

**INTEGRACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA Y ELECTROLIZADOR PEM  
PARA LA PRODUCCIÓN AUTÓNOMA DE OXÍGENO MÉDICO, CASO DE ESTUDIO  
HOSPITAL TEODORO MALDONADO CARBO 2019-2022**  
**INTEGRATION OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY AND PEM ELECTROLYZER  
FOR THE AUTONOMOUS PRODUCTION OF MEDICAL OXYGEN, CASE STUDY  
TEODORO MALDONADO CARBO HOSPITAL 2019-2022**

**Autores: 'Tyrone Fernando Alcivar Reyna.**

**<sup>1</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1841-2161>**

Afiliación: <sup>1</sup>\*Universidad de Guayaquil, (Ecuador).

Artículo recibido: 11 de Enero del 2026

Artículo revisado: 13 de Enero del 2026

Artículo aprobado: 22 de Enero del 2026

<sup>1</sup>Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química, (Ecuador). Escuela Superior Politécnica del Litoral Facultad, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, (Ecuador).

### **Resumen**

El oxígeno y el hidrógeno son elementos esenciales en el ámbito médico, especialmente en tratamientos respiratorios de unidades de cuidados intensivos. La pandemia de COVID-19 en 2020 puso de manifiesto la creciente demanda de oxígeno medicinal y las limitaciones de los hospitales que dependen exclusivamente de proveedores externos. Este trabajo propone la simulación y optimización de un sistema híbrido basado en paneles solares fotovoltaicos (PV) acoplados a un electrolizador de membrana de intercambio protónico (PEM), aplicado al Hospital Teodoro Maldonado Carbo de Guayaquil, considerando registros de consumo de oxígeno desde 2019 hasta 2022. La metodología abarca el desarrollo de un modelo matemático que integra datos reales de irradiancia solar, temperatura ambiental y perfiles de demanda hospitalaria. Se analizaron variables críticas; intensidad, voltaje, potencia máxima, número de paneles y configuración del electrolizador, mediante un estudio techno-económico. Las simulaciones anuales mostraron que en 2022 el hospital consumió 438,46 t de oxígeno (un promedio de 36,54 t/mes), siendo este el año de mayor demanda. Sobre esta base, la configuración óptima económicamente consiste en un electrolizador de 24 celdas con un área activa de 6 cm<sup>2</sup> cada una, respaldado por 4 778 paneles solares. Bajo esta configuración, el costo de producción de oxígeno asciende a US \$ 0,5212 por kilogramo, incluyendo la generación simultánea de

hidrógeno como subproducto. Los resultados de simulación confirman que este sistema PV-EL optimizado puede cubrir de forma continua y autónoma la demanda de oxígeno del hospital, reduciendo la dependencia de suministros externos y fortaleciendo la resiliencia operativa ante futuras crisis sanitarias. Este estudio demuestra la viabilidad técnica y económica de integrar tecnologías renovables para asegurar el suministro de oxígeno médico, aportando una solución sostenible y adaptable a las necesidades reales de los centros de salud.

**Palabras clave: Energía solar fotovoltaica, Electrolizador PEM, Oxígeno médico, Sistemas híbridos, Energía renovable, Optimización energética, Suministro autónomo.**

### **Abstract**

Oxygen and hydrogen are essential elements in the medical field, especially in respiratory treatments in intensive care units. The COVID-19 pandemic in 2020 highlighted the growing demand for medical oxygen and the limitations of hospitals that depend exclusively on external suppliers. This work proposes the simulation and optimization of a hybrid system based on photovoltaic (PV) solar panels coupled to a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer, applied to the Teodoro Maldonado Carbo Hospital in Guayaquil, considering oxygen consumption records from 2019 to 2022. The methodology includes the development of a mathematical model that integrates real data on solar irradiance, ambient

temperature, and hospital demand profiles. Critical variables; intensity, voltage, maximum power, number of panels, and electrolyzer configuration, were analyzed through a techno-economic study. Annual simulations showed that in 2022 the hospital consumed 438.46 tons of oxygen (an average of 36.54 tons per month), making it the year of highest demand. Based on this, the economically optimal configuration consists of a 24-cell electrolyzer with an active area of 6 cm<sup>2</sup> per cell, backed by 4,778 solar panels. Under this configuration, the cost of oxygen production is US\$0.5212 per kilogram, including the simultaneous generation of hydrogen as a byproduct. The simulation results confirm that this optimized PV-EL system can continuously and autonomously meet the hospital's oxygen demand, reducing dependence on external supplies and strengthening operational resilience to future health crises. This study demonstrates the technical and economic feasibility of integrating renewable technologies to ensure the supply of medical oxygen, providing a sustainable solution adaptable to the real needs of healthcare facilities.

**Keywords: Solar photovoltaic energy, PEM electrolyzer, Medical oxygen, Hybrid systems, Renewable energy, Energy optimization, Autonomous supply.**

### **Sumário**

Oxigênio e hidrogênio são elementos essenciais na área médica, especialmente em tratamentos respiratórios em unidades de terapia intensiva. A pandemia de COVID-19 em 2020 evidenciou a crescente demanda por oxigênio medicinal e as limitações de hospitais que dependem exclusivamente de fornecedores externos. Este trabalho propõe a simulação e otimização de um sistema híbrido baseado em painéis solares fotovoltaicos (PV) acoplados a um eletrolisador de membrana de troca de prótons (PEM), aplicado ao Hospital Teodoro Maldonado Carbo em Guayaquil, considerando os registros de consumo de oxigênio de 2019 a 2022. A metodologia inclui o desenvolvimento de um modelo matemático que integra dados

