede lograr eficacias de regeneración y limpieza de moléculas atrapadas del 95% en apenas una fracción del tiempo (diez minutos en lugar de horas) y reduciendo el consumo energético en hasta un 90%. Incorporar módulos de regeneración local asistidos por microondas para revivir zeolita saturada directamente en Sucumbíos constituiría un hito de innovación tecnológica regional sin precedentes [56].

C. Integración del Internet de las Cosas Médico (IoMT) y Mantenimiento Predictivo

El montaje de una red económica de microcontroladores de código abierto acoplados con módulos de transmisión inalámbrica de largo alcance y baja potencia permitirá el envío de mediciones ininterrumpidas incluso en zonas con cobertura celular deficiente [63]. Mediante el desarrollo de cuadros de mando (dashboards) centralizados, los parámetros vitales en tiempo real de la planta amazónica incluyendo el nivel de vibración del compresor, las variaciones térmicas en las torres de adsorción, el estado de permeabilidad de los filtros, el punto de rocío y, vitalmente, el monitoreo continuo de la pureza paramagnética del oxígeno podrían ser analizados desde el Ministerio de Salud Pública en Quito o por centros de ingeniería universitarios en cualquier parte del país. Esta supervisión digital permite la transición de un modelo de mantenimiento reactivo y catastrófico hacia uno verdaderamente predictivo.

D. Viabilidad Regulatoria y Políticas Públicas

El paso final hacia la implementación clínica requiere transitar el laberinto normativo legal ecuatoriano. Es crítico comprender que el aire modificado no se considera

simplemente un gas industrial; es un producto terapéutico regido por estándares farmacológicos. Antes de poder infundir el primer litro de oxígeno a un paciente en la Amazonía, el consorcio productor debe superar un riguroso marco de auditoría.

Se deberá someter la operación a la Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria (ARCSA) para obtener el registro sanitario y, lo que es aún más exigente, la Certificación de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) para Gases Medicinales, normativa que ha sido exhaustivamente actualizada y endurecida mediante resoluciones recientes [60]. Este proceso exige la presentación de Planos Georeferenciados, Manuales de Procedimientos Operativos Estandarizados (SOPs), cualificación formal de los compresores y tanques, validación del proceso de separación química, certificación de calibración continua de los oxímetros y analizadores, y establecimiento de sistemas formales de farmacovigilancia para el rastreo e identificación única de los cilindros despachados.

Más allá de la burocracia, la línea futura principal consiste en integrar formalmente estas iniciativas de descentralización tecnológica impulsadas desde la ingeniería y la academia en los presupuestos públicos anuales y en las políticas de planificación de infraestructura del Plan Decenal de Salud del Ecuador, asegurando fondos específicos para mantenimiento de redes de gases médicos.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La configuración, simulación estructural termodinámica y análisis económico presentados para la implementación de una planta generadora de oxígeno medicinal con tecnología PSA de 5 m³/h en el cantón Lago Agrio, provincia de Sucumbíos, validan técnica y financieramente un giro paradigmático de inmenso valor para el sistema de salud ecuatoriano.

La aportación trascendental de esta investigación va mucho más allá del empaquetado de componentes estándar; radica en la amalgama de innovación tecnológica y empoderamiento socio-territorial. A diferencia de los acercamientos habituales de las agencias de desarrollo y estados que buscan importar módulos cerrados que invariablemente fallan por incompatibilidad con el violento clima tropical húmedo y la nula capacidad de reparación local, este estudio propone una territorialización calculada, parametrizada y manufacturable.

En conjunto, este trabajo constituye una propuesta sólidamente estructurada, altamente escalable y profundamente pertinente, aportando enorme valor tanto técnico como social a la esfera de la ingeniería médica. Al desplazar el núcleo de producción, rompiendo los monopolios y las extenuantes cadenas logísticas a través de los Andes, la ingeniería abandona su rol meramente funcional para transformarse en un motor propulsor de la equidad en salud. El presente modelo no solo asegura el suministro continuo del medicamento más crítico para la preservación de la vida, sino que representa una contribución material contundente hacia la cristalización del

anhelado objetivo de la soberanía sanitaria en el Ecuador y América Latina.

Se recomienda iniciar los trámites de certificación ISO-13485 para la planta y obtener el registro sanitario ante la ARCSA antes de la fase de distribución masiva. Además, es necesario implementar un sistema de respaldo solar para los sistemas de control y monitoreo continuo de pureza, garantizando que la planta no se detenga durante cortes del suministro eléctrico de la red nacional.

