



**Universidad
Europea**

UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

GRADO EN FÍSICA

TRABAJO FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO
VERDE MEDIANTE CELDAS ELECTROLÍTICAS**

Javier Martínez del Peral García-Duarte

Dirigido por

Luis Poderoso Labrador

CURSO 2024-2025

TÍTULO: Estudio de la producción de hidrógeno verde mediante celdas electrolíticas.

AUTOR: Javier Martínez del Peral García-Duarte.

TITULACIÓN: Grado en Física.

DIRECTOR DEL PROYECTO: Luis Poderoso Labrador.

FECHA: Julio de 2025.

RESUMEN

Este trabajo se ha centrado en un análisis preciso sobre el funcionamiento fisicoquímico de la electrólisis, impulsado por la creciente relevancia de la producción de hidrógeno verde en el contexto de un modelo energético descarbonizado. A lo largo del documento se han explicado los principios termodinámicos y químicos que gobiernan su reacción, así como la influencia de parámetros físicos como la temperatura, la presión o la densidad de corriente sobre el rendimiento global de la celda electrolítica. Posteriormente, se ha desarrollado una revisión comparada de las tecnologías actuales de electrólisis (AWE, PEM, AEM, SOEC), detallando sus características propias, los materiales empleados, sus ventajas y sus limitaciones, con el fin de identificar la tecnología más adecuada para su integración con fuentes de energía solar. Para ilustrar el papel que puede desempeñar la electrólisis en la transición energética, se propuso un diseño donde se combinaba una celda PEM alimentada con energía solar fotovoltaica, junto con un colector solar que permitiese precalentar el agua hasta la temperatura de operación necesaria. En este diseño se realizó un modelo de la distribución del tiempo de insolación a lo largo del año, que permitió identificar el periodo operativo de nuestro diseño. En el desarrollo del proyecto, se implementaron diversos programas en Python para reforzar y apoyar los conceptos expuestos, mostrando gráficas explicativas, modelos distributivos y permitiendo resolver cálculos complejos de manera numérica.

Palabras clave: Electrólisis, hidrógeno, PEM, energía solar, simulación, eficiencia energética.

ABSTRACT

This work has focused on a precise analysis of the physicochemical operation of electrolysis, driven by the growing relevance of green hydrogen production within the context of a decarbonized energy model. Throughout the document, the thermodynamic and chemical principles governing the reaction have been explained, as well as the influence of physical parameters such as temperature, pressure and current density on the overall performance of the electrolytic cell. Subsequently, a comparative review of current electrolysis technologies (AWE, PEM, AEM, SOEC) has been conducted, detailing their specific characteristics, the materials used, their advantages and limitations, with the aim of identifying the most suitable technology for integration with solar energy sources. To illustrate the role that electrolysis can play in the energy transition, a design was proposed that combines a PEM cell powered by photovoltaic solar energy, together with a solar collector capable of preheating the water to the necessary operating temperature. This design included a model of the annual solar insolation time distribution, which enabled the identification of the system's operating period. During the development of the project, various Python programs were implemented to support and reinforce the concepts discussed, providing explanatory graphs, distribution models, and enabling the resolution of complex calculations numerically.

Key words: Electrolysis, hydrogen, PEM, solar energy, simulation, energy efficiency.

TABLA RESUMEN

	DATOS
Nombre y apellidos:	Javier Martínez del Peral García-Duarte
Título del proyecto:	Estudio de la producción de hidrógeno verde mediante celdas electrolíticas
Director del proyecto:	Luis Poderoso Labrador
El proyecto se ha realizado en colaboración de una empresa o a petición de una empresa:	NO
El proyecto ha implementado un producto:	SI
El proyecto ha consistido en el desarrollo de una investigación o innovación:	SI
Objetivo general del proyecto:	Analizar y modelar la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis con energía solar

ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
TABLA RESUMEN	5
ÍNDICE.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE GRÁFICAS	9
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 Estado del arte de la electrólisis	10
1.2 Contexto y justificación.....	11
Capítulo 2. OBJETIVOS.....	12
Capítulo 3. FUNDAMENTOS FÍSICOS	13
3.1 Partes de una celda electrolítica.....	13
3.2 Semirreacciones redox	14
3.3 Termodinámica de la reacción.....	15
3.4 Eficiencia energética	20
Capítulo 4. Influencia de T y P	22
4.1 Influencia de la temperatura	22
4.2 Influencia de la presión.....	24
4.3 Influencia conjunta de P y T.....	27
Capítulo 5. TIPOS DE CELDA ELECTROLÍTICA.....	31
5.1 Electrólisis alcalina (AWE).....	32
5.2 Electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM).....	33
5.3 Electrólisis de membrana de intercambio aniónico (AEM)	37
5.4 Celdas electrolizadoras de óxidos sólidos (SOEC).....	40
5.5 Comparación de las diferentes celdas	43
Capítulo 6. Integración de celda PEM con células fotovoltaicas.....	45
6.1 Electrolizador y colector solar	46

6.2	Irradiancias de operación	48
6.3	Bomba y tanque de agua	53
6.4	Placa fotovoltaica.....	55
6.5	Resultados y limitaciones	56
Capítulo 7.	CONCLUSIONES	57
Capítulo 8.	BIBLIOGRAFÍA.....	59
Capítulo 9.	ANEXOS	65
9.1	Gráfica 1. Contribuciones al voltaje de electrólisis del agua	65
9.2	Gráfica 2. Eficiencias vs Densidad de corriente	66
9.3	Gráfica 3. Voltaje total en función de J a distintas T	68
9.4	Gráfica 4. Eficiencia eléctrica en función J a distintas T	69
9.5	Gráfica 5. Curvas isothermas de voltaje reversible en función de P	70
9.6	Gráfica 6. Influencia simultánea de P y T en U, para J fijo.....	71
9.7	Programa de cálculo de U (T, P).....	73
9.8	Programa de compensación de T frente a ΔP	74
9.9	Gráfica 7. Distribución sinusoidal de Irradiancias en un año.....	77
9.10	Gráfica 8. Proporción temporal de irradiancias de operación	78
9.11	Programa de cálculo de derivada numérica.	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentajes de las fuentes de producción de hidrógeno a nivel global (Le et al., 2023).	10
Figura 2. Esquema de las partes de una celda electrolítica, donde se muestran los electrodos, el diafragma y el electrolito (Yue et al., 2021).	13
Figura 3. Tipos de electrólisis explicados a lo largo del documento	31
Figura 4. Esquema de celda de electrólisis alcalina (AWE) (K. Zhang et al., 2022).	32
Figura 5. Esquema detallado de los componentes de una celda PEM (Sood et al., 2020).	33
Figura 6. Esquema de la reacción y del movimiento de los reactivos y productos en la celda PEM (Electrolyzers, s. f.).	35
Figura 7. Esquema de la celda AEM, junto con los elementos de la reacción (Shiva Kumar & Lim, 2022)	38
Figura 8. Esquema de la celda SOEC, junto con los elementos de la reacción (Shiva Kumar & Lim, 2022).	41
Figura 9. Esquema del dispositivo propuesto.	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa de los tipos de electrólisis estudiados. Los datos de coste fueron obtenidos por Sebbahi et al. (2024). El área mostrada es la del electrodo y se obtuvieron usando los datos de Shiva Kumar y Lim (2022).	43
Tabla 2. Resumen de las ventajas y desventajas de los electrolizadores estudiados.....	44
Tabla 3. Datos del electrolizador comercial que se modelará	46

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Voltaje total aplicado a la celda electrolítica en función de la densidad de corriente. Además, están representados las contribuciones de los sobrepotenciales, junto con los valores fijos del voltaje reversible y termoneutral en condiciones estándar (Anexo 1).	19
Gráfica 2. Eficiencia eléctrica y termoneutral en función de la densidad de corriente aplicada (Anexo 2)	21
Gráfica 3. Voltaje total en función de la densidad de corriente, representado a distintas temperaturas (anexo 3).	23
Gráfica 4. Eficiencia eléctrica en función de la densidad de corriente a distintas temperaturas (anexo 4).....	24
Gráfica 5. Potencial reversible en función de la presión de operación, para distintas curvas isotermas (anexo 5).....	26
Gráfica 6. Influencia simultánea de P y T en voltaje total U, para una densidad de corriente de 1000 A/m ² (anexo 6).	27
Gráfica 7. Distribución anual de la irradiancia en horas de sol, para datos del 2024 (anexo 10)49	
Gráfica 8. Proporción de tiempo solar para el rango de irradiancias de $m = 13.59$ kg, junto con el valor de los extremos del intervalo. Representa una cantidad de 1007 h (anexo 11).	52
Gráfica 9. Proporción de tiempo solar para el rango de irradiancias de $m = 15.89$ kg, junto con el valor de los extremos del intervalo. Representa una cantidad de 1087 h (anexo 11).	53

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Estado del arte de la electrólisis

El principio fisicoquímico de la electrólisis está bien documentado y se conoce desde hace más de 200 años, siendo William Nicholson y Anthony Carlisle en 1800 los primeros en aislar los gases obtenidos durante el proceso (Md Mamoon, 2015). A lo largo del siglo XIX, la electrólisis se convirtió en un método económicamente viable para la producción de hidrógeno, gracias a las mejoras en generadores eléctricos. La obtención de hidrógeno empezó a suscitar interés a partir de 1890, cuando Charles Renard utilizó la electrolisis del agua para generar hidrógeno que se emplearía en aeronaves con fines militares. A principios del siglo XX, ya se encontraban en funcionamiento cerca de 400 electrolizadores industriales a nivel global.

Aunque a lo largo del tiempo la producción global de hidrógeno iba en aumento, no fue hasta la década de 1920 cuando la demanda de este gas creció significativamente debido a la necesidad de producir amoníaco a través del proceso Haber-Bosch, el cual se puede utilizar en la producción de fertilizantes (Godula-Jopek, 2015). A principios de 1930 surgieron distintos tipos de electrolizadores alcalinos y en la década de 1970 surgen las primeras electrólisis con membrana de intercambio de protones (PEM, por sus siglas en inglés).

Actualmente, la demanda global de hidrógeno es de más de 94 millones de toneladas, y se utiliza principalmente en refinerías (para remover impurezas) y en la industria de químicos como el amoníaco o metanol (IEA, 2022). Sin embargo, este hidrógeno es producido casi en su totalidad por combustibles fósiles (figura 1).

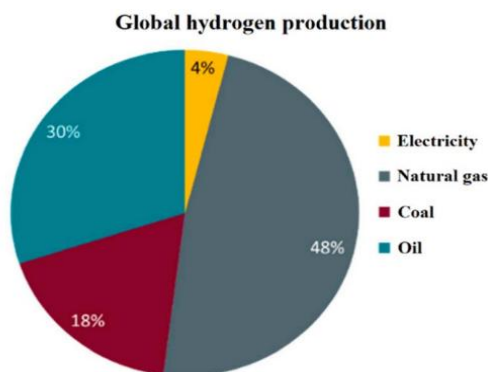


Figura 1. Porcentajes de las fuentes de producción de hidrógeno a nivel global (Le et al., 2023).

1.2 Contexto y justificación

La figura del hidrógeno está ganando relevancia en la actualidad, tanto por su figura como vector energético, de manera que tiene la capacidad de almacenar energía en sus enlaces para posteriormente ser liberada cuando se necesite; como por su utilización como combustible altamente energético y no contaminante, liberando en su combustión únicamente vapor de agua. Sin embargo, su producción se encuentra actualmente ligada a la emisión de gases contaminantes (figura 1), al ser métodos baratos y sencillos. Por ello, es necesario un mayor desarrollo e investigación en las tecnologías electrolíticas, que las permita competir o incluso reemplazar a otras formas de producción de hidrógeno.

Con el creciente interés en la descarbonización e independencia energética, la electrólisis del agua presenta una alternativa verde si se utiliza electricidad proveniente de fuentes renovables. Si este hidrógeno se destina posteriormente a su uso en forma de combustible, es posible reducir aún más las emisiones de gases de efecto invernadero en otros sectores, como en el transporte o la industria.

Además, el hidrógeno comprimido puede ser transportado por la red de gasoductos ya existente, si se realiza un reacondicionamiento adecuado en las tuberías. Al poder adaptar esta red, y no tener que desechar la existente para construir una nueva, el uso de H_2 como combustible se ve especialmente motivado para la transición energética.

La integración de energías renovables con la producción electrolítica de hidrógeno resulta de especial interés, ya que permitiría almacenar energía eléctrica en forma de energía química en los enlaces del H_2 . De esta manera, se la energía renovable que no se consuma en periodos de baja demanda sería aprovechada en la conversión de hidrógeno, que se almacenaría para su posterior uso. Esta integración es especialmente atractiva para generadores eólicos o solares que se encuentren en áreas aisladas y no puedan verter los excesos energéticos a la red fácilmente.

Por todo lo expuesto, es fundamental una mayor comprensión en el proceso de la electrólisis, estudiar su eficiencia y los parámetros que la optimizan a esta. Además, el desarrollo de distintas tecnologías electrolíticas permite que cada una de ellas se pueda especializar en un contexto específico, lo que facilita una mayor producción global de hidrógeno por este método al tener mayor flexibilidad de aplicarse en distintos entornos.

Capítulo 2. OBJETIVOS

La finalidad principal de este trabajo es explicar el funcionamiento de las celdas electrolíticas para la producción de hidrógeno. Para ello, se ahondará en los principios fisicoquímicos que rigen su reacción, así como se determinarán y cuantificarán los factores que influyen en su rendimiento. Para ello se explicará detalladamente cómo opera un electrolizador, las partes que contiene y los materiales que se utilizan en su fabricación.

Por otro lado, se explicará el funcionamiento de las principales tecnologías de celdas electrolíticas: la electrolisis alcalina (AWE), la electrolisis de membrana de intercambio de protones (PEM), las de membrana de intercambio aniónica (AEM), y las de óxidos sólidos (SOEC) que operan a altas temperaturas. Se realizará un esquema de las partes, componentes y mecanismo de actuación de cada tecnología. Por último, estas tecnologías serán comparadas y se determinarán sus puntos fuertes y débiles. Esta comparación nos servirá para determinar cuál de ellas es la mejor candidata a la operación conjunta con fuentes de energía renovables.

Este trabajo tiene el objetivo adicional de desarrollar un modelo sobre la integración de un electrolizador PEM alimentado con energía solar fotovoltaica. Este modelo estudiará la viabilidad de la integración, y se cuantificarán los parámetros necesarios para que este diseño pueda operar a una máxima eficiencia. Se explicarán las partes necesarias para el diseño y se estimará la cantidad de hidrógeno que es capaz de producir de manera autónoma. Estos resultados serán discutidos y se interpretará la robustez de sus resultados.

Para reforzar las ideas que se expresen a lo largo del trabajo, se utilizarán códigos en el lenguaje de programación de Python. Los códigos que se utilicen permitirán analizar de una manera más clara el comportamiento de la electrolisis y predecir comportamientos a través de ellos. Estos programas buscarán ser adaptables a distintos parámetros de trabajo, de manera que resulten útiles para otras personas que necesiten modelar condiciones para la electrolisis bajo distintas situaciones que las nuestras.

Capítulo 3. FUNDAMENTOS FÍSICOS

3.1 Partes de una celda electrolítica

La electrólisis del agua ocurre en el interior de una celda electrolítica. Cuando dos o varias de estas celdas se unen en serie o en paralelo para producir la reacción a una escala mayor, forman un electrolizador. Una celda electrolítica básica cuenta con dos electrodos, habitualmente separados por una membrana o diafragma, por los que circula la corriente gracias a un electrolito disuelto en el agua (figura 2).

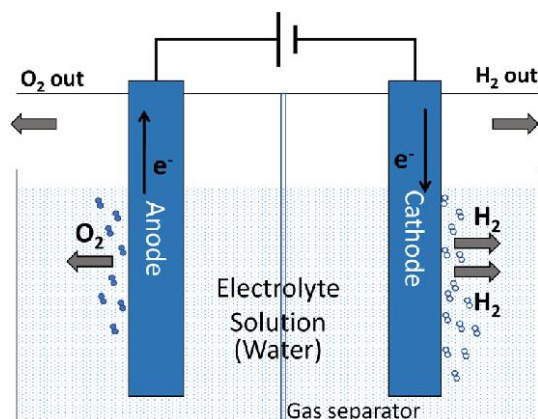
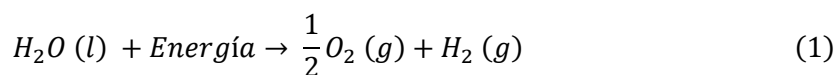


Figura 2. Esquema de las partes de una celda electrolítica, donde se muestran los electrodos, el diafragma y el electrolito (Yue et al., 2021).