reais de irradiação solar, temperatura ambiente e perfis de demanda do hospital. Variáveis críticas; intensidade, tensão, potência máxima, número de painéis e configuração do eletrolisador, foram analisadas por meio de um estudo técnico-econômico. As simulações anuais mostraram que em 2022 o hospital consumiu 438,46 toneladas de oxigênio (média de 36,54 toneladas por mês), tornando-se o ano de maior demanda. Com base nisso, a configuração economicamente otimizada consiste em um eletrolisador de 24 células com uma área ativa de 6 cm<sup>2</sup> por célula, alimentado por 4.778 painéis solares. Nessa configuração, o custo de produção de oxigênio é de US\$ 0,5212 por quilograma, incluindo a geração simultânea de hidrogênio como subproduto. Os resultados da simulação confirmam que esse sistema fotovoltaico-eletrolítico otimizado pode atender de forma contínua e autônoma à demanda de oxigênio do hospital, reduzindo a dependência de suprimentos externos e fortalecendo a resiliência operacional a futuras crises de saúde. Este estudo demonstra a viabilidade técnica e econômica da integração de tecnologias renováveis para garantir o fornecimento de oxigênio medicinal, oferecendo uma solução sustentável e adaptável às necessidades reais de instalações de saúde.

**Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, eletrolisador PEM, oxigênio medicinal, sistemas híbridos, energia renovável, otimização energética, fornecimento autônomo.**

### **Introducción**

La pandemia de COVID-19 fue causada por una cepa mutante del coronavirus SARS-CoV-2 y desencadenó una crisis sanitaria a nivel mundial. Su origen se remonta a finales de diciembre de 2019, en la provincia de Hubei, China, específicamente en la ciudad de Wuhan, donde se reportaron 27 casos de neumonía de etiología desconocida, de los cuales siete correspondían a pacientes en estado grave (Amodio et al., 2020; Tang et al., 2020; Zhu et

al., 2020). En las semanas siguientes, la enfermedad comenzó a propagarse hacia otros países del continente asiático y posteriormente a distintas regiones del mundo. Ante la confirmación de transmisión comunitaria en múltiples continentes, la Organización Mundial de la Salud declaró oficialmente el brote como pandemia global en marzo de 2020 (Cucinotta y Vanelli, 2020; Roknuzzaman et al., 2024). Uno de los principales síntomas clínicos en los pacientes con COVID-19 fue la insuficiencia respiratoria, frecuentemente acompañada de disnea e hipoxemia, lo que hizo imprescindible la administración de oxígeno como parte del tratamiento estándar (Kompass Neumología, 2022). El oxígeno medicinal es una mezcla gaseosa con una concentración de oxígeno igual o superior al 95 %, ampliamente utilizada en pacientes que requieren soporte ventilatorio, especialmente en unidades de cuidados intensivos y en aquellos sometidos a ventilación mecánica invasiva (Schjørring et al., 2020; Cumpstey et al., 2022; Jaber et al., 2020; ICU-ROX Investigators, 2020). Durante la pandemia, la demanda global de oxígeno medicinal se incrementó entre cinco y diez veces respecto a los niveles habituales, como consecuencia del aumento sostenido de casos graves y críticos, generando una presión sin precedentes sobre los sistemas de producción y distribución (Ismail & Bansal, 2022; White et al., 2023; Bikkina et al., 2021; Ross y Wendel, 2023; Radhakrishnan et al., 2021).

En el contexto ecuatoriano, médicos y personal de enfermería reportaron una escasez crítica de oxígeno medicinal, mientras que los administradores hospitalarios buscaron alternativas urgentes para garantizar su abastecimiento. Desde el sector industrial encargado del envasado del gas se advirtió que la situación llegó a ser incluso más grave que en las primeras etapas de la pandemia, debido a

que la demanda hospitalaria superó la capacidad nacional de producción. Informes publicados entre 2020 y 2021 evidenciaron que algunos hospitales triplicaron su consumo habitual de oxígeno, generando una presión extrema sobre el sistema sanitario y logístico del país (Seth et al., 2022; Ortiz et al., 2021; Herrera et al., 2020). Ante la urgente necesidad de garantizar la disponibilidad de oxígeno medicinal durante la pandemia, surgió el interés por desarrollar soluciones tecnológicas capaces de satisfacer esta demanda crítica de manera sostenible. En este marco, la implementación de sistemas híbridos basados en energía solar y electrólisis del agua se consolidó como una alternativa viable desde el punto de vista técnico y ambiental. El aprovechamiento de la energía solar mediante paneles fotovoltaicos permite transformar la radiación solar en energía eléctrica, la cual puede emplearse para alimentar electrolizadores de agua, dispositivos en los que se separan las moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno (Kumar et al., 2022; Izadi et al., 2022; Jomon et al., 2024). Este proceso no solo posibilita la obtención de oxígeno con fines médicos, sino que también genera hidrógeno como subproducto, el cual ha demostrado un alto potencial como vector energético limpio, con aplicaciones crecientes en sectores industriales y energéticos (Campbell et al., 2024; Limper et al., 2022).

El Hospital Teodoro Maldonado Carbo, ubicado en el sur de la ciudad de Guayaquil, fue uno de los centros hospitalarios ecuatorianos que enfrentó una marcada escasez de suministros médicos esenciales durante la pandemia por COVID-19, entre ellos el oxígeno medicinal. Este insumo resultó fundamental para el tratamiento de enfermedades respiratorias agudas y crónicas, cuya incidencia se incrementó significativamente como consecuencia directa de la infección por SARS-

CoV-2. Debido a su designación como hospital centinela para la atención de pacientes con COVID-19, esta institución asumió una elevada carga asistencial, lo que incrementó sustancialmente la demanda de oxígeno y otros recursos críticos. Por su rol estratégico durante la emergencia sanitaria, el Hospital Teodoro Maldonado Carbo fue seleccionado como caso de estudio para la presente investigación. Actualmente, la institución dispone de 377 camas destinadas a cuidados intensivos, lo que refuerza su relevancia dentro del sistema nacional de salud (Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social, 2020).