REFERENCIAS

- [1] Access to Medicine Foundation, “Las empresas de gas tomaron medidas durante la COVID-19. Ahora deben ampliar el acceso al oxígeno médico a largo plazo,” 18-abr-2023. [En línea]. Disponible en: <https://accesstomedicinefoundation.org/news/building-on-their-efforts-during-covid-19-gas-companies-must-now-step-up-on-access-to-medical-oxygen-in-the-long-term>
- [2] A. P. Oliveira, “El oxígeno, clave en la pandemia de coronavirus,” DW, 26-abr-2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.dw.com/es/el-ox%C3%ADgeno-clave-en-la-pandemia-de-coronavirus/a-57343767>
- [3] Y. Vasconcelos, “El oxígeno bajo control,” Revista Pesquisa FAPESP, São Paulo, octubre de 2021. Consultado: el 11 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://revistapesquisa.fapesp.br/es/el-oxigeno-bajo-control/>
- [4] M. A. Loewy, “Oxígeno medicinal en Latinoamérica: entre el desafío sin precedentes y la catástrofe,” Medscape Noticias Médicas. Consultado: el 11 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://espanol.medscape.com/verarticulo/5907092?form=fpf>
- [5] Superintendencia de Control del Poder de Mercado, “Informe sectorial del oxígeno medicinal,” nov. 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.scpm.gob.ec/sitio/wp-content/uploads/2019/03/OXIGENO-MEDICINAL.pdf>
- [6] P. Bhardwaj et al., “Effectiveness of pressure swing adsorption oxygen plants: A scoping review in Indian context,” J. Family Med. Prim. Care, vol. 14, núm. 8, pp. 3179–3185, ago. 2025, doi: 10.4103/jfmpc.jfmpc_1907_24.
- [7] N. Moreno González, “Gobierno adopta el CONPES 4170 sobre producción farmacéutica nacional: \$1,37 billones para fortalecer la soberanía sanitaria,” Consultorsalud. Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://consultorsalud.com/gobierno-conpes-4170-produccion-farmaceutica/>
- [8] P. N. Topno, “Challenges in Medical Oxygen Supply Chain during COVID-19 Pandemic,” Jharkhand Journal of Development and Management Studies, vol. 19, núm. 2, pp. 8801–8814, jun. 2021, Consultado: el 11 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/353480691_Challenges_in_Medical_Oxygen_Supply_Chain_during_Covid-19_Pandemic
- [9] M. B. y G. A. Herrero, “Investigación soberana para el buen gobierno en salud. Desafíos y oportunidades,” Revista “Debate Público. Reflexión de Trabajo Social”, vol. 28, oct. 2024, Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://trabajosocial.sociales.uba.ar/wp-content/uploads/sites/13/2024/12/19_Herrero.pdf
- [10] R. Kaur Gill, P. Saxena, A. Mudgil, A. Kavita Khemchand, y R. Saxena, “Oxygen generation and delivery: Start to end,” Indian Journal of Clinical Anaesthesia, vol. 11, núm. 2, pp. 203–211, jun. 2024, doi: 10.18231/j.ijca.2024.039.
- [11] A. y G. M. Krstevska, Static Structural Analysis of a Pressure Vessel with Ansys Mechanical Software. 2026. Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ansys.com/academic/educators/education-resources/static-structural-analysis-using-fea-of-pressure-vessel-with-ansys-mechanical>
- [12] M. Fonseca, “Soberanía sanitaria para un pleno acceso a la salud,” Ciencia, tecnología y política, vol. 5, núm. 9, p. 087, dic. 2022, doi: 10.24125/26183188e087.
- [13] M. A. Acar, C. Gönenli, y M. B. Selek, “Finite Element Analysis of the Pressure Vessels with Various Materials and Thicknesses,” International Journal of Scientific Research and Management (IJSRM), vol. 12, núm. 09, pp. 1452–1459, sep. 2024, doi: 10.18535/ijrm/v12i09.ec05.
- [14] I. y T. de C. Ministerio de Ciencia, “POLÍTICAS DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN ORIENTADAS POR MISIONES (PIOM) MISIÓN SOBERANÍA SANITARIA Y BIENESTAR SOCIAL”, Bogotá, sep. 2024. Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://minciencias.gov.co/sites/default/files/2404_documento_de_politic_a_soberania_sanitaria_1.pdf