Cuando el voltaje entre los dos electrodos es el adecuado la molécula del agua se rompe, siguiendo la reacción:



En los electrodos uno será el cátodo, donde se producirá hidrógeno, y el otro será el ánodo, que producirá oxígeno. Estos electrodos tienen que ser buenos conductores de la electricidad, resistentes a la corrosión y preferiblemente exhibir propiedades catalíticas de la reacción (Ursua et al., 2012). La distancia entre los electrodos también tiene que ser óptima para reducir la resistencia eléctrica del medio sin que afecte a la eficiencia (Nagai, 2003). Los mejores materiales para ser usados como electrodos son el oro y el platino, pero dado a su alto precio no es viable

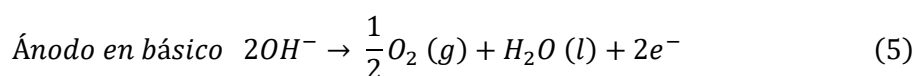
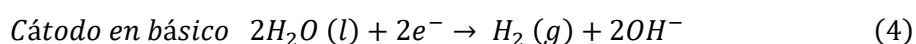
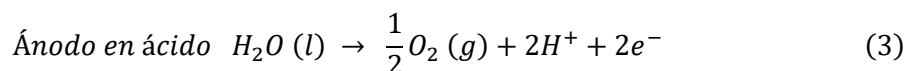
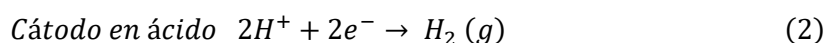
su uso a escalas industriales. En su lugar, es habitual el uso de otros metales más baratos como el níquel o el cobalto, que presentan una buena resistencia a la corrosión y estabilidad química (Mazloomi & Sulaiman, 2012).

En cuanto al electrolito, se utilizan materiales que sean poco reactivos con los electrodos. Generalmente se suelen utilizar ácidos o bases, pero para evitar que degraden a los electrodos se utilizan en bajas concentraciones, alargando la vida útil de los electrolizadores. La solución más utilizada a lo largo del tiempo ha sido la del 25-30% de KOH en agua (Mazloomi & Sulaiman, 2012).

Para evitar la recombinación de las moléculas de oxígeno e hidrógeno generadas en los electrodos, es habitual el uso de un diafragma o membrana separadora. Este diafragma debe ser permeable, poroso y tener una alta conductividad iónica, de manera que no frene el intercambio másico e iónico entre las dos partes separadas. Por otro lado, esta membrana debe tener una alta estabilidad física y química, para que no sufra cambios por el potencial eléctrico o el pH del electrolito (Mazloomi & Sulaiman, 2012). A mediados de los 90 se sugirió el asbesto como un excelente candidato para hacer estos separadores por su alta porosidad y permeabilidad, pero debido a su alta toxicidad hoy en día se utilizan otros materiales como el politetrafluoroetileno (PTFE), el sulfuro de polifenileno (PPS) o el Zirfon® (matriz porosa de polisulfona reforzada con ZrO_2) (Henkensmeier et al., 2024).

3.2 Semirreacciones redox

En las celdas electrolíticas, la molécula de agua se separa en oxígeno e hidrógeno gaseoso a través de un trabajo eléctrico que ejerce la celda sobre el agua. En este proceso, los electrones son generados o absorbidos por los iones del electrolito en la superficie de los electrodos. Las semirreacciones presentes en cada electrodo dependen de el pH del electrolito y son las siguientes (Shih et al., 2022):



Se puede comprobar que la suma de las reacciones del ánodo y el cátodo resulta en la reacción global, de acuerdo con la ecuación 1. A las reacciones 2 y 4 se las conoce como reacciones de evolución del hidrógeno (HER) y a las 3 y 5 como reacciones de evolución del oxígeno (OER).

La semirreacción de reducción ocurre en el cátodo, donde el electrodo se carga negativamente gracias a los electrones que fluyen del circuito externo. Por otro lado, la semirreacción de oxidación ocurre en el ánodo de donde fluirán electrones hacia el cátodo, cargando el ánodo positivamente (Ursua et al., 2012).

En medio ácido, los protones formados en el ánodo (OER) son solvatados formando iones H_3O^+ . Estos iones se ven atraídos por la carga negativa del cátodo, donde son reducidos a hidrógeno molecular. Desde el punto de vista másico, hay un consumo neto de moléculas de agua y una producción de O_2 en el ánodo, mientras que en el cátodo se producirá H_2 . En medio básico el proceso es semejante, pero en este caso serán los iones de OH^- los que migrarán del cátodo al ánodo (Godula-Jopek, 2015).

3.3 Termodinámica de la reacción

Si la celda electrolítica está operando a presión y temperatura constantes, la energía necesaria para que suceda la electrolisis está determinada por la variación de la entalpía de disociación de la molécula de agua (ΔH_d). Esta energía tendrá una componente de energía eléctrica, que será la correspondiente a la energía libre de Gibbs (ΔG_d), y otra de energía térmica (Q), que vendrá determinada por el producto de la variación de la entropía (ΔS_d) con la temperatura (T) de acuerdo con la ecuación 6 (W. Li et al., 2022).

$$\Delta G_d = \Delta H_d - Q = \Delta H_d - T \cdot \Delta S_d \quad (6)$$

En condiciones estándar ($T = 298 \text{ K}$, $P = 1 \text{ bar}$), la entalpía vale $\Delta H_d^\circ (H_2O (l)) = +285.840 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ y la entropía es de $\Delta S_d^\circ (H_2O (l)) = +163.15 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ de acuerdo a Godula-Jopek (2015). De esta manera, el término térmico es de $Q = +48.7 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, lo que resulta en una energía libre de Gibbs de valor $\Delta G_d^\circ (H_2O (l)) = +237.22 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Como podemos observar, la electrólisis se trata de un proceso endotérmico y no espontáneo, ya que $\Delta H_d^\circ > 0$ y $\Delta G_d^\circ > 0$ respectivamente.

Si quisiéramos ver cuanta es la tensión mínima que tenemos que aplicar entre los electrodos de una celda electrolítica ideal para conseguir que se produzca la ruptura de la molécula de agua tendremos que recurrir a la ecuación 7:

$$\Delta G_d - nFE = 0 \quad (7)$$

Donde ΔG_d° es el término obtenido de la ecuación 6 y nFE es la cantidad de electricidad para disociar un mol de agua. En concreto, n da cuenta del número de electrones intercambiados durante la reacción (2 en nuestro caso), F es la constante de Faraday, que vale $F = 96485 \text{ C/mol}$, y E es la energía eléctrica (en voltios) que hay que aplicar para que suceda la reacción. Por tanto, despejando de la ecuación 7 obtenemos la energía mínima para que se produzca la electrólisis a temperatura y presión constante (ecuación 8). A este potencial también se le conoce como voltaje reversible o poder calorífico inferior (LHV del inglés Lower Heating Value).

$$E(T, P) = \frac{\Delta G_d(T, P)}{nF} \quad (8)$$

Es decir, si aplicamos un voltaje U tal que $U(T, P) > E(T, P)$ se romperá la molécula de agua y la electrólisis no sucederá en caso contrario (Godula-Jopek, 2015). Sin embargo, al ser un proceso endotérmico se obtienen calor de los alrededores y la reacción no es capaz de sostenerse por sí misma, parando la reacción. La energía eléctrica que tendremos que aplicar al sistema para conseguir una reacción autosostenida será la que genere la misma energía térmica como calor que absorbe el sistema. Este calor surge de diferentes procesos irreversibles del sistema, como el efecto Joule en las resistencias del electrolizador. A este voltaje se le conoce como voltaje termoneutral o poder calorífico superior (HHV del inglés Higher Heating Value), y se calcula utilizando la ecuación 9.

$$V(T, P) = \frac{\Delta H_d(T, P)}{nF} \quad (9)$$

Según el voltaje que se esté aplicando a la celda (U) y su relación con el voltaje reversible y termoneutral (E y V respectivamente), la electrólisis sucederá en distintos escenarios:

- Cuando $U(T, P) = V(T, P)$ el electrolizador genera el calor que consume, y por tanto se encuentra en una situación termoneutral.
- Si $V(T, P) > U(T, P) > E(T, P)$ la celda absorbe el calor del entorno (electrólisis endotérmica), actuando como un refrigerador.
- Si $U(T, P) > V(T, P)$ la celda genera calor en exceso, que tendrá que ser disipado para trabajar en condiciones isotermas (W. Li et al., 2022).

En condiciones estándar estos potenciales tienen los siguientes valores:

$$E^{\circ} = \frac{\Delta G_d^{\circ}}{nF} = \frac{237220}{2 \cdot 96485} = 1.2293 \text{ V} \approx 1.23 \text{ V} \quad (10)$$

$$V^{\circ} = \frac{\Delta H_d^{\circ}}{nF} = \frac{285840}{2 \cdot 96485} = 1.4813 \text{ V} \approx 1.48 \text{ V} \quad (11)$$

Hay que tener en cuenta que los valores de estos potenciales solo son aplicables a celdas ideales. En las celdas reales el voltaje aplicado suele ser mayor al voltaje termoneutral, ya que habrá irreversibilidades termodinámicas (como corrientes parásitas o sobrevoltajes) que exigirán el consumo tanto de energía térmica como eléctrica. Además, un sistema real no es perfectamente adiabático, luego tendremos pérdidas por fenómenos de radiación y convección (Ursua et al., 2012). De esta manera, se puede definir un nuevo potencial que dé cuenta de estas pérdidas energéticas en celdas reales (ecuación 12):

$$U = E_{rev} + V_{irrev} = E + V_{ohm} + V_{act} + V_{con} \quad (12)$$

En esta nueva ecuación, U representa la energía (en voltios) que tendremos que aplicar, E_{rev} es la energía que tendríamos que aplicar si el proceso fuese completamente reversible (la misma que la de la ecuación 8) y V_{irrev} da cuenta del sobrepotencial que tendremos que aplicar por culpa de las pérdidas irreversibles. Las pérdidas más significativas son las causadas por pérdidas óhmicas (V_{ohm}) y por sobrevoltajes de activación (V_{act}) y concentración (V_{con}).

Las pérdidas óhmicas son causadas por la resistencia que tienen los propios elementos del circuito de la celda al flujo de electrones (R_c), como los electrodos o los colectores de corriente; o la resistencia al flujo de iones, como los que puede haber en el electrolito (R_e), en la membrana (R_m), o en las burbujas de gas (R_b) que se encuentran en la disolución (M. Wang et al., 2014). Estas pérdidas óhmicas demandarán más voltaje a medida que se incremente la corriente en circulación, de acuerdo con la ley de Ohm (Santos et al., 2021)

$$V_{ohm} = I \cdot R_{total} \quad (13)$$

$$\Sigma R = R_{total} = R_e + R_m + R_b + R_c \quad (14)$$

El sobrevoltaje de activación da cuenta de la energía que demandan los electrodos para realizar transferencias de carga. Este término depende de la cinética de la reacción en los electrodos, y será menor si estos están hechos con materiales catalíticos. Las reacciones OER son mucho más lentas que las HER, lo que se traduce en un sobrevoltaje de activación mayor en el ánodo que

en el cátodo. Este tipo de voltaje aumenta logarítmicamente a medida que la intensidad aumenta (González Rodríguez, s. f.), de acuerdo a la ecuación de Tafel (ecuación 15).

$$V_{act} = a + b \cdot \log J = a + b \cdot \log \frac{I}{A} \quad (15)$$

Donde J es la densidad de corriente, \log se refiere al logaritmo natural, A es el área del electrodo y los parámetros a y b son las constantes de Tafel, que dependen de la temperatura y del material con el que estén contruidos los electrodos. La constante a es el valor del sobrepotencial cuando la densidad de corriente vale uno, y nos aporta información sobre las propiedades intrínsecas y estructurales de los electrodos, mientras que b es conocida como la pendiente de Tafel (M. Wang et al., 2014). Escribiendo el valor de estas constantes y sustituyendo en la ecuación 15 obtenemos la siguiente expresión:

$$a = -b \cdot \log j_0 \quad ; \quad b = -\frac{2.3 \cdot RT}{\alpha F} \quad (16)$$

$$V_{act} = \frac{2.3 \cdot RT}{\alpha F} \cdot \log \frac{J}{j_0} \quad (17)$$

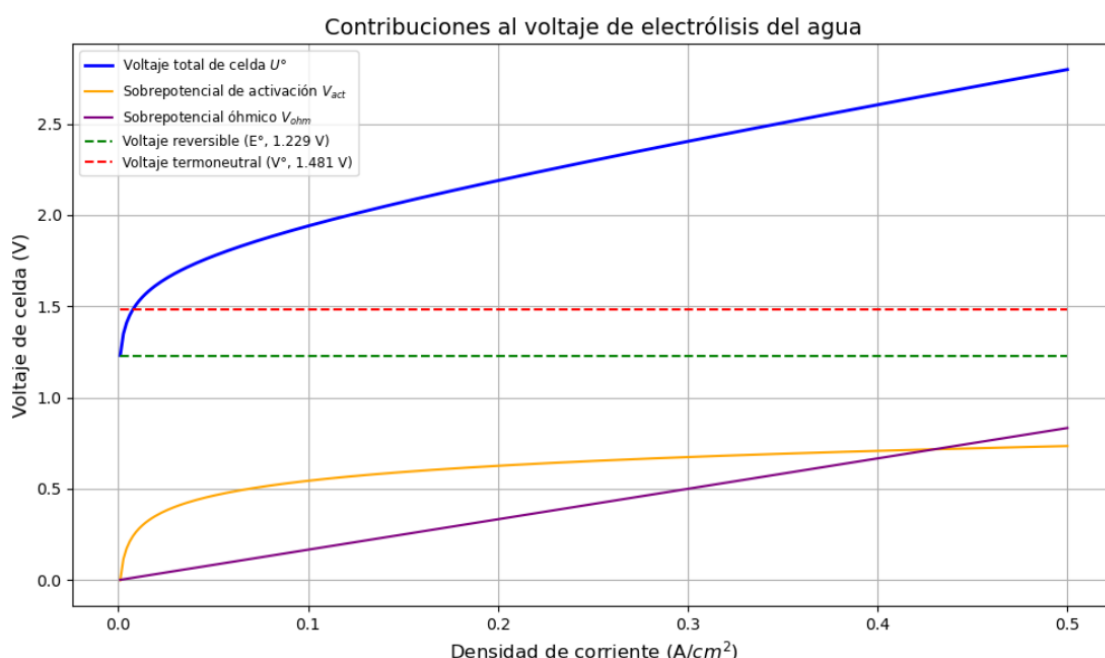
Donde R es la constante de los gases ideales y T la temperatura absoluta (en Kelvin). El coeficiente de transferencia catódico o anódico, α , es la fracción del sobrepotencial que reduce la barrera cinética de la reacción en los electrodos. La densidad de corriente de intercambio, j_0 , nos indica cual es la densidad de corriente cuando no hay ningún sobrepotencial aplicado, y da una medida de la velocidad de la reacción en equilibrio (Santos et al., 2021).

Por último, el sobrevoltaje de concentración está relacionado con el gradiente de concentración de las especies reactivas en las cercanías del electrodo, y esta causado por fenómenos de transporte de masa, como la convección o la difusión. Un transporte de especies limitado produce que se acumulen productos o que falten reactivos en la superficie del electrodo (Ross et al., 2025). Por ejemplo, una acumulación de H_2 en el cátodo puede disminuir la superficie del electrodo, ralentizando la reacción. Generalmente este sobrepotencial es de una magnitud mucho menor que el de activación y las pérdidas óhmicas, pudiéndose despreciar.

Una vez halladas las dependencias de los sobrepotenciales, podemos reescribir la ecuación 12 en función de la corriente, sustituyendo con la ecuación 13 y 17.

$$U = E + I \cdot R_{total} + \frac{2.3 \cdot RT}{\alpha F} \cdot \log \frac{J}{j_0} \quad (18)$$

Esta ecuación la podemos representar gráficamente para ver la dependencia de U con la densidad de corriente aplicada (suponemos 1 cm^2), así como la magnitud de los sobrepotenciales, junto con el potencial reversible y el potencial termoneutral. Para representarla, se fijó el valor de α en 0.5, y la conductividad en 0.3 S/cm , los cuales son valores típicos para estas variables; y se utilizaron condiciones estándar de presión y temperatura (Gráfica 1).



Gráfica 1. Voltaje total aplicado a la celda electrolítica en función de la densidad de corriente. Además, están representados las contribuciones de los sobrepotenciales, junto con los valores fijos del voltaje reversible y termoneutral en condiciones estándar (Anexo 1).