Muthumeenal y Han (2024) propusieron un sistema acoplado de energía solar fotovoltaica con electrólisis PEM que incorpora baterías para mitigar la variabilidad de la irradiancia, logrando mejorar la estabilidad de la producción de hidrógeno y extender la vida útil del electrolizador, con eficiencias de conversión solar-hidrógeno de hasta 8,81 %. En la misma línea, Ghosh (2025) revisó el sistema PV-H<sub>2</sub> y destacó que el acoplamiento directo entre energía solar y electrólisis del agua constituye una solución limpia y competitiva para la producción de hidrógeno verde, aunque aún enfrenta desafíos relacionados con la intermitencia solar, la estabilidad operativa y la durabilidad de los electrolizadores. Por su parte, Gutiérrez-Martín et al. (2023) desarrollaron un modelo de diseño y simulación de sistemas híbridos solar-hidrógeno que optimiza el dimensionamiento de los componentes a partir de datos meteorológicos, demostrando reducciones significativas en el costo de producción del hidrógeno. Di Caro y Vitale (2024) propusieron una técnica de acoplamiento directo con reconfiguración dinámica de arreglos fotovoltaicos, logrando incrementos sustanciales en la energía entregada frente a configuraciones fijas. Asimismo, Phan Van et

al. (2023) realizaron una revisión exhaustiva de sistemas PV-electrolizador acoplados directamente, destacando estrategias de dimensionamiento y operación orientadas a reducir costos sin sacrificar eficiencia. Complementariamente, Vizza et al. (2025) evaluaron configuraciones costo-óptimas considerando la vida útil del sistema y la ubicación geográfica, mientras que Ma et al. (2024) demostraron que la integración de sistemas PVT con electrolizadores PEM mejora la eficiencia global en ambientes cálidos. En el ámbito hospitalario, Maggio et al. (2022) evidenciaron que la coproducción in situ de oxígeno medicinal e hidrógeno mediante electrólisis fotovoltaica puede resultar económicamente viable para hospitales de hasta 500 camas.

Finalmente, Tang et al. (2022) confirmaron la seguridad y efectividad del oxígeno generado por electrólisis como suplemento respiratorio en condiciones de alta altitud, mientras que Kato et al. (2005) demostraron que el aprovechamiento del oxígeno como subproducto de la electrólisis mejora significativamente la rentabilidad del proceso. A partir de los registros de consumo de oxígeno medicinal proporcionados por el Hospital Teodoro Maldonado Carbo para los años 2019 y 2022, que incluyen el número diario de pacientes atendidos y el volumen de oxígeno utilizado, la presente investigación simulará la producción in situ de oxígeno mediante un sistema híbrido compuesto por paneles solares fotovoltaicos y un electrolizador PEM. La simulación se realizará en Microsoft Excel, complementada con macros personalizadas para automatizar los cálculos del sistema. No se considerará el uso de baterías con el fin de reducir los costos de inversión y operación, permitiendo evaluar la viabilidad de un sistema de acoplamiento directo. Finalmente, se desarrollará un análisis técnico-

económico centrado exclusivamente en el costo de producción del oxígeno, con el objetivo de estimar su factibilidad como alternativa sostenible y autónoma en el contexto hospitalario.

### **Materiales y Métodos**

La metodología propuesta comienza con la recopilación de los datos históricos de consumo de oxígeno del Hospital Teodoro Maldonado Carbo durante el período comprendido entre los años 2019 y 2022, con el objetivo de establecer una referencia precisa de la demanda real de oxígeno que se busca cubrir mediante la solución propuesta. Posteriormente, se obtiene la información meteorológica del sitio de estudio utilizando la plataforma PVGIS, ingresando las coordenadas geográficas correspondientes, un azimut de  $0^\circ$  y una inclinación del panel fotovoltaico también de  $0^\circ$ . Esta configuración resulta adecuada para regiones cercanas a la línea ecuatorial, donde la radiación solar presenta una distribución relativamente homogénea a lo largo del año, lo que permite analizar de manera representativa el comportamiento anual de la irradiancia solar durante los años considerados (SFE Solar, s. f.; PVsyst, s. f.). Con base en los datos meteorológicos obtenidos, se procede a configurar el modelo del panel fotovoltaico utilizando las especificaciones técnicas proporcionadas por el fabricante, tales como potencia nominal, tensión, corriente y características de operación. De forma paralela, se establece la configuración del electrolizador de acuerdo con las propiedades de los materiales seleccionados y los parámetros electroquímicos definidos para el sistema. A partir de estas configuraciones, se calcula el punto de máxima potencia (MPP) tanto del panel fotovoltaico como del electrolizador, y posteriormente se realiza el acoplamiento eléctrico directo entre ambos dispositivos, con

el fin de evaluar su desempeño conjunto sin el uso de convertidores intermedios.

Empleando la Ley de Faraday, se calcula la cantidad de oxígeno e hidrógeno producida mediante el proceso de electrólisis del agua. La producción de oxígeno obtenida por cada sistema individual; compuesto por un panel fotovoltaico y una celda electrolizadora con un área y número de celdas definidos, se multiplica por el número total de sistemas instalados, de manera que se alcance el volumen de oxígeno requerido para satisfacer la demanda hospitalaria estimada. Finalmente, se analizan diversas configuraciones del sistema, variando el número de paneles fotovoltaicos, el área de las celdas electrolizadoras y la cantidad de celdas por electrolizador, con el propósito de identificar la alternativa que permita minimizar el costo de producción de oxígeno. En todos los escenarios evaluados se garantiza que la densidad de corriente se mantenga por debajo de  $1 \text{ A/cm}^2$ , dado que valores superiores pueden comprometer la integridad estructural de los componentes y reducir la vida útil del sistema.