- [15] Departamento Nacional de Planeación (DNP) – República de Colombia, “DECLARACIÓN DE IMPORTANCIA ESTRATÉGICA DEL PROYECTO DE INVERSIÓN FORTALECIMIENTO DE LA PRODUCCIÓN NACIONAL DE PRODUCTOS FARMACÉUTICOS QUE GARANTICEN LA SOBERANÍA SANITARIA”, Bogotá, oct. 2025. Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4170.pdf>
- [16] M. C. Sanmartin y G. Bortz, “Promesas periféricas: expectativas, coaliciones y vacunas covid-19 en Argentina”, Hist. Cienc. Saude. Manginhos., vol. 32, 2025, doi: 10.1590/s0104-59702025000100008.
- [17] Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social de Paraguay, “‘Pulmón’ de Salud Pública se oxigena con la primera planta productora propia”, Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social – Paraguay. Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.mspbs.gov.py/portal/15428/pulmon-de-salud-publica-se-oxigena-con-la-primera-planta-productora-propia.html>
- [18] AmCareMed, “11 PSA Oxygen Generators: The Science and Benefits Behind This Critical Technology”, AmCareMed. Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://amcaremed.com/understanding-psa-oxygen-generators-amcaremed/>
- [19] J. T. Hancock, “Una breve historia del oxígeno,” Oxygen, vol. 2, no. 1, Mar. 2022. [Online]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2673-9801/2/1/4>
- [20] W. C. Gagne-Maynard et al., “Evaluation of Primary Production in the Lower Amazon River Based on a Dissolved Oxygen Stable Isotopic Mass Balance”, Front. Mar. Sci., vol. 4, feb. 2017, doi: 10.3389/fmars.2017.00026.
- [21] Y. A. Cengel, Transferencia de calor y masa, 4th ed. México: McGraw-Hill, 2010.
- [22] Y. Malhi, “Does the amazon provide 20% of our oxygen?”, Yadvinder Malhi – Research & Writing. Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://www.yadvindermalhi.org/blog/does-the-amazon-provide-20-of-our-oxygen>
- [23] A. Streb y M. Mazzotti, “Adsorption for efficient low carbon hydrogen production: part 1—adsorption equilibrium and breakthrough studies for H₂/CO₂/CH₄ on zeolite 13X”, Adsorption, vol. 27, núm. 4, pp. 541–558, may 2021, doi: 10.1007/s10450-021-00306-y.
- [24] M. Bin Ajmal, M. Usama, Z. Bangash, H. Aziz, O. Bin Nadeem, y A. Bin Masud, “Experimental Evaluation of a Portable Oxygen Concentrator Based on Pressure Swing Adsorption”, en MTME 2025, Basel Switzerland: MDPI, sep. 2025, p. 25. doi: 10.3390/materproc2025023025.
- [25] Y. Liao, A. Wright, y J. Li, “Simulation and optimisation of vacuum (pressure) swing adsorption with simultaneous consideration of real vacuum pump data and bed fluidisation”, Sep. Purif. Technol., vol. 358, p. 130354, jun. 2025, doi: 10.1016/j.seppur.2024.130354.
- [26] M. L. Lau, N. Linton, J. Urban-Klaehn, D. P. Guillen, y M. Long, “Evaluation of adsorption and mechanical strength of 13X zeolite mixtures with phyllosilicate binders using molecular dynamics simulation and positron annihilation spectroscopy”, Chem. Eng. Sci., vol. 276, p. 118744, jul. 2023, doi: 10.1016/j.ces.2023.118744.
- [27] J. C. Santos, A. F. Portugal, F. D. Magalhães, y A. Mendes, “Optimization of Medical PSA Units for Oxygen Production”, Ind. Eng. Chem. Res., vol. 45, núm. 3, pp. 1085–1096, feb. 2006, doi: 10.1021/ie0504809.
- [28] M. L. Carty y S. Bilodeau, “Benchmarking Thermodynamic Models for Optimization of PSA Oxygen Generators”, J Multidisciplinary Scientific Journal, vol. 6, núm. 2, pp. 318–341, jun. 2023, doi: 10.3390/j6020023.
- [29] C. A. Beltrán Sempértegui y D. B. Pulla Iñiguez, “Diseño de una planta criogénica separadora de aire en la ciudad de Cuenca-Ecuador,” Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2021.