En la gráfica 1 podemos observar como a densidades de corriente bajas, la barrera del sobrepotencial de activación es más grande que la óhmica, mientras que a densidades de corriente altas la óhmica se vuelve más significativa. Además, podemos apreciar la dependencia lineal y logarítmica de cada una de ellas. Esta gráfica obtenida queda de acuerdo con otras referencias bibliográficas como las obtenidas por Luo et al. (2024) o por Givirovskiy et al. (2019).

3.4 Eficiencia energética

A la hora de escalar la producción de hidrógeno a niveles industriales es necesaria una medida de la eficiencia del proceso. Se pueden realizar distintos cálculos para calcular lo óptima que ha sido la reacción. En general se suele calcular como la fracción de energía que se ha empleado en dividir un mol de agua frente a la energía teórica que conlleva. Esta eficiencia se suele denominar eficiencia térmica o termo-neutra, y se calcula a través de la ecuación 19 (Godula-Jopek, 2015):

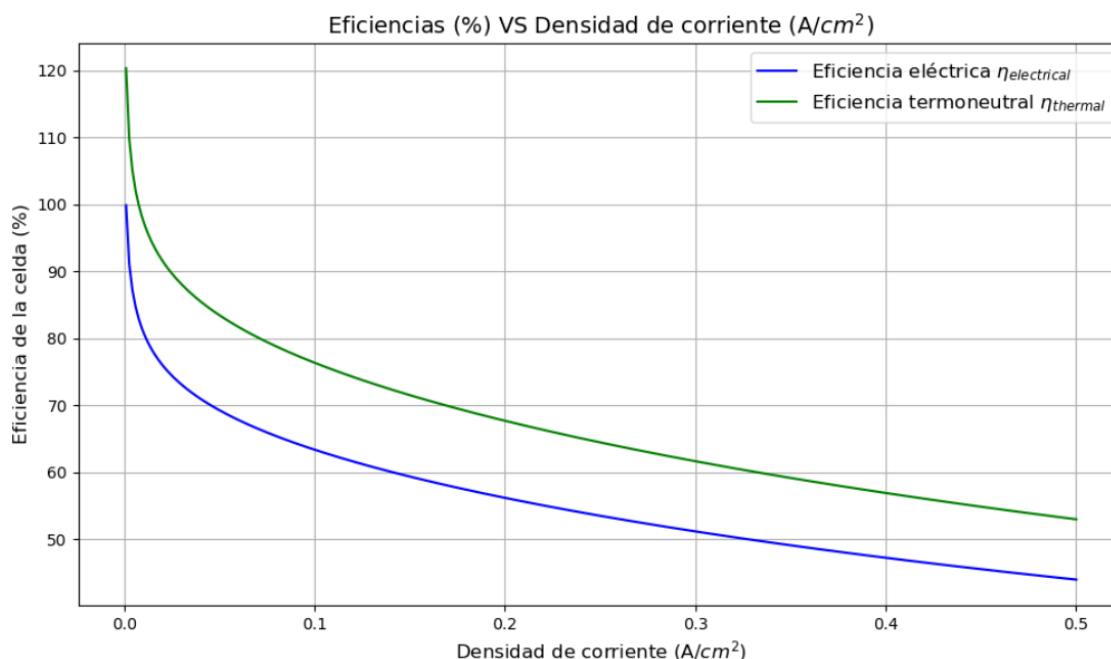
$$\eta_{thermal} = \frac{W_{ideal,\Delta H}}{W_{real}} = \frac{V_{ideal} \cdot I \cdot t}{U_{aplicado} \cdot I \cdot t} = \frac{V}{U} \quad (19)$$

Donde U es la energía en voltios aplicada, I es la corriente en amperios, t es el tiempo en segundos y V es el potencial termoneutral obtenido de la ecuación 8. En caso de que nos interese saber que parte de la energía que hemos aplicado se ha destinado exclusivamente en energía eléctrica para la hidrólisis, la eficiencia se calcularía de la siguiente forma:

$$\eta_{electrical} = \frac{W_{ideal,\Delta G}}{W_{real}} = \frac{E}{U} \quad (20)$$

Donde hemos sustituido la entalpía por la energía libre de Gibbs, quedándonos el término de E obtenido de la ecuación 8. Estas eficiencias suelen ser cercanas al 100% si se trabaja con densidades de corriente bajas. Puede darse el caso de que la eficiencia térmica supere el 100% si la celda funciona de manera endotérmica, obteniendo el calor que necesita de sus alrededores (Zeng & Zhang, 2010).

De manera representativa, podemos graficar ambas funciones en función de la densidad de corriente que hemos aplicado, ya que esta nos dará un valor de U. Imponiendo las mismas condiciones que habíamos utilizado para la gráfica 1 representamos la ecuación 19 y 20 frente a la densidad de corriente (Gráfica 2):



Gráfica 2. Eficiencia eléctrica y termoneutral en función de la densidad de corriente aplicada (Anexo 2)

Con esta gráfica se puede apreciar la fuerte relación que tiene la densidad de corriente con la eficiencia, consiguiendo unas eficiencias altas cuanto menor es la densidad de corriente, de acuerdo con S. Luo et al. (2024). Como se puede apreciar, ambas funciones son la misma pero desplazadas, esto se debe al hecho de ser la misma gráfica, pero el factor V de la ecuación 19 tiene 0.25 V más que el factor E de la ecuación 20 en condiciones estándar. Además, cabe mencionar la eficiencia mayor al 100% de la curva termoneutral a densidades de corriente bajas, al estar la celda en esta parte de la función absorbiendo energía calorífica externa y ser por tanto V mayor que U , como explicamos anteriormente.

Por último, una buena forma de poder comparar los diferentes tipos de celdas electrolíticas es evaluar cuánto hidrógeno ha producido en función de cuanta energía se ha aplicado. Para ello se define una nueva eficiencia proporcional a la velocidad con la que se produce el hidrógeno:

$$\eta_{H_2} = \frac{\frac{dn_{H_2}}{dt} \cdot \Delta H}{W_{real}} = \frac{\dot{n}_{H_2} \Delta H}{U \cdot I \cdot t} \quad (21)$$

Donde el término \dot{n}_{H_2} da cuenta de la velocidad a la que se producen los moles de hidrógeno para un tiempo dt . Con esta eficiencia podemos comprobar cuanta energía eléctrica se invierte en la producción de un mol de hidrógeno (Lamy & Millet, 2020).

Capítulo 4. Influencia de T y P

4.1 Influencia de la temperatura

Los parámetros termodinámicos utilizados hasta ahora (ΔG , ΔH , ΔS) varían en función de la temperatura empleada. La variación de estos parámetros influye en el LHV y HHV, como se puede ver en la ecuación 8 y 9, lo que afecta directamente a la eficiencia obtenida en las celdas. Un aumento de la temperatura supone una mayor cinética de la reacción y puede suponer una disminución de las pérdidas eléctricas del sistema. Además, una mayor temperatura implica una menor energía para disociar la molécula de agua, es decir, una menor energía libre de Gibbs. Por tanto, el diseño de los electrolizadores a una temperatura óptima resulta en una mayor producción de hidrógeno con una menor cantidad de energía.

En concreto, el potencial reversible se ve fuertemente influenciado por las variaciones de temperatura. Esta relación la podemos obtener a través de la ecuación de Gibbs – Helmholtz, que relaciona la variación de la energía libre de Gibbs en función de la temperatura (a presión constante de 1 atm) con la entalpía (ecuación 22).

$$\left(\frac{\partial \left(\frac{G}{T}\right)}{\partial T}\right)_P = -\frac{H}{T^2} \quad (22)$$

Si en esta ecuación sustituimos G y H utilizando las definiciones del poder calorífico inferior y e superior (ecuación 8 y 9 respectivamente) se obtiene la ecuación 23.

$$\left(\frac{\partial \left(\frac{E}{T}\right)}{\partial T}\right)_P = -\frac{V}{T^2} \quad (23)$$

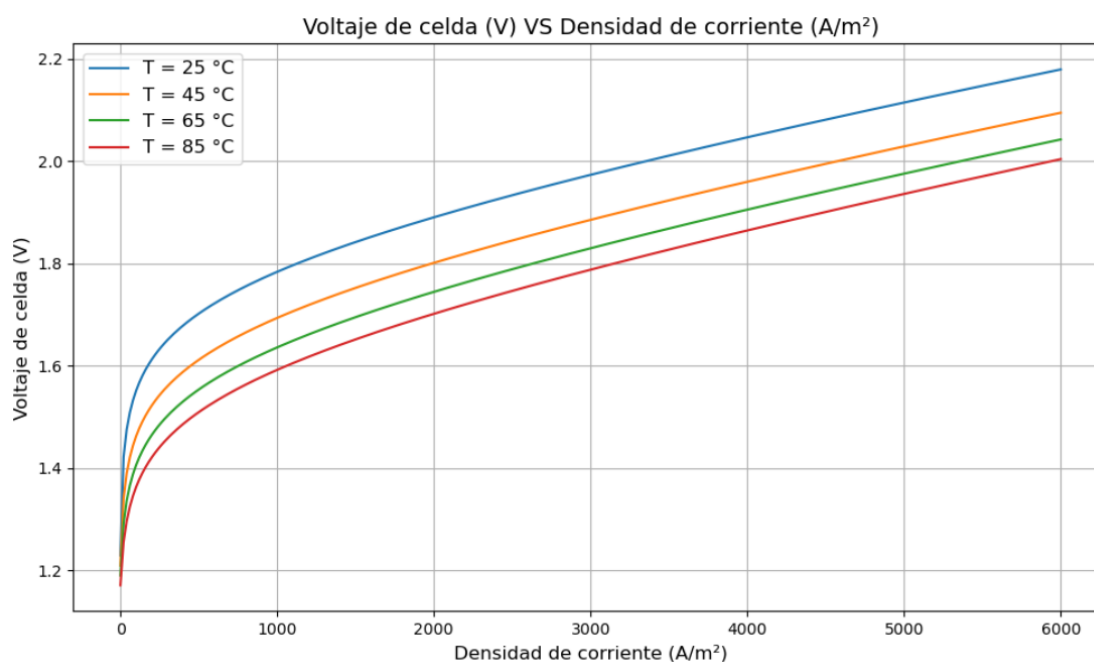
Haciendo uso de la relación empírica de V con T (en Kelvin) obtenida por Hammoudi et al. (2012) podemos integrar ambos términos y despejar el potencial reversible para que quede relacionado con la temperatura (ecuación 24).

$$E_{rev} = 1.50342 - 9.956 \cdot 10^{-4} T + 2.5 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (24)$$

Por otro lado, las pérdidas energéticas irreversibles también se ven afectadas por variaciones en la temperatura. Uno de los modelos más representativos que permite observar la relación de estos sobrepotenciales con la temperatura (en Celsius) fue desarrollado por Ulleberg (2003). En su trabajo utiliza principios termodinámicos y relaciones semiempíricas de electroquímica para cuantificar esta influencia térmica a los sobrepotenciales óhmicos y de activación (ecuación 25).

$$U_{tot} = E_{rev} + j (r_1 + r_2 T) + s \cdot \log \left(\left(t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_2}{T^2} \right) j + 1 \right) \quad (25)$$

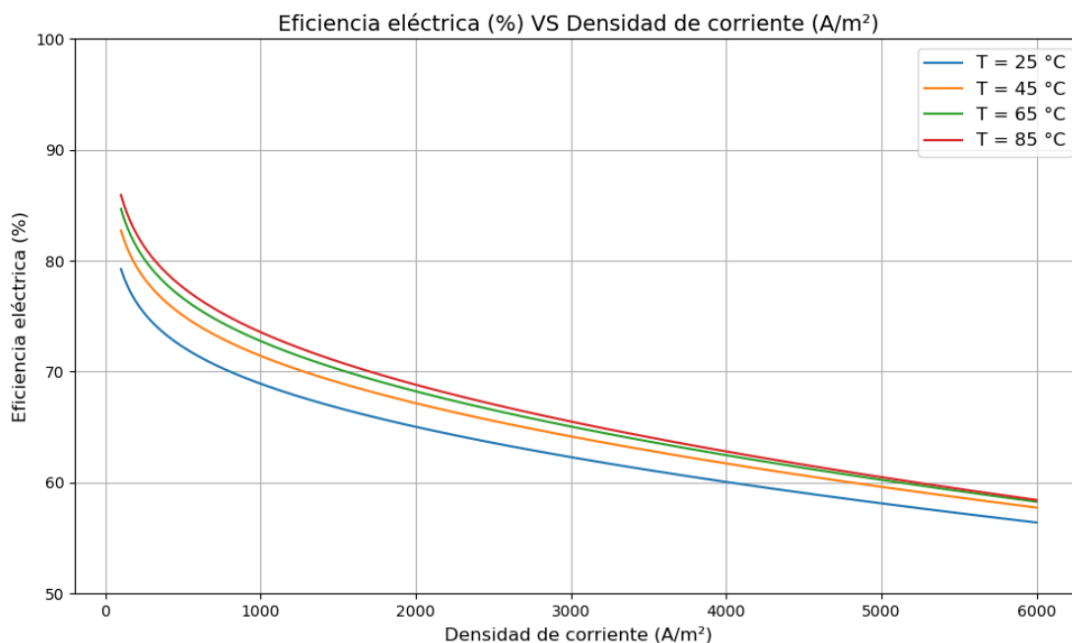
En esta ecuación el segundo término es el correspondiente a las pérdidas óhmicas y el segundo a las de activación. Las “r” de la ecuación son parámetros relacionados con pérdidas óhmicas, mientras que la “s” y las “t” están relacionadas con el coeficiente de sobretensión en los electrodos. La ecuación 25 la representaremos gráficamente para visualizar la influencia de la temperatura en el voltaje total que hay que aplicar en la electrólisis. Los valores de las constantes las obtendremos del ajuste hecho por Luo et al. (2024).



Gráfica 3. Voltaje total en función de la densidad de corriente, representado a distintas temperaturas (anexo 3).

En esta gráfica se observa cómo para una misma densidad de corriente el voltaje total al que hemos tenido que aplicar la celda es menor conforme aumentamos la temperatura. Esto quiere decir que tanto el voltaje reversible como las pérdidas irreversibles han disminuido, lo que conlleva una mejora en la eficiencia de la celda al situarnos más próximos a el voltaje

termoneutral (ecuación 19). Esta mejora de la eficiencia la representaremos en el gráfico 4, sustituyendo en la ecuación 19 con el voltaje total de la celda obtenido en la ecuación 25 y con el voltaje reversible de la ecuación 24.



Gráfica 4. Eficiencia eléctrica en función de la densidad de corriente a distintas temperaturas (anexo 4).

En esta gráfica se observa como la eficiencia a la misma densidad de corriente es mayor a temperaturas más altas. Sin embargo, esta diferencia de eficiencias decrece a medida que aumentan las temperaturas y corrientes.

Aunque teóricamente una mayor temperatura conlleve un aumento de eficiencia, esta temperatura no puede perjudicar el resto de los elementos de la celda, ya que puede dañar su estructura o disminuir su durabilidad. Por este motivo, cada tipo de electrólisis tiene asociado un rango de temperaturas donde la eficiencia es óptima.

4.2 Influencia de la presión

La presión en la que se produce la electrólisis también afecta a cómo se produce este proceso, y, por tanto, en la eficiencia que se puede conseguir. Aunque el impacto de la presión en los electrolizadores no es tan significativo como puede suponer un aumento de temperatura, esta aporta sus propios beneficios. El principal interés que genera la electrólisis a presiones más altas

que la atmosférica está en la obtención directa de hidrógeno comprimido. Esto permite, no sólo el almacenamiento de una mayor cantidad de H_2 en un mismo volumen, sino que también abre la puerta a un uso directo de este, sin necesidad de que sea transportado a plantas de compresión para ser enviado posteriormente a donde se necesite, lo que reduce el coste energético global de la producción y uso de este gas.