### **Resultados y Discusión**

#### **Datos de consumo de oxígeno medicinal del Hospital Teodoro Maldonado Carbo**

El análisis del consumo de oxígeno medicinal en el Hospital Teodoro Maldonado Carbo se realizó a partir de una base de datos que contiene más de 175 000 registros individuales, en los cuales se detalla el consumo por paciente y el tipo de suministro utilizado, ya sea oxígeno administrado en cama hospitalaria o en tanques destinados a tratamientos domiciliarios, tal como se ilustra en la Figura 2. Esta información fue proporcionada por las autoridades del Hospital Teodoro Maldonado Carbo durante el período de estudio. El año con mayor demanda registrada fue 2022, alcanzando un total de 438,46 toneladas, con un promedio mensual de



36,54 toneladas. En contraste, el año 2020, correspondiente al inicio de la pandemia por COVID-19, presentó el menor consumo total, con 217,43 toneladas acumuladas y un promedio mensual de 18,12 toneladas.

Esta aparente contradicción se explica por la severa crisis de abastecimiento de oxígeno que afectó al hospital durante el año 2020. En dicho periodo, diversos proveedores priorizaron la venta del gas medicinal a los mejores postores, lo que dificultó significativamente su adquisición por parte del sistema público de salud. A esta problemática se sumaron irregularidades administrativas ampliamente denunciadas en medios de investigación periodística y actualmente sujetas a procesos de análisis e indagación judicial (TierradeNadie.ec, s. f.; Americas Market Intelligence, s. f.; GK, 2021; Primicias.ec, 2024). Dado que el año 2022 representa el escenario de mayor consumo de oxígeno registrado en el hospital, este período se adopta como referencia crítica para el análisis y el diseño del sistema de generación y almacenamiento de oxígeno medicinal propuesto en el presente estudio.

### **Datos climatológicos**

El conocimiento de la irradiación solar disponible y de la temperatura ambiente durante el período comprendido entre 2019 y 2022 constituye un aspecto fundamental para la estimación del potencial de generación eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos. De igual manera, disponer de los datos históricos de consumo de oxígeno medicinal del hospital resulta esencial para el desarrollo de la metodología y la ejecución de los cálculos necesarios dentro del simulador (García et al., 2019; Vaca y Ordóñez, 2020). Para la obtención de los datos climatológicos se empleó la plataforma PVGIS, la cual proporciona información confiable sobre irradiancia solar

promedio horaria y temperatura ambiente a partir de bases de datos meteorológicas de alta resolución. La ubicación seleccionada para el estudio fue la ciudad de Guayaquil, específicamente el emplazamiento del Hospital Teodoro Maldonado Carbo. La base de datos utilizada fue PVGIS-ERA5, estableciendo como año inicial 2019 y como año final 2022. La simulación se configuró considerando un sistema de montaje fijo, dado que los paneles solares propuestos no estarán diseñados para seguir la trayectoria solar. Como parámetros adicionales requeridos por la plataforma, se estableció un azimut de  $0^\circ$  y un ángulo de inclinación acorde a la latitud del sitio, en concordancia con las recomendaciones técnicas para regiones cercanas a la línea ecuatorial.

### **Paneles fotovoltaicos**

Los paneles solares empleados en la simulación del proyecto fueron seleccionados a partir de la información técnica disponible en la página oficial del fabricante JA Solar. El modelo escogido fue el JAM72-S30, con una potencia nominal de 540 W. Para el cálculo de los parámetros fotovoltaicos se utilizó la ficha técnica del fabricante bajo condiciones estándar de prueba (STC), correspondientes a una irradiancia de  $G_0=1000 \text{ W/m}^2$  y una temperatura de celda de  $T_{m,0}=25^\circ\text{C}$  (298,15 K). Cada panel presenta dimensiones de 2,278 m de largo por 1,134 m de ancho, lo que equivale a un área total de 2,58 m<sup>2</sup>. La ubicación prevista para la instalación de los paneles solares corresponde a las terrazas del Hospital Teodoro Maldonado Carbo, donde se garantiza una exposición óptima a la radiación solar. Como alternativa complementaria, se considera su instalación en los estacionamientos del hospital, aprovechando un espacio actualmente subutilizado y proporcionando, adicionalmente,

sombra a los vehículos del personal médico, administrativo y de los pacientes.

### **Sistema de recolección de oxígeno**

El oxígeno se genera en el lado del ánodo del sistema de electrólisis y es conducido mediante tuberías, preferiblemente fabricadas en acero inoxidable compatible con oxígeno, hacia un separador gas-líquido encargado de eliminar el agua arrastrada durante el proceso. El líquido recuperado se recircula al tanque de alimentación para su reutilización, optimizando el uso del recurso hídrico. Para el transporte y acondicionamiento del gas se emplean compresores o, dependiendo del esquema de presión adoptado, soplantes y bombas en los circuitos líquidos. Posteriormente, el oxígeno es sometido a un proceso de enfriamiento mediante un intercambiador térmico, con el objetivo de alcanzar condiciones adecuadas para su almacenamiento y facilitar la eliminación de vapor y gotas finas. La fase de limpieza incluye un demister o separador de niebla destinado a retener partículas líquidas remanentes y, de ser necesario, sistemas adicionales de filtrado o secado para alcanzar la pureza exigida en aplicaciones médicas. Finalmente, el oxígeno tratado se transfiere a tanques de inercia y almacenamiento fabricados en acero inoxidable. Desde estos recipientes, el gas puede mantenerse comprimido para su uso y distribución directa, o bien someterse a etapas adicionales de compresión y criogenia en caso de requerirse su licuefacción. Todos los componentes del sistema deben diseñarse conforme a las normativas vigentes para gases medicinales y emplear materiales compatibles con oxígeno, garantizando así la seguridad y estabilidad del suministro.