- [Online]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21377>
- [30] D. O. Di Lorenzo Zambrano and L. A. Vera García, "Diseño de una planta de separación de aire para la producción de oxígeno de grado medicinal," Tesis de grado, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador, 2021.
- [31] J. Y. Rumbo Morales et al., "Review of the Pressure Swing Adsorption Process for the Production of Biofuels and Medical Oxygen: Separation and Purification Technology", *Adsorption Science & Technology*, vol. 2022, ene. 2022, doi: 10.1155/2022/3030519.
- [32] Scott Knackstedt; Alex Rothkopf; Stassney Obregon; Alec Wollen; Jason Houdek; Martha Gartley; Tayo Olaleye, "Oxygen Generation and Storage: Pressure/Vacuum Swing Adsorption Plant", jul. 2021. Consultado: el 11 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://media.path.org/documents/O2_generation_and_storage_PSA_VS_A_v1.pdf
- [33] C. y V. S. (ARCSA) Agencia Nacional de Regulación, "Resolución ARCSA-DE-2023-033-AKRG Reforma a la normativa técnica sanitaria para el registro sanitario de dispositivos médicos de uso humano", Quito, 2023. Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.controlsanitario.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/11/Resolucion_ARCSA-DE-2023-033-AKRG_reforma-a-la-Normativa-Tecnica-Sanitaria-para-el-registro-sanitario-de-Dispositivos-medicos-de-uso-humano-y-de-los-establecimientos-en-donde-se-fabrican.pdf
- [34] S. Carpio, "ec.nte.2049.1995 tanques de oxígeno (revisión)," 2020. [Online]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/312054532/ec-nte-2049-1995-tanques-de-oxigeno-revision>
- [35] National Fire Protection Association (NFPA), "TIA 99-18-2," 2018. [Online]. Disponible en: https://www.nfpa.org/assets/files/AboutTheCodes/99/TIA_99_18_2.pdf
- [36] C. Bernal, Metodología de la investigación para administración, economía, humanidades y ciencias sociales. México: Pearson Educación, 2006.
- [37] P. L. López, "Población, muestra y muestreo," *Revista Científica de Investigación*, vol. 9, no. 8, 2018. [Online]. Disponible en: <http://www.scielo.org.bo/pdf/rpc/v09n08/v09n08a12.pdf>
- [38] D. Rimantho, V. A. Pratomo, E. A. Pane, y N. Noywuli, "Quality Function Deployment Method for Cooking Stove Design Using Hermetia Illucens Oil", *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, vol. 12, núm. 1, pp. 103–114, ene. 2025, doi: 10.18280/mmep.120112.
- [39] I. Gophane, N. Dharashivkar, P. Mulik, y P. Patil, "Theoretical and Finite Element Analysis of Pressure Vessel", *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 17, núm. 12, pp. 1148–1158, mar. 2024, doi: 10.17485/IJST/v17i12.3272.
- [40] SkyFavor Medical, "PSA Oxygen Generator for Hospitals". Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/749597057/Medical-Gas-Pipeline-Solution-SkyFavor-Medical>
- [41] R. J. W. Brienen, G. Helle, T. L. Pons, J.-L. Guyot, y M. Gloor, "Oxygen isotopes in tree rings are a good proxy for Amazon precipitation and El Niño-Southern Oscillation variability", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 109, núm. 42, pp. 16957–16962, oct. 2012, doi: 10.1073/pnas.1205977109.
- [42] D. Jiang y F. Huang, "Influence Factors of Pressure Swing Adsorption for Oxygen Production by the Orthogonal Method and the Response Surface Method", *Processes*, vol. 12, núm. 7, p. 1306, jun. 2024, doi: 10.3390/pr12071306.
- [43] PVEng, "Finite Element Analysis in Action", PVEng. Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.pveng.com/home/fea-stress-analysis/finite-element-analysis-in-action-post/>
- [44] The Global Fund, "Briefing Note: PSA Plant Oxygen Purity", abr. 2024. Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://resources.theglobalfund.org/media/lenpqaoa/cr_c19rm-psa-oxygen-purity_technical-briefing-note_en.pdf
- [45] F. Castro Contreras, "Diseño e implementación de una planta de oxígeno medicinal tipo PSA para la empresa PGO S.A.C. en el distrito de Villa El Salvador ciudad de Lima," Tesis de grado, Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú, 2021.