De las diversas variables termodinámicas características de la electrólisis que hemos estudiado, la que tiene una dependencia mayor con la temperatura es el voltaje reversible (E_{rev}). Esta dependencia con la presión la podemos escribir de manera diferencial y a temperatura constante de la siguiente manera (ecuación 26).

$$\left(\frac{\partial E}{\partial P}\right)_T = \frac{1}{nF} \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial P}\right)_T = \frac{\Delta \bar{V}}{nF} \quad (26)$$

Donde el término $\Delta \bar{V}$ hace referencia al cambio de volumen molar producido por el aumento de la presión. Considerando prácticamente incompresibles las fases líquidas (el agua de la reacción), podemos escribir este término únicamente considerando los elementos gaseosos (H_2 y O_2). Cuando no se trabaja a presiones muy elevadas, el comportamiento de estos gases se ajusta adecuadamente al modelo del gas ideal. De esta manera el término $\Delta \bar{V}$ lo podemos escribir en función de las presiones parciales de todos los gases que intervienen en la reacción (ecuación 27).

$$\Delta \bar{V} = \sum_i \nu_i \frac{RT}{p_i} = \frac{RT}{p_{H_2}} + \frac{1}{2} \frac{RT}{p_{O_2}} \quad (27)$$

Donde ν_i es el factor estequiométrico de cada gas y p_i representa su presión parcial. Sustituyendo la ecuación 27 en la 26 obtenemos la siguiente expresión:

$$\left(\frac{\partial E}{\partial P}\right)_T = \sum_i \nu_i \frac{RT}{nF p_i} \equiv \sum_i \left(\frac{\partial E}{\partial p_i}\right)_T \quad (28)$$

Integrando la ecuación 28 y aplicándola a nuestra reacción nos queda la siguiente ecuación:

$$E = E^\circ + \sum_i \nu_i \left(\frac{RT}{nF}\right) \log\left(\frac{p_i}{p^\circ}\right) = E^\circ + \frac{RT}{2F} \log\left(\frac{p_{H_2}}{p^\circ} \sqrt{\frac{p_{O_2}}{p^\circ}}\right) \quad (29)$$

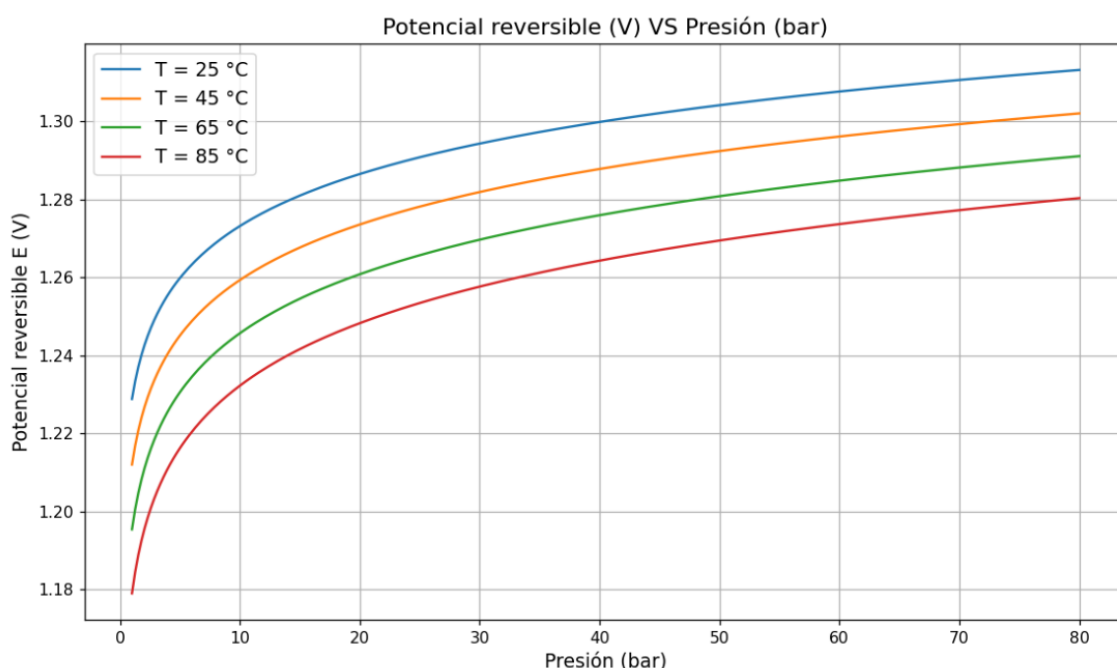
El valor de E° es el correspondiente al valor del voltaje reversible a presión y temperatura estándar ($T = 298 \text{ K}$, $P = 1 \text{ bar}$), y p° representa la presión estándar. Habitualmente, los gases generados en los electrodos se producen a la misma presión controlada, y por tanto se suele aproximar $p_{\text{H}_2} = p_{\text{O}_2} = P$. De esta manera se puede simplificar la ecuación 29.

$$E_{rev} = E^\circ + \frac{3RT}{4F} \log(P) \quad (30)$$

Esta ecuación implica un aumento logarítmico del voltaje reversible para aumentos de presión (Godula-Jopek, 2015). Si por último quisiésemos tener en cuenta la contribución simultánea de la presión y la temperatura en el voltaje reversible, podemos sustituir la expresión semiempírica de la ecuación 24 en la ecuación recién obtenida, resultando en la siguiente expresión:

$$E_{rev} = 1.50342 - 9.956 \cdot 10^{-4} T + 2.5 \cdot 10^{-7} T^2 + \frac{3RT}{4F} \log(P) \quad (31)$$

En esta ecuación, el último término da cuenta de la relación con la presión y los primeros con la temperatura. Nótese que sustituyendo con P y T estándar el voltaje reversible obtenido es exactamente $E = E^\circ$. En la gráfica 5 se ha mostrado este aumento de E en función de la presión para distintas curvas isoterma, haciendo uso de esta ecuación.



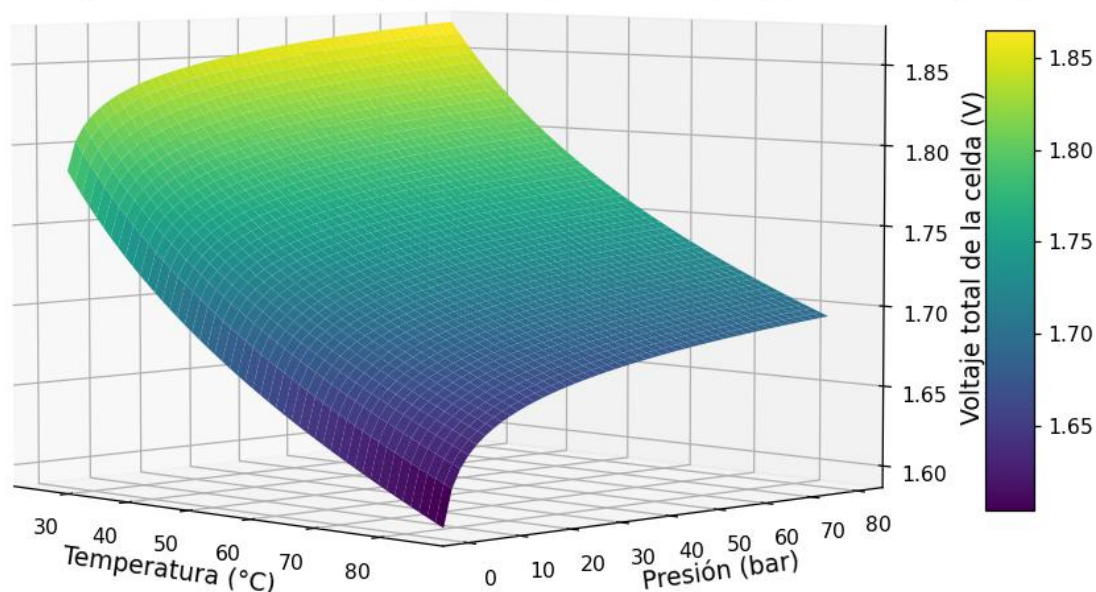
Gráfica 5. Potencial reversible en función de la presión de operación, para distintas curvas isoterma (anexo 5).

A primera vista, pudiera parecer que este aumento de presión es contraproducente, ya que supone un aumento del voltaje reversible, que implica una mayor energía eléctrica para que se produzca la electrólisis, reduciendo así la eficiencia de esta (ecuación 20). Sin embargo, experimentalmente se ha observado que trabajando a presiones mayores la energía total necesaria para que se diera la electrólisis (ecuación 12) se veía incrementada, pero en menor medida que la esperada por la ecuación 30. Esto quiere decir que las pérdidas irreversibles se reducían para dar cuenta de esa diferencia experimental. A presiones más altas se ha observado como la cinética de la reacción aumentaba, mientras que las burbujas disueltas disminuyen su tamaño, lo que puede mejorar el transporte de masa (Suermann et al., 2016). Por otra parte, la resistencia óhmica también se ve ligeramente reducida a presiones mayores (J. Smith, 2021). Aunque esta reducción de los potenciales irreversibles no consigue compensar el aumento en el reversible, sí que hacen más atractivo trabajar a mayores presiones aun necesitando una mayor energía con el objetivo de obtener el hidrógeno directamente comprimido.

4.3 Influencia conjunta de P y T

Para finalizar este capítulo, se ha añadido la gráfica 6, que ilustra como afecta la presión y temperatura simultáneamente en el voltaje total aplicado a la celda. Para realizarse, se hizo uso de la ecuación 25 sustituyendo el valor del voltaje reversible de la ecuación 31, utilizando los valores de las constantes obtenidos del ajuste de Luo et al. (2024). Para graficar la ecuación, se fijó el valor de la densidad de corriente en 1000 A/m^2 .

Voltaje total de celda (V) vs Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y Presión (bar)



Gráfica 6. Influencia simultánea de P y T en voltaje total U, para una densidad de corriente de 1000 A/m^2 (anexo 6).

Al ser una figura tridimensional, se puede rotar la gráfica una vez ejecutado el código (anexo 6), en caso de que nos interese visualizar una región en concreto. A fin de poder calcular el voltaje total necesario para la electrólisis a una presión y temperatura concretas, sin necesidad de escribir la totalidad de la ecuación 25 con el voltaje reversible de la ecuación 31 sustituido en esta, se proporcionará un programa que lo calcule directamente (anexo 7).

El programa tiene fijados un área del electrodo de 1 m^2 y una corriente de 1000 A , los cuales se pueden cambiar en caso de querer adaptarlo a unos valores concretos. Al ejecutar el programa, se nos pedirá que introduzcamos manualmente los valores de interés de presión (en bar) y temperatura (en °C). Con estos datos se calculará el voltaje reversible y las pérdidas óhmicas y de activación. Estos voltajes serán impresos por pantalla, junto con la suma de todos ellos, que representa el voltaje total que hay que aplicar para esos valores de T y P. Para confirmar su validez, se puede comprobar que, si se introducen condiciones estándar, se obtiene el voltaje reversible de la ecuación 9. Además, el programa nos indica que en estas condiciones habrá que suministrar un sobrepotencial de 0.0497 V para dar cuenta de las pérdidas óhmicas y otro sobrepotencial de 0.5049 V para las de activación. La suma de estos resultados es el voltaje total que nos dará el programa, y en este caso es de 1.7834 V .

En la gráfica 6 se puede observar el aumento logarítmico que tienen los incrementos de la presión sobre U total y como los aumentos de temperatura reducen este voltaje. De esta manera, es posible compensar el sobrecoste energético que implica el aumento de P con un aumento simultáneo de temperatura. De forma matemática se puede escribir

$$U(P_1, T_1) = U(P_2, T_2) = cte \quad (32)$$

$$U(P, T) = E_{rev} + \frac{3RT}{4F} \log(P) + I(r_1 + r_2T) + s \cdot \log\left(\left(t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_2}{T^2}\right)I + 1\right) \quad (33)$$

Donde E_{rev} es la expresión semiempírica de la ecuación 24. Para poder determinar qué cambio de temperatura es necesario para compensar determinado cambio de presión tendremos que derivar la expresión 33 en función de los dos parámetros de los que depende, imponiendo la ecuación 32 para que la derivada se anule.

$$\frac{\partial U}{\partial P} dP + \frac{\partial U}{\partial T} dT = 0 \Rightarrow \frac{dT}{dP} = -\frac{\partial U / \partial P}{\partial U / \partial T} \quad (34)$$

Derivando U sobre P y T obtenemos el numerador y denominador de la fracción:

$$\frac{\partial U}{\partial P} = \frac{3RT_K}{4FP} \quad (35)$$

$$\frac{\partial U}{\partial T} = -9.956 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 2.5 \cdot 10^{-7} \cdot T + \frac{3R}{4F} \log(P) + Ir_2 - \frac{sI \left(\frac{t_2}{T^2} + \frac{2t_3}{T^3} \right)}{\left(t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2} \right) I + 1} \quad (36)$$

Por tanto, reescribimos la ecuación 34 con los resultados obtenidos en la 35 y 36.

$$\frac{dT}{dP} = \frac{\frac{3R(T + 273.15)}{4FP}}{9.956 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-7} \cdot T - \frac{3R}{4F} \log(P) - Ir_2 + \frac{sI \left(\frac{t_2}{T^2} + \frac{2t_3}{T^3} \right)}{\left(t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2} \right) I + 1}} \quad (37)$$

Esta ecuación nos proporciona el cambio de la temperatura asociado a una variación infinitesimal de la presión. Como nos interesa la diferencia de temperaturas que compensa un aumento grande de presiones (no se puede asumir una variación infinitesimal), se puede considerar el sumatorio de las variaciones térmicas que producen un número n de pequeños intervalos de presión (ecuación 38).

$$\Delta T_{total} = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{dT}{dP} \right)_{P_i, T_i} \cdot \Delta P \right) \quad (38)$$

$$\Delta P = \frac{P_{final} - P_{inicial}}{n} \quad (39)$$

Esta ecuación es una aproximación a la integral para un número lo suficientemente alto de pasos (n). Es conveniente que el valor de n aumente para grandes diferencias de presión. Para hacer un cálculo numérico, se ha diseñado un programa (anexo 8) que pide que se introduzca por teclado la presión inicial y final (en bares) entre las que realizar el cálculo (a densidad de corriente constante de 1000 A/m²), además de la temperatura inicial (en Celsius). Como "output", el programa diseñado escribe que cambio de temperatura se tendría que aplicar para compensar ese cambio de presión, dándote también la diferencia entre la temperatura inicial y final. Además, para comprobar la similitud de la aproximación (y por tanto saber si es necesario un número de intervalos mayor o no), el programa calcula de manera independiente el voltaje total de operación a la presión y temperatura iniciales (pedidas por teclado) y el voltaje a la presión final con la temperatura de compensación calculada. El programa te muestra la diferencia que hay entre ambas y el índice de similitud en forma de porcentaje.

Para mostrar los valores que se pueden obtener con el código (anexo 8), se introdujeron valores estándar de P y T y se pidió que calculase cuál debería ser el aumento de temperatura para que el potencial de la celda no se viese alterado si la presión aumentaba hasta 80 bares. Como resultado se obtuvo que la temperatura debería aumentar hasta los 48.31 °C (un aumento de temperatura de 23.31 °C). Para las condiciones estándar y una densidad de corriente de 1000 A/cm², el programa calculó que el voltaje de la celda sería de 1.78339 V, mientras que el de la celda a 80 bares a la temperatura calculada es de 1.77654 V, lo que supone una diferencia entre ambos de 0.00685 V, lo que significa que la temperatura calculada era una aproximación del 99.61588 %. Este programa se ejecutó de manera ilustrativa con un número de intervalos de n=100, pero un número de pasos más alto conlleva un mayor índice de aproximación.

Capítulo 5. TIPOS DE CELDA ELECTROLÍTICA

A pesar de haber explicado el funcionamiento básico de la electrólisis, esta puede llevarse a cabo a través de diferentes electrolizadores, que varían en función de los materiales utilizados, el tipo de membrana, el electrolito o las condiciones de presión y temperatura aplicados. En función de cómo esté configurada cada celda, obtendremos diversos electrolizadores, cada uno con sus características concretas que afectaran a su rendimiento, rango de aplicación o su viabilidad tanto tecnológica como económica.

La necesidad de producir hidrógeno de manera eléctrica y limpia en diversos contextos energéticos ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías para la electrólisis, desde laboratorios de investigación hasta instalaciones industriales. De esta manera, hoy en día contamos con diversos electrolizadores, como puede ser la ya mencionada y bien establecida electrólisis alcalina, hasta otras más novedosas y emergentes, como la electrólisis de membranas aniónicas (AEM), la que utiliza electrolizadores de alta temperatura (SOEC) o la de membrana de transporte de protones (PEM).

En el transcurso de este capítulo, se presentarán los tipos de celdas electrolíticas más relevantes en la actualidad, se describirá su funcionamiento y las diferencias que poseen para hacerlas características. Se compararán las distintas celdas y se explicarán sus ventajas y limitaciones, como puede ser su eficiencia o sus condiciones de operación o su viabilidad económica.