### **Sistema de recolección de hidrógeno**

Aunque el presente estudio no se centra en la explotación del hidrógeno producido, se plantea

una línea básica para su recolección y acondicionamiento a partir del stack de electrólisis. El hidrógeno se genera en el lado del cátodo y es conducido mediante tuberías, preferiblemente de acero inoxidable compatible con hidrógeno, hacia un separador gas-líquido que elimina el agua arrastrada, la cual se recircula al tanque de alimentación para su reutilización. Posteriormente, el gas pasa por un sistema de enfriamiento destinado a reducir su temperatura y facilitar la condensación y eliminación del vapor de agua, así como por un demister o separador de niebla para retener gotas finas. Para alcanzar la pureza requerida, el hidrógeno puede someterse a procesos de secado y desoxidación, tales como adsorción en tamices moleculares o tratamientos catalíticos. Finalmente, el gas se comprime mediante equipos adecuados para su almacenamiento en recipientes a presión diseñados específicamente para hidrógeno. Como posible valor añadido; fuera del alcance principal de este trabajo, el hidrógeno purificado podría emplearse en sistemas de cogeneración o en unidades de celda de combustible reversible, permitiendo recuperar parte de la energía en forma de electricidad. En todos los casos, las etapas del sistema deben diseñarse de acuerdo con criterios estrictos de seguridad para hidrógeno y gases medicinales, considerando la selección de materiales, ventilación, detección de fugas y protección frente a riesgos de ignición.

### **Cálculos de los parámetros fotovoltaicos**

El número de datos disponibles de irradiancia solar ( $G$ ) y temperatura ambiente ( $T_a$ ) es considerablemente elevado. Por ejemplo, para el año 2019 se registraron 4 096 datos, mientras que para el año 2020 se obtuvieron 4 153 registros, manteniéndose valores similares en los años posteriores. Con el fin de procesar este volumen de información de manera eficiente y sistemática, se desarrolló una macro en

Microsoft Excel que permite calcular los parámetros fotovoltaicos correspondientes a cada par de valores de G y Ta, aplicando las ecuaciones propuestas por Carrero et al. (2011). La macro se estructura de tal forma que, para cada combinación de irradiancia y temperatura ambiente, se calculan las variables fotovoltaicas necesarias a partir de las constantes técnicas proporcionadas por el fabricante del panel solar. Tanto las variables como las constantes son declaradas y definidas dentro del código, asignándoles los rangos de valores correspondientes para garantizar la consistencia de los cálculos a lo largo de todo el período de análisis. Los parámetros considerados en estos cálculos se presentan de manera detallada en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Parámetros fotovoltaicos con sus respectivas ecuaciones empleadas en la macro.

Nombres de las variables	Ecuaciones para cada variable
Temperatura del módulo ( $T_m$ )	$T_m = T_a + G \left( \frac{NOCT - 20}{800} \right)$
Voltaje térmico ( $V_{th}$ )	$V_{th} = \left( \frac{k}{q} \right) T_m$
$R'_s$ , $R'_{sh}$ y $n'$ Son obtenidos por el método de Carrero y son valores fijos para cada panel fotovoltaico. $R'_{sh} = 107,23 \, \Omega$ $R'_s = 0,2165 \, \Omega$ $n' = 0,4133$	$R_{sh} = R'_{sh} \left( \frac{G_0}{G} \right)$
	$R_s = R'_s \left( \frac{T_m}{T_{m,0}} \right) \left[ 1 - 0,217 \ln \left( \frac{G}{G_0} \right) \right]$
	$n = n' \left( \frac{T_m}{T_{m,0}} \right)$
Intensidad de corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ )	$I_{sc} = I_{sc,0} \left[ \frac{G}{G_0} + \alpha_{Isc} (T_m - T_{m,0}) \right]$
Intensidad de corriente luminosa ( $I_L$ )	$I_L = I_{sc} \left( \frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}} \right)$
Voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ )	$V_{oc} = V_{oc,0} \left[ 1 + \beta_{voc} (T_m - T_{m,0}) \right] + N_s n V_{th} \ln \left( \frac{G}{G_0} \right)$
Corriente de saturación ( $I_0$ )	$I_0 = \frac{[I_{sc}(R_{sh} + R_s) - V_{oc}] e^{\left( \frac{-V_{oc}}{N_s n V_{th}} \right)}}{R_{sh}}$

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculados los parámetros fotovoltaicos para cada valor de G y Ta correspondientes al año de estudio 2022, se procede a determinar la intensidad en el punto

de máxima potencia ( $I_{mpp}$ ), el voltaje en el punto de máxima potencia ( $V_{mpp}$ ) y la potencia máxima ( $P_m$ ) para cada combinación de G y Ta registrada en cada año analizado.

### Parámetros del electrolizador y Acople con el panel fotovoltaico

Para la celda del electrolizador, se prueban distintas combinaciones de número de celdas (NEL) y áreas de celda (SEL) en la celda PEM. Estas dos variables definen el comportamiento del electrolizador, siendo el área de cada celda expresada en  $cm^2$ . El tamaño de la celda (SEL) y el número total de celdas (NEL) se determinan mediante la intersección de las curvas de potencia del electrolizador con las curvas de potencia-voltaje del panel fotovoltaico.

**Tabla 2.** Parámetros del electrolizador de agua

Parámetro cinético [K]	$27,8 \, \Omega^{-1} cm^2$
Resistencia eléctrica total de la celda [r]	$0,15 \, \Omega cm^2$
Potencia de disociación [ $E_0$ ]	1,40 V

Fuente: Elaboración propia.

Los datos de la tabla 2 presenta los parámetros cinéticos y eléctricos del electrolizador de agua utilizados para construir su curva de potencia (curva verde de la Figura 5), que representa la relación entre la potencia (P) y el voltaje (V). Primero, se determina el voltaje a partir de la siguiente ecuación:

$$V = \left( \frac{J + 2K(Jr + E_0) + (J^2 + 4KE_0J)^{1/2}}{2K} \right) N_{EL} \quad (\text{ec. 1})$$

donde J es la densidad de corriente (valor asignado en el análisis), K el parámetro cinético, r la resistencia eléctrica total de la celda, y  $E_0$  la potencia de disociación.