- [46] V. Smith et al., "A Comprehensive Approach to Medical Oxygen Ecosystem Building: An Implementation Case Study in Kenya, Rwanda, and Ethiopia.", *Glob. Health Sci. Pract.*, vol. 10, núm. 6, dic. 2022, doi: 10.9745/GHSP-D-21-00781.
- [47] S. Denning, "No, the Amazon fires won't deplete the Earth's oxygen supply. Here's why.", *PBS NewsHour*, el 26 de agosto de 2019. Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.pbs.org/newshour/science/no-the-amazon-fires-wont-deplete-the-earths-oxygen-supply-heres-why>
- [48] Z. Kamin, M. H. V. Bahrin, y A. Bono, "A short review on pressure swing adsorption (PSA) technology for nitrogen generation from air", *AIP Conference Proceedings*, ago. 2022, p. 050006, doi: 10.1063/5.0099702
- [49] A. Porta, E. Sanchez, y E. Colman Lerner, Calidad del aire: monitoreo y modelado de contaminantes atmosféricos: efectos en la salud pública, 1a ed., vol. 1. Buenos Aires, Argentina: EDULP, 2018. Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/73756/Documento_comp_letto.pdf?sequence=1
- [50] N. D. la R. A. M. D. M. J. A. Jiménez, "Calidad del aire de la ciudad de Guayaquil", *Guayaquil*. Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CLG12-40.pdf>
- [51] J. Xu, n Xu, y S. Q. Xie, "A comprehensive review on recent developments in quality function deployment", *International Journal of Productivity and Quality Management*, vol. 6, núm. 4, p. 457, 2010, doi: 10.1504/IJPMQ.2010.035893.
- [52] S. Shrivastava, A. Verma, J. Ramkumar, y R. Aryal, "A comprehensive study for improving the working parameters for the design of a PSA-based oxygen concentrator", *Engineering Research Express*, vol. 6, núm. 1, p. 015025, mar. 2024, doi: 10.1088/2631-8695/ad1215.
- [53] R. Reda, S. Ataya, y A. Ashraf, "Finite Element Modeling of Different Types of Hydrogen Pressure Vessels Under Extreme Conditions for Space Applications", *Processes*, vol. 13, núm. 5, p. 1429, may 2025, doi: 10.3390/pr13051429.
- [54] B. H. Al-Sabbagh y A. F. Al-Alawy, "Performance evaluation of a small-scale laboratory pressure swing adsorption-based oxygen concentrator", *Chemical Papers*, oct. 2025, doi: 10.1007/s11696-025-04425-6.
- [55] A. Mathur, "A Review of Portable Oxygen Concentrator", *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 10, núm. 5, pp. 5122–5125, may 2022, doi: 10.22214/ijraset.2022.43615.
- [56] M. N. Echegoyenberry, "El derecho a la salud en Latinoamérica desde la perspectiva de actores sociales", *Costa Rica*, 2025. Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://dirajus.org/media/pages/publicaciones/tomo-1-lineamientos-para-una-comprension-regional-del-derecho-a-la-salud/16ced37b8d-1768461486/tomo-2-el-derecho-a-la-salud-en-latinoamerica-desde-la-perspectiva-de-actores-sociales-compressed.pdf>
- [57] A. Kosmaras, D. Tzetzis, y P. Kyratsis, "Finite element analysis and experimental validation of a novel oxygen pressure regulator", *ACADEMIC JOURNAL OF MANUFACTURING ENGINEERING*, vol. 15, núm. 4, pp. 67–74, ene. 2017, Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/322734551_Finite_element_analysis_and_experimental_validation_of_a_novel_oxygen_pressure_regulator
- [58] Rashmi S. Gaikwad, Mohammed Abdul Junaid, V. Sai Krishna, y T. Keerthi Kumar, "Weight Optimization and Finite Element Analysis of Pressure Vessel Due to Thickness", *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology IJSRSET*, vol. 3, núm. 2, 2017, Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://ijsrset.com/paper/2425.pdf>
- [59] Rafiq Rustam, Ahmad Faiz Ahmad Nazri, Md Rizal Md Tasliman, y Jamaluddin Mahmud, "Finite Element Simulation and Analysis for the Design of a Pressure Vessel with Expansion Joint", *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, vol. 6, núm. 4, ago. 2018, Consultado: el 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ijmmm.org/vol6/389-MS013.pdf>
- [60] M. Ramos-Martinez et al., "Control for Bioethanol Production in a Pressure Swing Adsorption Process Using an Artificial Neural Network", *Mathematics*, vol. 11, núm. 18, p. 3967, sep. 2023, doi: 10.3390/math11183967.