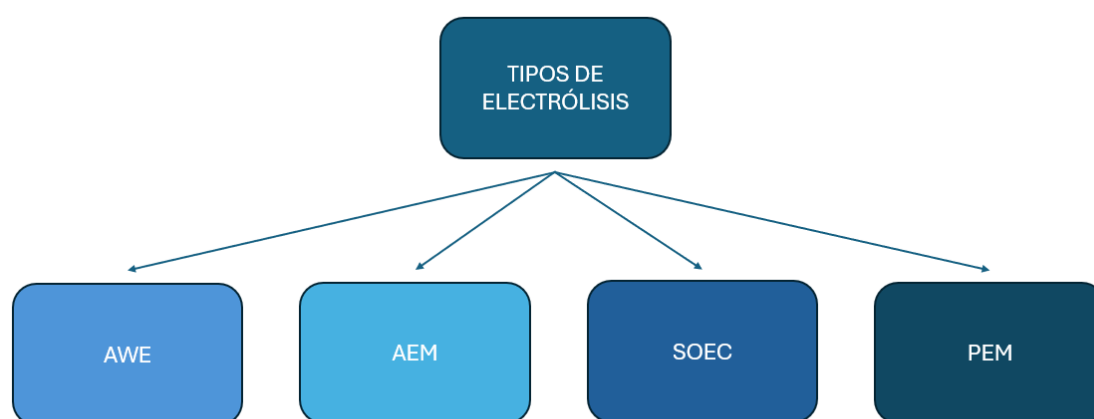


Figura 3. Tipos de electrólisis explicados a lo largo del documento

5.1 Electrólisis alcalina (AWE)

Este tipo de electrólisis (Alkaline Water Electrolysis, AWE) es la tecnología más antigua y consolidada para la ruptura de la molécula de agua. Al ser la primera en ser descubierta, es en la que está basada el capítulo anterior, aunque la mayoría de sus conclusiones son extrapolables al resto de celdas. Al haber sido ya explicado su funcionamiento y componentes, no nos pararemos tanto en explicarla.

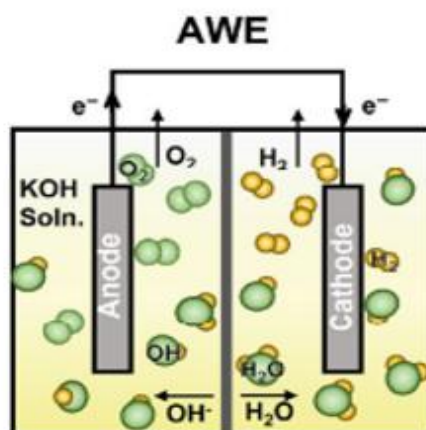


Figura 4. Esquema de celda de electrólisis alcalina (AWE) (K. Zhang et al., 2022).

Como ya hemos visto antes, en este tipo de electrólisis se encuentran los electrodos (generalmente de Ni o de acero) inmersos en una disolución de KOH o NaCl al 20% o 40% en peso. Estos dos electrodos se encuentran separados por una membrana porosa (usualmente Zirfon®) para que los gases producidos no se mezclen, pero si se produzca transporte iónico. Aunque puede operar en condiciones estándar, a nivel comercial este tipo de hidrólisis se suele dar a temperaturas más elevadas (entre 60 y 90 °C), pero sin superar la temperatura de ebullición del agua; mientras que su rango de presiones oscila entre los 25 y 30 bares (Md Mamoon, 2015).

Este tipo de celda suele operar a densidades de corriente bajas, de hasta 0.45 A/cm², y es habitual que presenten eficiencias de entre el 60 y el 70%, en función del poder calorífico superior dado por la ecuación 9 (Cai et al., 2023). Esta eficiencia eléctrica equivale a un consumo eléctrico de entre 4.5 y 5.5 kWh por cada Nm³ de H₂, que es un metro cubico de H₂ normalizado, es decir, lo que ocupa ese gas a presión y temperaturas normales (T. Wang et al., 2022). Estas celdas operan típicamente en un rango de voltaje de entre los 1.8 y 2.4 V, al tener que dar cuenta de las pérdidas irreversibles del sistema (Qureshi et al., 2023)

Estos electrolizadores tienen la ventaja de ser una tecnología madura y asentada, conocida desde hace más de 100 años. Esto ha permitido abaratar el coste de su producción, reemplazando catalizadores nobles por otros más baratos, y que tenga una amplia aplicabilidad comercial (Martín Martín, 2023). Además, tiene una alta estabilidad operativa, lo que se traduce en un mayor vida útil, pudiendo operar entre 60000 y 120000 h (Cai et al., 2023).

Sin embargo, el cruce de gases en la disolución hace que la pureza de hidrógeno no sea tan alta en comparación con otras tecnologías, aunque se pueden conseguir purezas del 99.5% (Cai et al., 2023). Por otro lado, este tipo de electrólisis solo opera a densidades de corriente bajas, de menos de 0.45 A/cm^2 (Gómez, 2022). Esta baja densidad, unida a la baja respuesta dinámica que poseen, la vuelve una mala candidata para su integración con energías intermitentes, como la solar o eólica. Una corriente alta y variable puede producir una alta mezcla de H_2 y O_2 , pudiendo provocar explosiones si se sobrepasa cierto límite de concentraciones (Qi et al., 2021). Por último, al estar los electrodos expuestos a un pH alcalino, estos se corroen rápidamente si no están hechos de materiales resistentes, como los metales nobles (El-Shafie, 2023).

5.2 Electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM)

La electrólisis PEM (del inglés Proton Exchange Membrane), es la segunda tecnología en desarrollarse, datando las primeras PEMWE (Proton Exchange Membrane Water Electrolysis) de 1966 por General Electric (Shiva Kumar & Himabindu, 2019), y presenta un grado de madurez tecnológica alto. La peculiaridad de este tipo de electrólisis es el uso de una membrana polimérica sólida que actúa al mismo tiempo de separador y de electrolito (figura 5).

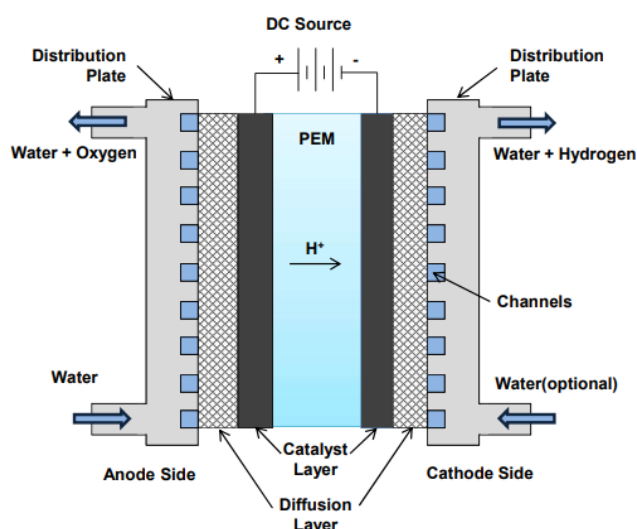


Figura 5. Esquema detallado de los componentes de una celda PEM (Sood et al., 2020).

Las membranas utilizadas están hechas a base de fluoropolímeros sulfonados, como el Nafion[®], que cuentan con una menor permeabilidad gaseosa, alta conductividad protónica, un grosor reducido y alta integridad operando a altas presiones (Shiva Kumar & Himabindu, 2019). Al ser esta membrana fina ($\sim 100 \mu\text{m}$), se consigue separar efectivamente los gases producidos en los electrodos a la vez que se aumenta la conductividad protónica, al estar estos inversamente relacionados (X. Luo et al., 2021).

Como se puede ver en la figura 6, esta reacción se da en medio ácido, pero en la celda no se encuentra ninguna disolución de un ácido líquido. En su lugar, es la propia membrana la que actúa de electrolito, al contar con un carácter fuertemente ácido, ya que posee grupos funcionales SO_3H dentro de su estructura reticulada. La presencia de estos grupos dota a la membrana de la capacidad de transportar protones (H^+) a través de intercambio iónico (Ursua et al., 2012).

La membrana está contenida por dos láminas catalizadoras donde se aplica la corriente, actuando de esta manera como electrodos (figura 5). Estas láminas suelen estar compuestas de metales nobles (como el Pt o el Au), los cuales son necesarios para que resistan el ambiente fuertemente ácido en el que se encuentran. Es habitual que estas láminas contengan un pequeño recubrimiento que acelere la reacción, generalmente Iridio o sus óxidos. Este metal es de los elementos más escasos de la tierra, y su uso contribuye a encarecer el uso de este tipo de electrólisis (Squadrito et al., 2023).

En los extremos opuestos de las láminas catalizadoras se encuentran las capas de difusión (figura 5). La que está en el lado del cátodo es la capa de difusión de gases (GDL del inglés Gas Diffusion Layer), y será la responsable de difundir y transportar el hidrógeno generado. En el lado del ánodo se encuentra la capa de transporte porosa (PTL del inglés Porous Transport Layer), que tendrá una entrada de agua y una salida de oxígeno con agua (C. R. Wang et al., 2025). Estas capas deben tener buena resistencia a la corrosión ya que están inmersos en medio ácido y se someten a grandes sobrepotenciales con ambientes ricos en oxígeno, en el caso de la PTL. Por ello se suelen emplear mallas de titanio para fabricar estos componentes.

Por último, la placa de distribución (o placa bipolar) se encarga de distribuir el agua de la reacción y retira los productos gaseosos a través de canales de flujo. Además, estas placas contribuyen a la integridad estructural de la celda y actúan de separador cuando se combinan varias celdas (Sood et al., 2020). Tradicionalmente se han usado materiales como el grafito para su fabricación, pero hoy en día se utilizan aceros inoxidables o titanio recubiertos de metales nobles para reducir su corrosión (Nikiforov et al., 2011).

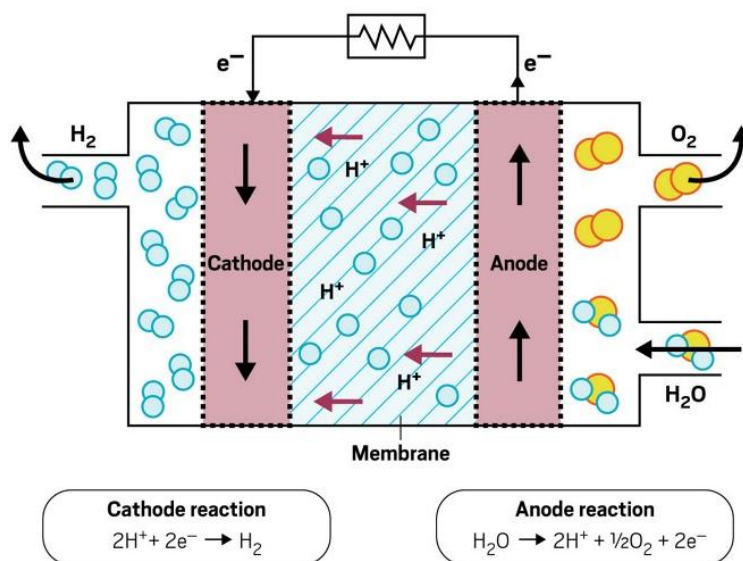


Figura 6. Esquema de la reacción y del movimiento de los reactivos y productos en la celda PEM (Electrolyzers, s. f.).

El funcionamiento de una celda PEM (figura 6) comienza cuando se suministra a la parte anódica de la celda con agua desionizada líquida. Esta agua será transportada a través de la capa de transporte porosa hasta que alcance la capa catalítica. En contacto con esta capa, que actúa como ánodo, sucederá la reacción indicada en la ecuación 3, y el agua se dividirá en protones, electrones y oxígeno molecular. Este oxígeno gaseoso fluye a través de la PTL hasta las capas de distribución, de donde se extrae de la celda. Los electrones producidos en el ánodo migrarán por el circuito externo hasta alcanzar el cátodo (Lamy & Millet, 2020). Al mismo tiempo, los protones generados en la reacción OER viajan hidratados por la membrana polimérica hasta llegar al cátodo catalítico, donde serán reducidos por los electrones de la fuente externa para producir hidrógeno molecular, de acuerdo con la ecuación 2. Finalmente, este H_2 cruza la capa de difusión de gases y se retira de la celda en las placas de distribución, donde se puede añadir un flujo de agua opcional para facilitar su evacuación (K. Zhang et al., 2022).

Como la membrana PEM es impermeable a los gases producidos en los electrodos, el aporte continuo de protones al cátodo genera una producción constante de H_2 , que no puede atravesar la membrana hacia el ánodo, produciendo un incremento gradual de la presión de este gas conforme se va generando. Esta presurización se consigue sin la necesidad de un compresor externo, y se conoce como compresión electroquímica (Hancke et al., 2022). Para obtener el hidrógeno a una presión determinada tendremos que aplicar un sobrecoste energético en forma de potencial eléctrico, que idealmente vendrá determinado por la ecuación de Nerst descrita a continuación (Aziz et al., 2025).

$$E_{Nerst} = \frac{RT}{2F} \log \left(\frac{P_{ánodo,H_2}}{P_{cátodo}} \right) \quad (40)$$

Esta ecuación nos dice que potencial tenemos que aplicar a la celda para lograr una determinada presión en el hidrógeno, si le estamos inyectando agua en el cátodo a una determinada presión. Debido a la gran robustez de las membranas, estas celdas pueden actuar a rangos de presión mayores que en la AWE, pudiendo llegar hasta los 70 o incluso 80 bares (Shiva Kumar & Lim, 2022). Al tener la opción de trabajar con presiones elevadas, el hidrógeno obtenido en estas condiciones se obtiene directamente comprimido, lo que reduce el coste de una compresión posterior del hidrógeno para su transporte y utilización (Hancke et al., 2022b).

En cuanto a la temperatura de operación en la electrólisis PEM, estas celdas suelen tener un rango similar a la AWE, pudiendo funcionar en condiciones estándar, pero siendo habitual su uso a temperaturas más altas para aumentar la eficiencia. Esta temperatura se sitúa generalmente entre 60 y 90 °C, sin superar la temperatura de ebullición del agua a presión atmosférica (Şahin, 2024).

Por otro lado, los electrolizadores PEM tienen la posibilidad de operar a densidades de corriente superiores, situándose habitualmente en torno a 1 – 3 A/cm², aunque hay autores como Villagra y Millet (2019) que señalan que es posible alcanzar densidades de hasta 10 A/cm². Esta elevada densidad de corriente permite reducir el volumen de estos electrolizadores, lo que permite la producción de hidrógeno distribuida en aquellos lugares donde se vaya a consumir, en lugar de en grandes plantas de producción. Esta descentralización puede favorecer una eficiencia en el sistema energético global, al reducir los costes de almacenamiento y transporte. En cuanto al voltaje de operación, la celda trabaja en intervalos típicos de 1.4 – 2.3 V, lo cual representa unos valores similares a las celdas tradicionales (Sebbahi et al., 2024). En lo que respecta a la eficiencia de la celda, la electrólisis PEM posee valores comparables a las celdas AWE, de entre un 67 y un 82%, lo que se traduce en un consumo eléctrico por cada metro cúbico normalizado de H₂ de entre un 4.2 y un 5.5 kW/Nm³ (Sebbahi et al., 2024).

Debido al diseño de la celda, existe muy poca permeabilidad gaseosa en la membrana, lo que evita que se produzcan mezclas explosivas de gases H₂ y O₂. Al disminuir sustancialmente esta combinación de gases, la celda admitirá un mayor rango de densidades de corriente sin riesgo de que estos reaccionen en una explosión (Ursua et al., 2012). En concreto, el grado de pureza del hidrógeno obtenido en el cátodo es de entono al 99.9999%, lo que evita la necesidad de un purificado del gas una vez obtenido (El-Shafie, 2023). Otra importante característica de la electrólisis PEM es su amplia versatilidad para trabajar con fuentes de alimentación que suministren energía de forma variable. Esta capacidad se debe a la rápida respuesta de los protones que se mueven por la membrana, que no poseen tanta inercia como los electrolitos en disoluciones líquidas, como sí ocurría en la AWE (Carmo et al., 2013). Gracias a esta rápida

respuesta, estos electrolizadores son candidatos idóneos para trabajar con fuentes variables de energía renovable, como la energía solar o eólica. Operando de manera conjunta se podría almacenar la energía no utilizada en periodos de baja demanda energética en forma de hidrógeno comprimido para su posterior uso.

Por otro lado, este tipo de tecnología también presenta factores limitantes. El ambiente de pH bajo y alto estrés oxidativo en el ánodo provoca una rápida degradación de los elementos de la celda, reduciendo su vida útil a alrededor de las 60000 y 80000 h (Shiva Kumar & Lim, 2022). Para reducir la degradación y mantener la efectividad de los elementos de la celda se suele recurrir al uso de metales nobles o escasos, como el Pt e Ir, lo cual encarece notablemente esta tecnología. Por comparación, el coste de los materiales necesarios para su construcción supone un 53.47%, frente al 14.85% del coste de la energía que utiliza en funcionamiento (Shiva Kumar & Himabindu, 2019)

5.3 Electrólisis de membrana de intercambio aniónico (AEM)

La electrólisis AEM (del inglés Anion Exchange Membrane) es la tecnología más reciente de todas, y se encuentra todavía en su fase de desarrollo. Este tipo de electrolizadores surge como una mezcla híbrida entre la electrólisis PEM y AWE, pero con la capacidad de evadir las desventajas que estas presentan (Chen & Hu, 2020). Estas celdas tienen una morfología similar a la que ya hemos estudiado en los electrolizadores PEM, pero en este caso la membrana polimérica transporta iones hidroxilo (OH^-), lo que permite utilizar soluciones débilmente alcalinas o incluso agua pura (Figura 7).