Luego, la potencia se obtiene con:

$$P(W) = V \times I \quad \text{donde} \quad I = J \times SEL$$

Finalmente, se seleccionan los valores de SEL y NEL que permitan que la curva del electrolizador intercepte la mayor cantidad de



puntos de máxima potencia (MPP) del sistema fotovoltaico. En este estudio, los valores definidos son  $SEL = 6 \text{ cm}^2$  y  $NEL = 24$ . Se debe determinar el valor de la intensidad en una celda del electrolizador ( $I_{EL-1}$ ), el cual debe cumplir que, al reemplazarlo en las ecuaciones correspondientes, el resultado sea igual a cero. Este valor es clave, ya que el cálculo del voltaje del electrolizador ( $V_{EL}$ ) también depende de  $I_{EL-1}$ . Por lo tanto, ambas ecuaciones deben resolverse con un mismo valor de  $I_{EL-1}$  que satisfaga esta condición. Para este fin, se utiliza una macro en Excel que aplica el principio de Solver, permitiendo encontrar el valor de  $I_{EL-1}$  que iguala el resultado a cero en cada caso analizado. Las curvas se presentan junto con las curvas simuladas del módulo fotovoltaico bajo condiciones de irradiancia distintas a  $1000 \text{ W/m}^2$  y temperatura de celda de  $298,15 \text{ K}$ , correspondientes al año 2022. Además, se indican los puntos de máxima potencia (MPP) calculados para cada condición, lo que permite evaluar el acoplamiento entre el sistema fotovoltaico y el electrolizador en diversos escenarios de operación.

### Oxígeno producido

El valor de la cantidad de oxígeno que se desea producir se determina a partir del consumo de oxígeno medicinal registrado en el Hospital Teodoro Maldonado Carbo durante el año 2022. Para obtener la cantidad de oxígeno producido ( $QO_2$ , en  $\text{kg/h}$ ) para cada mes, se utiliza la misma macro previamente descrita. Esta herramienta realiza la suma de todos los valores correspondientes a una misma fecha y, al detectar un cambio de fecha, reinicia el conteo. Posteriormente, los resultados se convierten de gramos a kilogramos. Una vez calculada la producción mensual de oxígeno, se comparan estos valores con el consumo mensual registrado en el hospital, con el objetivo de determinar el número de paneles fotovoltaicos

necesarios. La cantidad de oxígeno producida se calcula mediante la ecuación de Faraday, obteniendo así la producción de oxígeno de cada electrolizador acoplado a una celda solar. Dado que un único sistema no puede cubrir la demanda total del hospital, se debe multiplicar esta producción por el número necesario de paneles fotovoltaicos para alcanzar la cantidad total requerida, según lo establecido en la ecuación (2).

$$Q_{(O_2)} = S_{\text{total}} \cdot (1 - A / [cm]^2) / (n \cdot e^-) \cdot F \cdot [Mw]_{(H_2)} \cdot 1 / 1000 \cdot \eta_{EL} \quad (\text{ec. 2})$$

### Costo de producción de oxígeno

Para estimar el costo de producción del sistema, se consideraron múltiples factores: la cantidad total de paneles fotovoltaicos requeridos, el área utilizada por cada electrolizador, el número de celdas por electrolizador, así como los costos de operación y mantenimiento (O&M), el costo de amortización y el factor de escala. El costo anual de los paneles solares se determina mediante la ecuación (3):

$$c_{(PV, \text{year})} = c_{PV} \cdot (1/L_{PV} + [O\&M]_{PV}) \quad (\text{ec. 3})$$

El costo anual de los electrolizadores se calcula con la ecuación (4):

$$c_{(EL, \text{year})} = c_{EL} \cdot (1/L_{EL} + [O\&M]_{EL}) \quad (\text{ec. 4})$$

Finalmente, el costo total por kilogramo de oxígeno producido se obtiene a partir de la ecuación (5):

$$c_{(O_2)} = (c_{(PV, \text{year})} + c_{(EL, \text{year})}) / Q_{(O_2)} \quad (\text{ec. 5})$$

donde  $QO_2$  representa la cantidad total de oxígeno producido en el año.

La simulación de la producción de oxígeno para el año 2022, bajo el escenario óptimo desde el

punto de vista económico, determinó que la cantidad requerida de paneles fotovoltaicos es de 4778 unidades. Con esta configuración, se logra cubrir completamente la demanda de oxígeno del Hospital Teodoro Maldonado Carbo. Estas configuraciones se descartaron por motivos operativos y de durabilidad: densidades de corriente elevadas aumentan las sobrepotencias y aceleran los mecanismos de degradación del electrolizador, con el consiguiente riesgo de reducir la vida útil del stack y de incrementar costos de mantenimiento y reemplazo. Por coherencia metodológica, dichas combinaciones no participaron en la comparación de costos anualizados y, por tanto, aparecen cruzadas en la matriz. La configuración óptima (24 celdas NEL, área de 6 cm<sup>2</sup>, 4 778 paneles) se resalta en rojo, ya que cumple la restricción  $J \leq 1 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$  y minimiza el costo anualizado de producción de O<sub>2</sub>.

### **Conclusiones**

El proceso de producción de oxígeno se simuló para el año 2022 en el Hospital Teodoro Maldonado Carbo, empleando un sistema acoplado fotovoltaico–electrolizador (PV–EL). A partir de las simulaciones se concluye que el sistema PV–EL puede generar volúmenes relevantes de oxígeno medicinal, suficientes para cubrir una fracción significativa de la demanda del hospital durante el periodo analizado. La producción simulada de oxígeno depende directamente de la demanda clínica registrada en el hospital y de las condiciones ambientales utilizadas como entradas del modelo, principalmente la irradiancia solar GGG y la temperatura ambiente Ta, que determinan la potencia disponible y el rendimiento del electrolizador. En los últimos meses del año se observa un excedente acumulado de oxígeno, de modo que no es necesario suministrar adicionalmente: el exceso producido en meses previos permite cubrir la

demanda posterior mediante almacenamiento/gestión de inventario.

En cuanto a la estructura de costos del sistema PV–EL, el componente determinante es el electrolizador: el número de celdas por stack (N<sub>EL</sub>) y el proveedor de las mismas condicionan en gran medida el costo de capital y, por ende, el costo nivelado de producción de oxígeno. En la simulación se asumió un único proveedor para los paneles fotovoltaicos, por lo que el costo unitario de los módulos se mantuvo constante entre escenarios; en cambio, el precio asociado a las celdas del electrolizador fue variable según proveedor y configuración. El análisis identificó como configuración óptima NEL = 24 (24 celdas por stack), con las demás variables y restricciones consideradas (por ejemplo,  $J \leq 1 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ). El sistema propuesto demuestra ser viable y reproducible: su arquitectura modular (acoplamiento directo PV–EL) facilita la replicación y la adaptación a distintas unidades hospitalarias. No obstante, su implementación requiere la realización previa de análisis técnicos y logísticos específicos para cada centro, tales como: caracterización de la demanda de oxígeno, evaluación del recurso solar local (perfil de G y Ta), disponibilidad de espacio y condiciones estructurales para el montaje de los módulos, estudio de integración eléctrica y de almacenamiento, análisis económico y regulatorio, y un plan de operación y mantenimiento. Con estos estudios y las correspondientes adaptaciones a las condiciones locales (escala, normativa y proveedores), el sistema puede instalarse y operar en otras instalaciones hospitalarias con expectativas razonables de rendimiento y coste similares a los aquí reportados.

### **Referencias Bibliográficas**

Amodio, E., Vitale, F., Cimino, L., Casuccio, A., & Tramuto, F. (2020). Outbreak of novel

- coronavirus (SARS-CoV-2): First evidences from international scientific literature and pending questions. *Healthcare*, 8(1), 51. <https://doi.org/10.3390/healthcare8010051>
- Americas Market Intelligence. (s. f.). How illicit business practices burden Latin America's healthcare systems. <https://americasmi.com/insights/how-illicit-business-practices-burden-latin-americas-healthcare-systems/>
- Bikkina, S., Manda, V., & Rao, U. (2021). Medical oxygen supply during COVID-19: A study with specific reference to the state of Andhra Pradesh, India. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.196>
- Campbell-Stanway, C., Becerra, V., Prabhu, S., & Bull, J. (2024). Investigating the role of byproduct oxygen in UK-based future scenario models for green hydrogen electrolysis. *Energies*, 17(2), 281. <https://doi.org/10.3390/en17020281>
- Carrero, C., Ramírez, D., Rodríguez, J., & Platero, C. (2011). Accurate and fast convergence method for parameter estimation of PV generators based on three main points of the I–V curve. *Renewable Energy*, 36(11), 2972–2977. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.04.001>
- Cucinotta, D., & Vanelli, M. (2020). WHO declares COVID-19 a pandemic. *Acta Biomed*, 91(1), 157–160. <https://doi.org/10.23750/abm.v91i1.9397>
- Cumpstey, A., Oldman, A., Martin, D., Smith, A., & Grocott, M. (2022). Oxygen targets during mechanical ventilation in the ICU: A systematic review and meta-analysis. *Critical Care Explorations*, 4(4), e0652. <https://doi.org/10.1097/CCE.0000000000000652>
- Di Caro, A., & Vitale, G. (2024). Direct-coupled improvement of a solar-powered proton exchange membrane electrolyzer by a reconfigurable source. *Clean Technologies*, 6(3), 1203–1228. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol6030059>
- García, J., Jurado, F., & Larco, V. (2019). Review and resource assessment, solar energy in different region in Ecuador. *E3S Web of Conferences*, 80, 01003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198001003>
- Ghosh, A. (2025). Solar-powered green hydrogen from electrolyzer (PV-H<sub>2</sub>): A review. *Solar RRL*. <https://doi.org/10.1002/solr.202500150>
- GK. (2021, January 18). Posible tráfico de influencias en compra de hospital Teodoro Maldonado por USD 300 mil. <https://gk.city/2021/01/18/posible-trafico-influencias-teodoro-maldonado-300-mil/>
- Gutiérrez-Martín, F., Díaz-López, J., Caravaca, A., & Dos Santos-García, A. (2023). Modeling and simulation of integrated solar PV–hydrogen systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.179>
- Herrera, D., Altamirano, C., & Gaus, D. (2020). COVID-19 in Ecuador: Imported control strategies without context in a challenged healthcare system. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 104(2), 414–415. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.20-1347>
- ICU-ROX Investigators. (2020). Conservative oxygen therapy during mechanical ventilation in the ICU. *New England Journal of Medicine*, 382(11), 989–998. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1903297>
- Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social. (2020, March 27). Hospital de campaña ya funciona en el HTMC para atención de paciente con COVID-19. [https://www.iess.gob.ec/es/noticias/-/asset\\_publisher/4DHq/content/hospital-de-campana-ya-functiona-en-el-htmc-para-atencion-de-paciente-con-covid-19/10174](https://www.iess.gob.ec/es/noticias/-/asset_publisher/4DHq/content/hospital-de-campana-ya-functiona-en-el-htmc-para-atencion-de-paciente-con-covid-19/10174)
- Ismail, J., & Bansal, A. (2022). Medical oxygen: A lifesaving drug during the COVID-19 pandemic—Source and distribution. *Indian Journal of Pediatrics*, 89, 607–615. <https://doi.org/10.1007/s12098-021-03978-0>