Al no trabajar en ambientes tan ácidos como en la PEM, se reduce fuertemente la velocidad de corrosión de los materiales, lo que da puerta a la utilización de materiales más baratos que los metales nobles, como el níquel, hierro o cobalto; permitiendo abaratar los costes de su construcción (Lee et al., 2024). Además, la presencia de la membrana polimérica dota a este tipo de electrólisis de las ventajas derivadas de su uso que se adquirirían en la PEMWE (del inglés Proton Exchange Membrane Water Electrolysis), como la rápida respuesta a fluctuaciones energéticas, la alta pureza del hidrógeno producido o la posibilidad de trabajar a presiones elevadas por la compresión electroquímica (C. Liu et al., 2024).

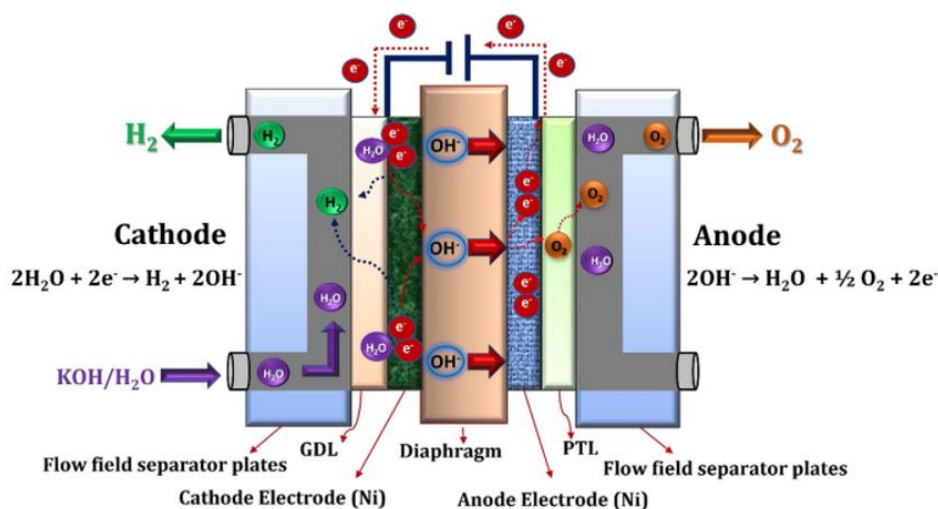


Figura 7. Esquema de la celda AEM, junto con los elementos de la reacción (Shiva Kumar & Lim, 2022)

Los componentes de este tipo de celdas (Figura 7) son muy parecidos a la ya vista en electrólisis PEM, aunque con algunas ligeras diferencias. La principal diferencia es la capacidad de la membrana para realizar un transporte selectivo de grupos OH⁻ del cátodo hacia el ánodo, en vez de los protones que transportaba la PEM. Uno de los materiales más utilizados como membrana es el llamado Sustainion[®], desarrollado por Dioxide Materials, el cual está basado en un copolímero de cloruro de 4-vinilbencil y estireno (Henkensmeier et al., 2021). Este polímero presenta grupos de intercambio iónico como el $-\text{NH}_3^+$, el $-\text{RNH}_2^+$, o sales cuaternarias de amonio; que son las responsables del movimiento de los hidroxilos por la membrana (Vincent & Bessarabov, 2018).

Al trabajar en ambientes ligeramente alcalinos, la mayoría de los materiales de alto costo utilizados en la PEM se pueden sustituir con otros de precio más asequible. En el caso de los electrodos (que también ejercen de catalizadores de la reacción), los ánodos suelen estar compuestos de níquel, mientras que en los cátodos se usa una aleación de NiFeCo (Ghorui et al., 2024). En las capas de difusión es habitual el uso de tela de carbono y mallas porosas de níquel en el GDL y PTL respectivamente. Al no estar en medios tan corrosivos, el resto de las partes de la celda se pueden sustituir por aceros inoxidables (Shiva Kumar & Lim, 2022).

El proceso que sigue la reacción esta ilustrada en la figura 7, y es análogo a los vistos en PEM, pero con las reacciones químicas de la AWE. En primer lugar, se inyecta una disolución de agua ligeramente alcalina en la parte del cátodo. Esta disolución es típicamente de KOH 1M, aunque hay algunos electrolizadores que emplean agua pura. Cuando la disolución alcanza el electrodo, el agua se reduce absorbiendo 2 electrones provistos por la fuente externa, generando hidrógeno gaseoso e iones hidroxilo, de acuerdo con la ecuación 4 (Vinodh et al., 2023). Estos

grupos OH^- son difundidos por la membrana hasta alcanzar el ánodo. En este electrodo los OH^- se combinan y se oxidan, dando lugar a oxígeno gaseoso, moléculas de agua y perdiendo 2 electrones en el proceso (ecuación 5), que serán recogidos y transportados hasta el cátodo por la fuente de alimentación externa (Lamy & Millet, 2020).

La electrólisis AEM, junto con la PEM y AWE forman las llamadas electrólisis a baja temperatura, ya que no suelen superar los 100 °C. En concreto, este tipo de celdas puede trabajar a temperaturas de hasta 70 °C, ya que a temperaturas más elevadas se pone en riesgo la estabilidad química de los grupos funcionales de la membrana (Agrawal et al., 2024). Las presiones admitidas por estas celdas son más altas que en la AWE, al aportar la membrana polimérica integridad estructural, situándose en torno a los 30 – 50 bar. Este rango de presiones es un poco menor que en las PEM, al ser las membranas de la AEM menos resistentes que en el transporte de protones, aunque puede llegar a operar a presiones de hasta 80 bares si se le aplican refuerzos a las membranas más finas (Du et al., 2022). Al trabajar a altas presiones se consigue el ya comentado beneficio de obtener el hidrógeno comprimido directamente de la celda, lo que facilita su almacenamiento y transporte.

El rango de densidades de corriente en las que la celda suele operar se encuentra entre 0.2 y 1 A/cm^2 (L. Liu et al., 2024), afectando negativamente en el rendimiento y durabilidad si se opera a densidades mayores. El voltaje al que suelen estar sometidos los electrodos es similar al del resto de electrólisis de baja temperatura, situándose el de estas celdas entre 1.4 – 2 V (Shiva Kumar & Lim, 2022). La eficiencia que se puede obtener con este tipo de electrolizadores es del 60 – 80 %, la cual es comparable con las tecnologías previamente estudiadas. Finalmente, se ha observado que la energía eléctrica que se consume por cada metro cúbico normalizado de H_2 en la AEMWE (las siglas WE son de Water Electrolysis) es de alrededor de 3.35 y 5.6 kW/Nm^3 (Ozcan et al., 2023).

La membrana polimérica de estas celdas aporta las mismas ventajas que las ya vistas en las PEMWE. La membrana ayuda a un menor entrecruzamiento de productos, lo cual evita el riesgo de mezclas explosivas. Este menor entrecruzamiento provoca a su vez una elevada pureza del hidrógeno resultante, del orden del 99.9 – 99.9999 % (Sebbahi et al., 2024), que reduce la necesidad de purificaciones posteriores. Por otro lado, este tipo de electrólisis tiene una mayor adaptabilidad a variaciones de carga que las AWE, al transportarse los iones por la membrana en vez de medios líquidos. Sin embargo, no son tan buenas candidatas para acoplarse a energías renovables variables, al contar con una peor respuesta dinámica que las PEM, un rango bajo de densidades de carga y una peor conductividad en los grupos OH^- .

Pese a los claros avances que supone el empleo de la electrólisis de intercambio aniónico, estas también cuentan con diversos limitantes que evitan que sea una tecnología escalable a nivel

industrial. Una de las principales deficiencias que presentan es la baja durabilidad que poseen, al tener como máximo una vida útil menor a las 30000h (Shiva Kumar & Lim, 2022), lo que supone menos de la mitad del tiempo mínimo que aguantan los electrolizadores ya estudiados (la AWE tiene un tiempo de vida máximo de más de 4 veces el de la AEM). Esta baja durabilidad es la consecuencia de la rápida degradación a la que está ejercida su membrana. Los mismos grupos catiónicos que en la membrana que permiten el transporte de OH^- , pueden reaccionar químicamente con estos (por eliminación de Hofmann o sustitución nucleofílica), neutralizando la carga de estos grupos funcionales (Espíritu et al., 2017). Esto afecta a la capacidad de intercambio iónica de la membrana y por tanto, lo que produce una disminución progresiva de la conductividad de la celda (Zhegur et al., 2020). Esta baja durabilidad también se ha visto atribuida a la pérdida de funcionalidad cuando se opera por tiempos prolongados a altas temperaturas (Mustain et al., 2020).

Es por ello que, aun siendo una tecnología prometedora, la electrólisis AEM aún tiene que sobrepasar sus limitaciones antes de alcanzar la madurez tecnológica necesaria para su aplicación comercial. Actualmente se encuentra en un estado de investigación y desarrollo para poder garantizar la integridad química de sus membranas, permitiendo alargar su durabilidad (Lei et al., 2024).

5.4 Celdas electrolizadoras de óxidos sólidos (SOEC)

La principal diferencia cuando hablamos de electrólisis SOEC (del inglés Solid Oxide Electrolysis Cell) es su alta temperatura de operación, ya que suelen operar en rangos de entre 700 a 850 °C, lo que afecta significativamente a la eficiencia (Łosiewicz, 2024), aunque pueden llegar a alcanzar hasta los 1000 °C (Laguna-Bercero, 2012). Esto quiere decir que, en vez de utilizar agua líquida, se utiliza vapor de agua, lo que resulta en una adicional mejora a la eficiencia al ser menor su energía de disociación.

Además, estas altísimas temperaturas la convierten en un excelente candidato para su integración a procesos industriales a gran escala que necesiten evacuar sus excesos de calor (David et al., 2019). Si este calor residual es suficientemente alto como para suministrar de manera continua el calor necesario para la reacción endotérmica de la electrólisis, la eficiencia teórica que alcanzaría sería mayor al 100% si se mide utilizando la ecuación 19, ya que la energía eléctrica suministrada sería menor al HHV (Flis, 2023).

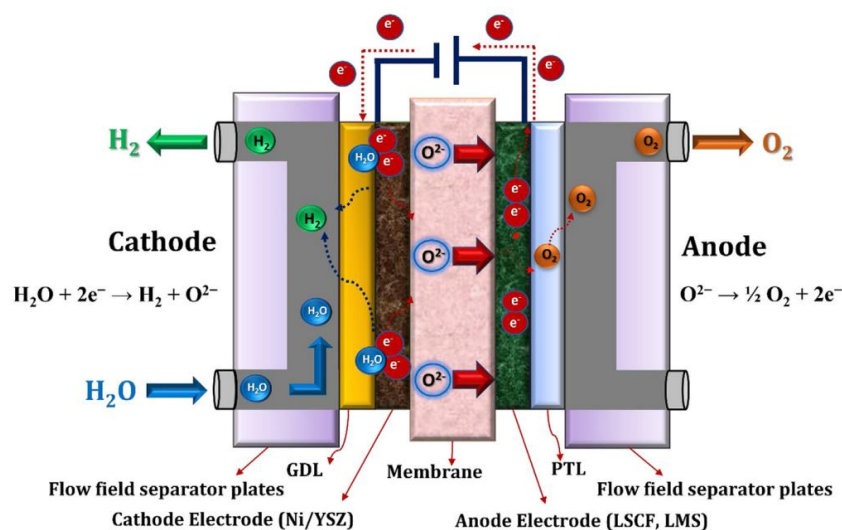


Figura 8. Esquema de la celda SOEC, junto con los elementos de la reacción (Shiva Kumar & Lim, 2022).

En estas celdas el electrolito y membrana separadora que se utiliza es un cerámico sólido, lo que impone el uso de altas temperaturas para que hay conductividad. Generalmente el electrolito suele estar compuesto de un conductor iónico denso de circonia (ZrO₂) estabilizado con óxido de itrio (Y₂O₃), que se suele escribir como YSZ (figura 8). Este material mantiene su integridad térmica y química a altas presiones, así como garantiza una buena conductividad iónica.

El cátodo suele estar hecho de un material compuesto a base de YSZ con níquel metálico (figura 8), mientras que en el ánodo suele ser un electrodo hecho de un compuesto de manganita de lantano-estroncio (LSM) con YSZ o por ferrita de lantano-estroncio-cobalto comúnmente denominado LSCF (Laguna-Bercero, 2012). Como se puede ver en la figura 8, las reacciones del cátodo y el ánodo no son como las que hemos visto hasta ahora, al no encontrarnos en un medio ácido o básico (ni líquido), por lo que las reacciones de los electrodos serán características de los electrolizadores SOEC.

El proceso de la electrólisis comienza cuando se introduce vapor de agua en el lado del cátodo, donde se reduce absorbiendo dos electrones y liberando hidrógeno molecular y iones de óxido (O²⁻). El H₂ producido se recoge y se retira de la celda, mientras que los iones de óxido se desplazan por la membrana hasta llegar al cátodo (Lehner et al., 2014). Estos iones se pueden transportar al estar la membrana de YSZ compuesta por óxidos metálicos con vacantes de oxígeno en su red (Vinchihi et al., 2023). Cuando los iones O²⁻ alcanzan el ánodo se oxidan al reaccionar unos con otros, formándose oxígeno gaseoso como producto. Al oxidarse liberan su carga de dos electrones al ánodo, donde viajan por el circuito externo hasta alcanzar el cátodo para reaccionar con más moléculas de agua (Shiva Kumar & Lim, 2022).

Aunque la presión puede aumentar las cinéticas de los electrodos y al transporte de masa, disminuyendo por tanto el voltaje necesario para la electrólisis, esta mejora es pequeña si se superan los 4 bares (M. Zhang et al., 2022). Al trabajar con presiones elevadas se corre el riesgo de dañar la frágil estructura del electrolito. Además, debido a la naturaleza cerámica y porosa de estas celdas, es especialmente difícil conseguir cierres herméticos, lo que provoca pequeñas fugas en la celda (R. Li et al., 2023). Como consecuencia, la electrólisis SOEC suele tener rangos de presión cercanos al estándar, de 1 a 3 bares. Esto quiere decir que el H₂ producido necesitara una compresión posterior para la mayoría de sus aplicaciones (Flis, 2023).

Las celdas SOEC suelen tener un rango de densidades de corriente comparable con los electrolizadores anteriores, de entre 0.2 y 1.3 A/cm². En cuanto al voltaje total de operación, este se sitúa entre 0.7 y 1.5 V (Sebbahi et al., 2024), la cual es significativamente menor que el resto de tecnologías estudiadas. Esta notable reducción del voltaje se debe en buena medida al aporte térmico externo, permitiendo que la celda trabaje de forma endotérmica. En este modo de trabajo es habitual que las celdas tengan eficiencias muy altas, de más del 90% e incluso superando el 100% si se utiliza la eficiencia termoneutral (Flis, 2023). Esta alta eficiencia energética permite que la energía que se tiene que consumir para producir un metro cúbico normalizado de H₂ sea la menor del resto de celdas, encontrándose generalmente este consumo entre 2.5 – 3.5 kW/Nm³ (El-Shafie, 2023).

La membrana unidireccional de estas celdas permite que los gases producidos estén aislados, produciendo purezas para el H₂ del 99.9%, lo que reduce los posteriores gastos de purificación (Shiva Kumar & Lim, 2022). Por otra parte, estas celdas no suelen contar con una vida útil muy larga, al tener una degradación muy rápida inducida por las altas temperaturas, que puede provocar grietas o delaminaciones si la expansión térmica de los materiales utilizados no es similar (Singhal, 2000). En concreto, la alta delaminación que se da en el ánodo puede generar sobrepresiones internas con flujos altos de O²⁻ (M.S. Sohal et al., 2009). La vida útil de estas celdas se suele situar en torno a las 8000 y 20000 h, aunque este es un valor aproximado dado su poco estado de madurez, encontrándose todavía en periodo de investigación y desarrollo precomercial (David et al., 2019).