- Jaber, S., Citerio, G., & Slutsky, A. (2020). Acute respiratory failure and mechanical ventilation in the context of the COVID-19 pandemic. *Intensive Care Medicine*, 46, 2131–2132. <https://doi.org/10.1007/s00134-020-06298-7>
- Jomon, J., Shabu, J., Jose, M., Yujin, N., & Alex, L. (2024). Solar driven hydrogen and oxygen production for cooking and medical applications. *E3S Web of Conferences*, 529, 02002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452902002>
- Kato, T., Kubota, M., Kobayashi, N., & Suzuoki, Y. (2005). Effective utilization of by-product oxygen from electrolysis hydrogen production. *Energy*, 30(14), 2580–2595. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.07.004>
- Kompass Neumología. (2022). Insuficiencia respiratoria y COVID-19: Un llamado a la investigación. *Kompass Neumología*, 4(1), 1–8. <https://doi.org/10.1159/000521663>
- Kumar, S., Mishra, S., Goswami, M., Singh, N., Siddiqui, H., Natarajan, S., Khan, M., & Srivastava, A. (2022). Medical oxygen: A vital in COVID-19 pandemic. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 60(9). <https://doi.org/10.56042/ijpap.v60i9.63734>
- Limper, U., Klaas, L., Köhler, M., Lichte, D., Maldonado Samaniego, N., Suarez, J., & Hoffschmidt, B. (2022). Limited utility of self-made oxygen generators assembled from everyday commodities during the COVID-19 pandemic. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 17, e177. <https://doi.org/10.1017/dmp.2022.122>
- Ma, Y., Zhao, M., Bai, F., Yu, R., Liu, L., & Wang, J. (2024). Numerical simulation and experimental verification of solar PVT coupled PEM electrolyzer system for hydrogen production. *Fuel*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131323>
- Maggio, G., Squadrito, G., & Nicita, A. (2022). Hydrogen and medical oxygen by renewable energy based electrolysis: A green and economically viable route. *Applied Energy*, 306, 117993. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117993>
- Muthumeenal, A., & Han, D. (2024). Efficient solar-powered PEM electrolysis for sustainable hydrogen production: An integrated approach. *Emergent Materials*, 7(4). <https://doi.org/10.1007/s42247-024-00697-y>
- Ortiz-Prado, E., Fernandez-Naranjo, R., Torres-Berru, Y., Lowe, R., & Torres, I. (2021). Exceptional prices of medical and other supplies during the COVID-19 pandemic in Ecuador. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 105(1), 81–87. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.21-0221>
- Phan Van, L., Hoang, L., & Nguyen Duc, T. (2023). A comprehensive review of direct coupled photovoltaic–electrolyser systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.257>
- Primicias.ec. (2024, February 5). Corrupción en pandemia: Teodoro Maldonado Carbo, sin sentencia. <https://www.primicias.ec/noticias/sucesos/corrupcion-pandemia-teodoro-maldonado-carbo-sin-sentencia/>
- Radhakrishnan, R., Mohanty, C., & Singh, N. (2021). The balancing act of hospital medical oxygen demand and supply. *Saudi Journal of Anaesthesia*, 15(3), 235–242. [https://doi.org/10.4103/sja.sja\\_404\\_21](https://doi.org/10.4103/sja.sja_404_21)
- Roknuzzaman, A., Sarker, R., Shahriar, M., Mosharrafa, R., & Islam, M. (2024). The WHO has declared COVID-19 is no longer a pandemic-level threat. *Clinical Pathology*, 17, 2632010X241228053. <https://doi.org/10.1177/2632010X241228053>
- Ross, M., & Wendel, S. (2023). Oxygen inequity in the COVID-19 pandemic and beyond. *Global Health: Science and Practice*, 11(1), e2200360. <https://doi.org/10.9745/GHSP-D-22-00360>
- Schjørring, O., Jensen, A., Nielsen, C., Ciubotariu, A., Perner, A., Wetterslev, J., Lange, T., & Rasmussen, B. (2020). Arterial oxygen tensions in mechanically ventilated ICU patients and mortality. *British Journal*

- of *Anaesthesia*, 124(4), 420–429.  
<https://doi.org/10.1016/j.bja.2019.12.039>
- Tang, X., Liang, L., Hu, L., & Song, Y. (2022). Electrolysis of water is an effective source of oxygen at high altitude. *Journal of Translational Medicine*, 20, 242.  
<https://doi.org/10.1186/s12967-022-03412-2>
- Tang, X., Wu, C., Li, X., Song, Y., Yao, X., Wu, X., Duan, Y., Zhang, H., Wang, Y., Qian, Z., Cui, J., & Lu, J. (2020). On the origin and continuing evolution of SARS-CoV-2. *National Science Review*, 7(6), 1012–1023.  
<https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa036>
- TierradeNadie.ec. (s. f.). Hospital desahuciado por corrupción.  
<https://tierradenadie.ec/hospital-desahuciado-por-corrupcion/>
- Vaca Revelo, D., & Ordóñez, F. (2020). *Mapa solar del Ecuador 2019*. Escuela Politécnica Nacional.
- Vizza, D., Caponi, R., Bocci, E., Del Zotto, L., & Bassano, C. (2025). Cost effective hydrogen production of coupled photovoltaic and electrolyzer systems. *Energy Conversion and Management: X*.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101136>
- White, H., Danesh, V., Ogola, G., Jimenez, E., & Arroliga, A. (2023). Quantifying oxygen supply and demand during the COVID-19 pandemic. *Intensive and Critical Care Nursing*, 75, 103374.  
<https://doi.org/10.1016/j.iccn.2022.103374>
- Zhu, N., Zhang, D., Wang, W., Li, X., Yang, B., Song, J., Zhao, X., Huang, B., Shi, W., Lu, R., Niu, P., Zhan, F., Ma, X., Wang, D., Xu, W., Wu, G., Gao, G., & Tan, W. (2020). A novel coronavirus from patients with pneumonia in China, 2019. *New England Journal of Medicine*, 382(8), 727–733.  
<https://doi.org/10.1056/NEJMoa2001017>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional. Copyright © Tyrone Fernando Alcivar Reyna.