Estas celdas necesitan un proceso de precalentamiento para alcanzar estas altas temperaturas de trabajo y, una vez alcanzadas, es necesario que estas temperaturas se mantengan estables, asilándolas térmicamente. Por consiguiente, el despliegue a pequeña escala o con su adaptación a fuentes de energía variable se encuentra fuertemente limitado. Sin embargo, la electrólisis SOEC se puede ser integrada a energías nucleares, aprovechando sus deshechos térmicos para producir hidrógeno sin consumir combustibles fósiles (Min et al., 2022).

5.5 Comparación de las diferentes celdas

A modo de resumen comparativo, se exponen las principales características propias de cada electrolizador en la tabla 1.

Tabla 1	AWE	PEM	AEM	SOEC
Portador de carga	OH ⁻	H ⁺	OH ⁻	O ²⁻
Electrolito	KOH (medio líquido)	Nafion® (polímero sólido)	Sustainion® (polímero sólido)	YSZ (cerámico sólido)
Electrodo	Ni/inoxidable	Pt/Ir	NiFeCo	YSZ
Temperatura (°C)	60 – 90	60 – 90	< 70	700 – 850
Presión (bar)	25 – 30	< 80	30 – 50	1 – 3
Densidad de corriente (A/cm ²)	< 0.45	1 – 3	0.2 – 1	0.2 - 1.3
Voltaje de operación (V)	1.8 - 2.4	1 - 3	1.4 - 2	0.7 - 1.5
Eficiencia (%)	60 – 70	67 – 82	60 - 80	> 90
Consumo (kW/Nm ³)	4.5 - 5.5	4.2 - 5.5	3.35 - 5.6	2.5 - 3.5
Pureza (%)	99.95	99.9999	99.9999	99.9
Área (cm ²)	10000 -30000	< 300	15000	200
Coste (USD/kW)	500 – 1700	1400 – 2100	800 – 1800	> 200
Vida útil (kh)	60 – 120	60 - 80	< 30	8 – 20
Madurez	Madura	Comercial	Investigación y desarrollo	Investigación y desarrollo

Tabla 1. Comparativa de los tipos de electrólisis estudiados. Los datos de coste fueron obtenidos por Sebbahi et al. (2024). El área mostrada es la del electrodo y se obtuvieron usando los datos de Shiva Kumar y Lim (2022).

Al ser tecnologías emergentes y estar evolucionando rápidamente, algunos de los valores para AEM y SOEC aportados en la tabla 1 pueden resultar poco precisos, y se deben tomar de manera orientativa. En la tabla 2 se exponen las principales ventajas y desventajas de las distintas que supone el uso de cada tipo de celda.

Tabla 2	AWE	PEM	AEM	SOEC
Ventajas	<p>Tecnología madura</p> <p>Bajo coste</p> <p>Gran durabilidad</p> <p>No usa metales nobles</p>	<p>En estado comercial</p> <p>Altas densidades de corriente</p> <p>Altas presiones</p> <p>Alta pureza</p> <p>Respuesta dinámica rápida</p> <p>Diseño compacto</p>	<p>Ambiente ligeramente alcalino</p> <p>Altas presiones</p> <p>Alta pureza</p> <p>Respuesta dinámica rápida</p> <p>No usa metales nobles</p>	<p>Altísima eficiencia</p> <p>Altas temperaturas</p> <p>Modo endodérmico</p> <p>No usa metales nobles</p> <p>Bajo consumo eléctrico</p>
Desventajas	<p>Baja densidad de corriente</p> <p>Entrecruzamiento de gases</p> <p>Baja respuesta dinámica</p> <p>Electrolito corrosivo</p>	<p>Coste elevado</p> <p>Entorno ácido</p> <p>Uso de metales nobles y escasos</p>	<p>Tecnología en desarrollo</p> <p>Estabilidad limitada</p> <p>Baja vida útil</p>	<p>Tecnología en desarrollo</p> <p>Baja presión</p> <p>Baja vida útil</p> <p>Necesidad de altas temperaturas para operar</p>

Tabla 2. Resumen de las ventajas y desventajas de los electrolizadores estudiados

Entre todos los tipos de electrólisis estudiado, se seleccionará la celda PEM para el siguiente capítulo, dada su alta capacidad para integrarse con energías renovables variables por su alta respuesta dinámica. Además, estas celdas nos permiten almacenar el hidrógeno a altas presiones, por lo que resulta idónea para aprovechar la energía no utilizada en periodos de baja demanda energética para la obtención de hidrógeno comprimido altamente purificado. El diseño modular que presenta esta electrólisis nos permite su uso en aplicaciones descentralizadas, aumentando el número de lugares donde se podrá utilizar. Su madurez comercial nos asegura que las características de estas celdas sean fiables y, por tanto, que nuestros modelos sean más coherentes e incluso se puedan poner en práctica.

Capítulo 6. Integración de celda PEM con células fotovoltaicas.

A lo largo de este capítulo se describirá un modelo para un electrolizador PEM que produzca hidrógeno con la energía suministrada por una placa fotovoltaica. Este sistema será capaz de producir hidrógeno verde (sin emisiones de carbono) de manera autónoma. El objetivo principal será la determinación de las características óptimas de cada componente del sistema, de manera que se maximice el tiempo de funcionamiento de la celda electrolítica a lo largo del año, pudiendo generar así una mayor cantidad de H_2 .

Con la finalidad de incrementar la eficiencia de la celda y, por tanto, aumentar el ritmo de producción de hidrógeno, se hará uso de un colector solar parabólico. El depósito que suministre agua a la celda estará localizado en el foco de la parábola del colector, pudiendo así elevar la temperatura de operación sin aportes eléctricos adicionales, utilizando únicamente energía solar. A su vez, el colector contará con un motor que permita su movilidad automática, funcionando como un seguidor solar. El motor rotará el colector solar horizontalmente a lo largo del día y verticalmente a lo largo del año, de manera que la irradiancia solar recogida por el colector sea siempre máxima.

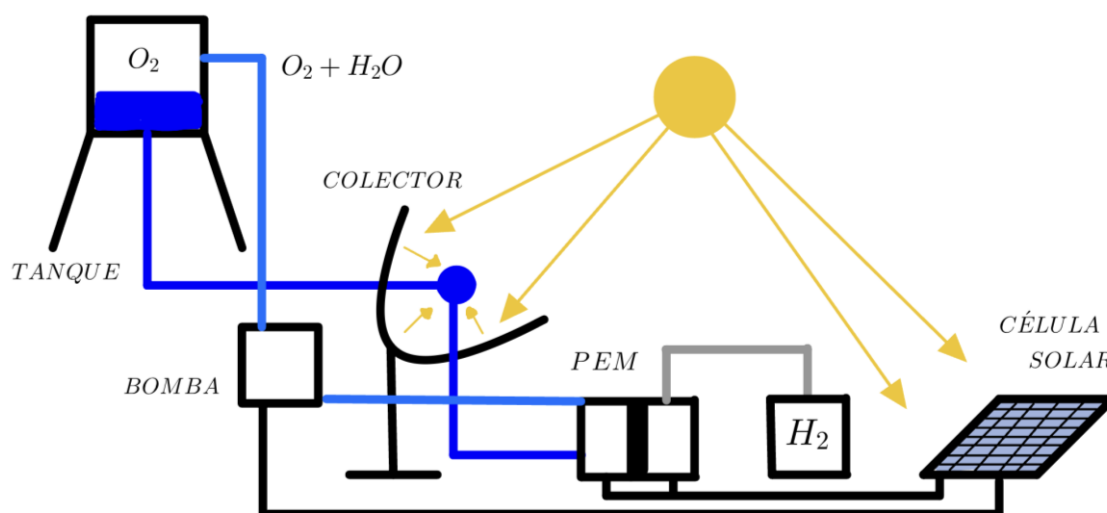


Figura 9. Esquema del dispositivo propuesto.

Para este capítulo se utilizarán componentes comerciales para cada parte del sistema. De esta manera, las características que atribuyamos a los componentes estarán comprobados por el fabricante, aportando fiabilidad y garantizando la validez de nuestro modelo. Adicionalmente,

al usar materiales de mercado se hace posible la construcción experimental de todo el sistema, garantizando así la reproducibilidad y aplicabilidad del modelo.

6.1 Electrolizador y colector solar

El electrolizador PEM al que se hará referencia a lo largo del proyecto será el provisto por la empresa Hydrogen Innovation GmbH, llamada “PEM Electrolyser Stack – Storager 40 bar”. En el electrolizador de esta empresa se pueden acoplar desde una hasta 45 celdas PEM. Para nuestro análisis, el electrolizador contará con una única celda, ya que se quiere dar el modelo más sencillo posible para mostrar de qué manera operaría. Una vez se haya diseñado el modelo, este será fácilmente escalable y equiparable a otro que cuente con un electrolizador con más celdas, modificando ciertas áreas del diseño, pero manteniendo su estructura y principios de funcionamiento. Las características más relevantes del electrolizador que aporta la empresa se muestran en la tabla 3.

PEM Electrolyser Stack – Storager 40 bar		Producción de H₂	0.021 – 0.452 Nm ³ /h
Tiempo de vida	40000 h	Voltaje	1.63 – 2.23 V
Área electrodo	490.9 cm ²	Densidad corriente	0.1 – 2.2 A/ cm ²
Temperatura	60 – 80 °C	Dimensiones	50 x 49 x 48 cm
Presión	< 40 bar	Peso	497 kg

Tabla 3. Datos del electrolizador comercial que se modelará

Con este electrolizador se pueden llegar a presiones de hasta 40 bares, lo que nos resultará conveniente para poder almacenar mayores cantidades de hidrógeno en el mismo espacio, además de conseguir que este hidrógeno comprimido se encuentre en condiciones adecuadas para su directa utilización. De manera adicional, el amplio rango de densidades de corriente admitidas nos permite tener un sistema robusto frente a las fluctuaciones energéticas propias de la placa fotovoltaica.

Para modelizar adecuadamente la energía solar incidente, y así tener información precisa sobre la irradiancia solar que necesitaremos tanto para el colector solar como para la placa fotovoltaica, necesitamos saber cuánta energía solar incide al día. Por consiguiente, se hará uso

de los datos recogidos por la estación meteorológica “MeteoCarlet”, en la localidad de Carlet (Valencia). Los datos que se utilizarán serán los recogidos en el año 2024 por su proximidad al año actual. El empleo de datos reales atribuirá más realismo a nuestro modelo.

El colector Solar que se tomará como referencia, será el llamado “Solar Cooker” modelo 003 de la empresa Ningbo 4U sunny Photoelectric Technology Co., Ltd. Esta empresa nos especifica que el colector consta de un diámetro de 1.5 m. La cantidad de luz que será capaz de interceptar un colector de este diámetro vendrá relacionada con su área de apertura (ecuación 41), que representa el área de proyección perpendicular a la luz, o el área de su sombra si el sol se situase justo encima (Sayma, s. f.).

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (41)$$

Para el colector que hemos tomado de referencia, esta área será de 1.77 m². Sin embargo, entre las especificaciones del producto no se encuentra la eficiencia óptica del colector. Para estimar la energía máxima que el colector sería capaz de aprovechar, utilizaremos un 76 % de eficiencia de los colectores solares de la empresa Absolicon, los cuales cuentan con las eficiencias más altas alcanzadas para colectores solares parabólicos pequeños.

La potencia y, por tanto, el calor, que será capaz de suministrar un colector solar de estas características, vendrá determinado por la ecuación 42. Este calor aportado tiene que ser el necesario para poder elevar una determinada cantidad de agua localizada en el foco de una temperatura a otra (ecuación 43), teniendo en cuenta que el calor específico a presión constante del agua líquida es de 4.1813 J/g°C (ASIT, 2022).

$$P = A \cdot G \cdot \eta \quad ; \quad P = \frac{Q}{t} \quad (42)$$

$$Q = A \cdot G \cdot \eta \cdot t = mc_p(T_f - T_i) \quad (43)$$

Donde el término G representa la irradiancia solar en W/m² y η es la eficiencia óptica del colector solar. En concreto, nos interesa que el calor que se suministre sea capaz de elevar la temperatura a 60 grados como mínimo y 80 °C como máximo para que se encuentre en el rango de funcionamiento óptimo de la celda PEM.

La cantidad de agua que coloquemos en el foco del colector no se podrá evaporar en ningún caso, ya que para la electrólisis se necesitará agua líquida. Asimismo, la circulación de vapor de

agua en el circuito del sistema puede inducir problemas en el correcto flujo de agua. Para evitar la presencia de vapor, se calculará la cantidad mínima de agua capaz de absorber sin evaporarse la máxima cantidad de energía que pueda aportar el colector. Según los datos de “MeteoCarlet”, a las 13:00 horas del 19 de abril se registró la irradiancia solar más alta de todo el año 2024, de 1188 W/m². Para calcular la menor cantidad de agua que no se evaporaría bajo estas circunstancias, supondremos que esta irradiancia fue constante durante toda la hora que se registró. También deberemos tener en cuenta que el calor que aporte el colector tendrá que ser capaz de elevar la temperatura del agua hasta los 100 grados y que esta cambie de fase (ecuación 44). Por tanto, la mínima cantidad de agua que tendremos que colocar en el foco del colector solar vendrá dado por la siguiente expresión (ecuación 45).

$$Q = mc_p(T_f - T_i) + mc_L \quad (44)$$

$$m = \frac{A \cdot G \cdot \eta \cdot t}{c_p(T_f - T_i) + c_L} = \frac{1.77 \cdot 1188 \cdot 0.76 \cdot 3600}{4.1813(100 - 19.37) + 2265} = 2.21 \text{ kg} \quad (45)$$

El término c_L representa el calor latente de vaporización del agua, y en la temperatura inicial se substituyó por la temperatura media de 2024 obtenida de “MeteoCarlet”.

6.2 Irradiancias de operación

Con el objetivo de lograr que nuestro diseño maximice su producción de hidrógeno, este tendrá que estar ser capaz de mantenerse en funcionamiento durante el mayor tiempo posible. Esto se puede conseguir si se adapta el sistema para que trabaje bajo el valor de la irradiancia más frecuente, es decir, la media de las irradiancias. Este trabajo tiene un enfoque en las producciones anuales de hidrógeno, luego se necesitará obtener la irradiancia media anual. Con los datos obtenidos de la estación meteorológica “MeteoCarlet”, sabemos que la irradiancia media durante el año 2024 fue de 178.6 W/m². Sin embargo, este valor medio no excluye situaciones de irradiancia nula, como las que se dan de noche. Por tanto, es necesario saber la irradiancia media anual únicamente en periodos de luz.

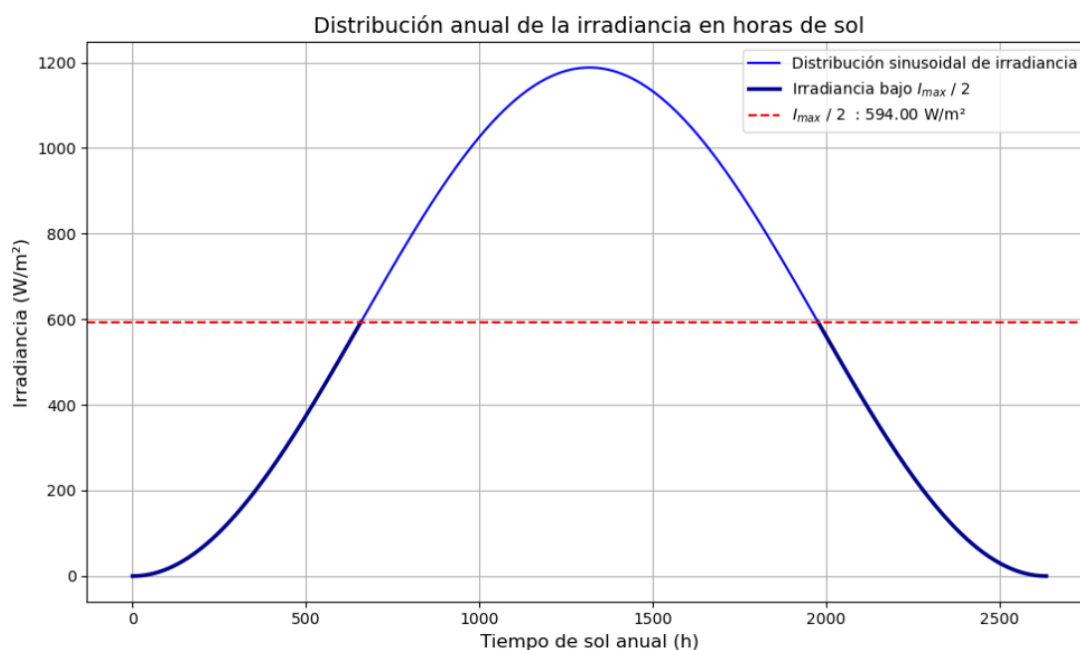
Si nos fijamos en una gráfica de la irradiancia solar a lo largo del día (anexo 9), veremos que esta es 0 antes de amanecer y otra vez 0 justo después de anochecer, como es esperable. La irradiancia máxima que se produce ese día sucede justo a mitad del amanecer y atardecer, al ser este el momento donde el sol se sitúa en el punto más alto del cielo y sus los rayos inciden con un mayor vertical sobre nosotros. A su vez, si se visualiza la irradiancia solar en función de las horas de luz día tras día, nos daremos cuenta de que esta irradiancia viene determinada por una función sinusoidal. Esta distribución es provocada por el movimiento circular periódico que

la Tierra realiza sobre su eje. De esta manera, se puede justificar una distribución similar de la irradiancia a lo largo del año. La trayectoria orbital prácticamente circular generará la periodicidad de su distribución, y la inclinación respecto del eje de rotación provocará máximos en la irradiancia anual de forma similar a los vistos diariamente.

Como nos interesa saber la media de la irradiancia solar anual en periodos de luz, se excluirán las horas donde no se haya medido irradiancia (de noche). La distribución de irradiancias anuales tendrá su máximo en la irradiancia máxima registrada ese año (1188 W/m² para 2024, según datos de “MeteoCarlet”), y estará distribuida desde 0 hasta el tiempo total de sol que haya habido ese año (gráfica 7). Al estar toda la irradiancia representada bajo tiempo de luz solar, la mitad de la irradiancia máxima representará también el valor medio de la irradiancia anual bajo luz solar (gráfica 7). El tiempo de horas de sol a lo largo de ese año se podrá calcular a través de la relación que guardan sus medias.

$$t_{\text{anual}} \cdot G_{\text{media, anual}} = t_{\text{solar}} \cdot G_{\text{media, solar}} = t_{\text{solar}} \cdot \frac{G_{\text{max}}}{2} \quad (46)$$

Si sustituimos los datos de $G_{\text{media, anual}}$ y G_{max} medidos por “MeteoCarlet” se obtiene que en 2024 las horas de sol anuales fueron de 2633 h. Este número estimado de horas solar coincide con los datos de insolación anual en Valencia recogidos de la AEMET (≈ 2600), lo que nos indica que nuestro modelo sinusoidal es una buena aproximación.



Gráfica 7. Distribución anual de la irradiancia en horas de sol, para datos del 2024 (anexo 10)

Para poder visualizar la distribución de irradiancias, se ha programado un código (anexo 10) que pide los datos de irradiancia máxima y media anual, y a partir de únicamente estos datos es capaz de graficar su distribución (gráfica 7). Además, el código realiza el cálculo de horas de sol anuales e irradiancia media bajo horas de sol (594 W/m²) y las muestra por pantalla. Esta función se ha programado con una función seno del siguiente aspecto:

$$G = \frac{G_{max}}{2} \text{sen} \left(\frac{2\pi t}{t_s} - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{G_{max}}{2} = \frac{G_{max}}{2} \text{sen} \left(\frac{\pi t G_{max}}{t_a \cdot G_{med,a}} - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{G_{max}}{2} \quad (47)$$

En esta ecuación t_a indica el tiempo en un año y t_s el tiempo de sol en ese mismo año. Como se puede observar, es un seno desplazado a la derecha (con $-\frac{\pi}{2}$) y hacia arriba, sumándole medio periodo ($\frac{G_{max}}{2}$). Con este ajuste se consigue que el máximo coincida con G_{max} y que tenga un periodo de el tiempo total de sol (t_{solar}).

Ya que se pretende maximizar el tiempo de trabajo de la celda PEM, esta tendrá que trabajar durante el rango más amplio de irradiancias que permitan calentar una cierta masa de agua en el colector solar entre 60 y 80 °C. Esta expresión se obtiene a partir de la ecuación 43.

$$G_{80} - G_{60} = \frac{mc_p(80 - T_i)}{A\eta t} - \frac{mc_p(60 - T_i)}{A\eta t} = m \frac{20c_p}{A\eta t} \quad (48)$$

La ecuación 48 nos muestra como el rango de irradiancias dependerá exclusivamente de la masa, al ser el resto constantes del sistema, y el rango será mayor a una mayor masa. A partir de 2.21 kg (mínimo para que el agua no se evapore), pudiera parecer que una mayor cantidad de agua nos permitiría trabajar una mayor cantidad de horas, ya que la diferencia de irradiancias de operación sería más grande. No obstante, en la gráfica 7 se puede apreciar como las irradiancias más altas también ocurren con menor frecuencia, y por tanto no resulta de interés que la celda trabaje en esos intervalos.

Si se quiere centrar el rango de irradiancias frente a la media, se debe calcular la proporción que existe entre estas. Al trabajar con la proporción se consigue una relación entre los límites del rango que no depende de la masa utilizada.

$$\frac{G_{80}}{G_{60}} = \frac{\frac{mc_p(80 - 19.37)}{A\eta t}}{\frac{mc_p(60 - 19.37)}{A\eta t}} = 1.492 \Rightarrow G_{80} = 1.492 \cdot G_{60} \approx \frac{3}{2} \cdot G_{60} \quad (49)$$

Si imponemos que la media de irradiancias se sitúe en el centro del rango, esta tendrá que valer el valor medio entre sus extremos, y su valor será el de ese valor medio más la irradiancia del extremo inferior, al haberse medirse respecto de esta (ecuación 50). Sabiendo que la irradiancia media en horas de sol es la mitad que el máximo anual podremos despejar la masa que centra la irradiancia de operación con esta media (ecuación 51).

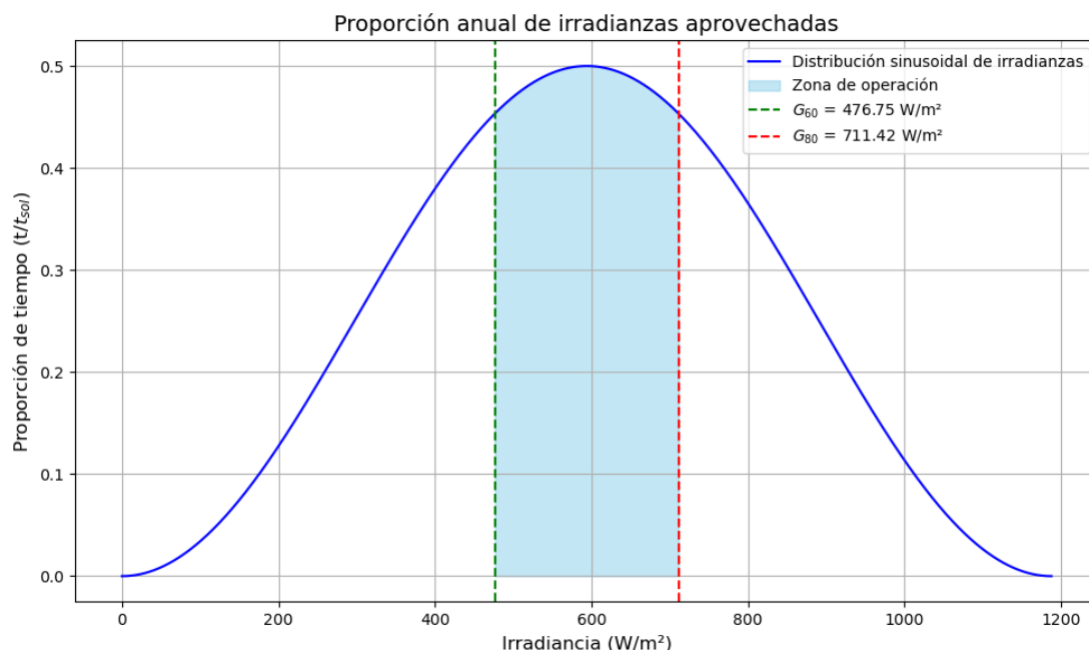
$$\frac{G_{80} - G_{60}}{2} = \frac{\frac{3}{2} \cdot G_{80} - G_{60}}{2} = \frac{G_{60}}{4} \Rightarrow G_{med,sol} = \frac{G_{60}}{4} + G_{60} = \frac{5}{4} G_{60} \quad (50)$$

$$\frac{G_{max}}{2} = \frac{5mc_p(60 - T_i)}{4A\eta t} \Rightarrow m = \frac{4 \cdot A\eta t G_{max}}{10 \cdot c_p(60 - T_i)} = 13.59 \text{ kg} \quad (51)$$

En el anexo 11 se incluye un programa que permite visualizar la proporción de tiempo que supone cada rango de irradiancias, junto con su distribución, en los que operaría una determinada masa que se pedirá introducir, para las condiciones de trabajo de nuestro diseño (entre 60 y 80 °C). El rango de irradiancias en el que operaría esa determinada masa aparece resaltado, frente a la proporción de horas de sol que supone. El programa imprime en la consola los valores de la irradiancia para las temperaturas de interés, el número de las horas que este rango supone y el porcentaje de las horas de sol que representa. Por último, calculará la media de la irradiancia como la media de los puntos de la curva y el número de horas de sol al año como su integral normalizada. Estos dos últimos valores nos sirven para comprobar que el programa está bien diseñado, puesto que son valores que ya se saben de antemano. Este programa tiene los parámetros necesarios en nuestro diseño, pero es adaptable para su uso en cualquier otro, como con temperaturas de trabajo diferentes, por ejemplo. El valor de los tiempos asociados a la irradiancia utilizados en el anexo 11 son los siguientes:

$$t_G = \frac{t_{sol}}{4} \text{sen} \left(\frac{2\pi G}{G_{max}} - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{t_{sol}}{4} = \frac{t_{sol}}{4} \text{sen} \left(\frac{2\pi mc_p \Delta T}{3600 \cdot A\eta G_{max}} - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{t_{sol}}{4} \quad (52)$$

Donde se dividió por t_{sol} a la hora de graficarlo para que mostrase la proporción a la que se refería. Para la masa obtenida en la ecuación 51, se consigue un número de horas de irradiancia aprovechada de 1007 h, lo que supone un 38.26 % respecto al total de horas de sol (gráfica 8).



Gráfica 8. Proporción de tiempo solar para el rango de irradiancias de $m = 13.59$ kg, junto con el valor de los extremos del intervalo. Representa una cantidad de 1007 h (anexo 11).

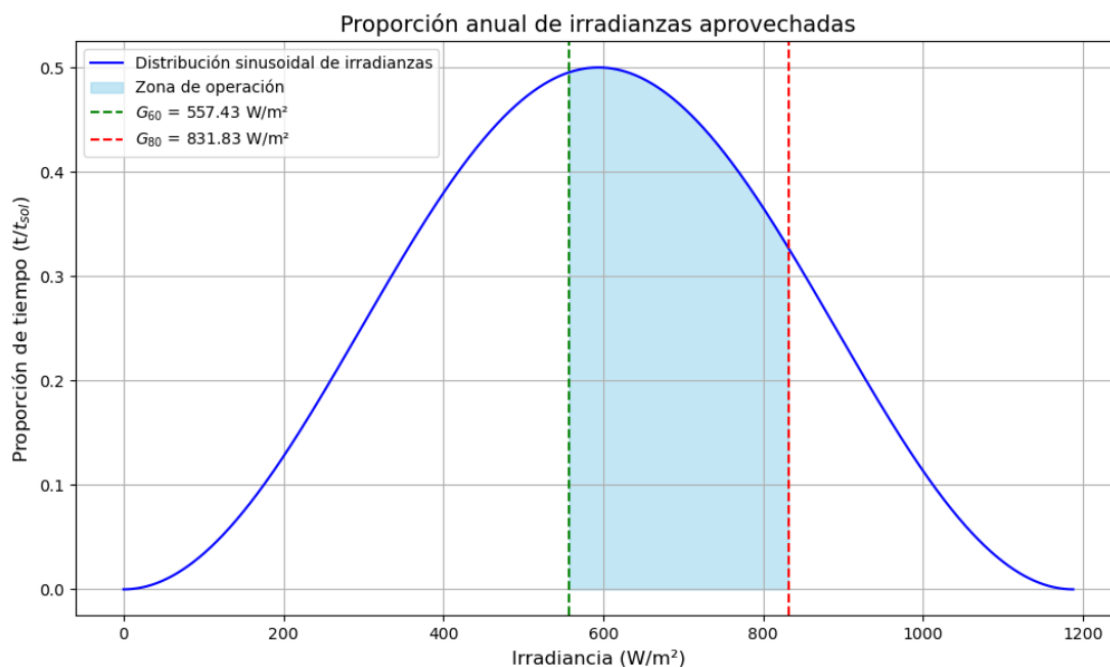
Sin embargo, el área representada en la gráfica 8 no es el máximo tiempo de operación que podemos obtener para una determinada masa. Para obtener este valor, tendremos que derivar la diferencia entre el tiempo asociado a G_{80} menos el de G_{60} respecto de la masa e igualar a 0 para obtener el máximo (ecuación 53). Esta derivada no tiene una solución analítica, y debe resolverse mediante métodos numéricos.

$$\frac{d(t_{G80} - t_{G60})}{dm} = 0 \Rightarrow \Delta T_{80} \cdot \text{sen}(Km\Delta T_{80}) = \Delta T_{60} \cdot \text{sen}(Km\Delta T_{60}) \quad (53)$$

$$K = \frac{2\pi c_p}{3600 \cdot A\eta G_{max}} \quad (54)$$

Para resolverlo, se hizo un programa que realizase la derivada numéricamente (anexo 12). Este programa compara la diferencia de tiempos asociados a la temperatura máxima y mínima realizando la integral del área de la función 52. Esta integral la realiza para pequeñas diferencias en la masa, hasta que encuentra un 0 en la integral. El programa graficará los resultados numéricos de la derivada para que se pueda observar su tendencia. Para que pueda usarse con diferentes rangos de temperatura, estos valores los pedirá por teclado. En nuestro rango de temperaturas, el programa estimó que el valor de la masa que maximizaba las horas de trabajo era de 15.89 kg. Esta determinada cantidad de agua se situaría en el foco del colector solar, en una esfera de 15.61 cm de radio centrada en el foco. La proporción de tiempo asociada a el

rango de irradiancias determinada por esta masa lo representaremos en la gráfica 9, utilizando el programa del anexo 11.



Gráfica 9. Proporción de tiempo solar para el rango de irradiancias de $m = 15.89 \text{ kg}$, junto con el valor de los extremos del intervalo. Representa una cantidad de 1087 h (anexo 11).

El tiempo de trabajo entre los rangos de irradiancia propios de esta masa ($G_{60} = 557.43 \text{ W/m}^2$ y $G_{80} = 831.83 \text{ W/m}^2$), fue de 1087 h, lo que supone un 41.30 % respecto del total de horas de sol. Por tanto, para el resto del trabajo consideraremos que estaremos trabajando en una irradiancia definida por estos dos extremos.

6.3 Bomba y tanque de agua

Para que el agua fluya a lo largo del sistema, se hará uso de una bomba peristáltica que mantenga el agua en movimiento. Esta clase de bombas son capaces de mover agua incluso a potencias muy bajas, pero a menor velocidad (Argaw et al., 2003). Esto nos resultará idóneo para que opere con la energía provista de la placa fotovoltaica.

La bomba de agua que utilicemos tendrá que ser capaz de mover los 15.89 kg de agua del foco del colector una vez cada hora para que no se sobrecaliente. Para ello, la bomba será capaz de manejar un caudal de 264.83 mL/min. La bomba de referencia que se tomará para este trabajo

será la Bomba peristáltica V6-6L de la empresa. Esta bomba trabaja en un rango de flujo de 0.3 a 6000 ml/min, puede operar hasta los 3 bares de presión y tiene un consumo de energía menor a los 80 W. La potencia que necesitaremos aplicar a nuestra bomba vendrá determinada por la ecuación 55.

$$P = Q \cdot \Delta P = Q \cdot \rho g \Delta h \quad (55)$$

En esta ecuación Q representa el caudal (m^3/s) y ΔP es el incremento de presiones, que vendrá determinado por la presión hidrostática del agua, que es el producto de la gravedad, la densidad y la diferencia de alturas a lo largo del circuito del agua. Al poder trabajar la bomba de Drifton a una presión de 30 bares, se situará un gran depósito de agua a una determinada altura, de manera que el agua al llegar al electrolizador ya se encuentre ligeramente presurizada. Por tanto, la potencia mínima que tendremos que suministrar a nuestra bomba será de:

$$P = 4.41 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 = 0.88 \text{ W} \quad (56)$$

Para conseguir esta presión de 3 bares (2 bares de presión hidrostática más uno de la atmosférica), será necesario que el tanque de agua se encuentre a una altura de 20.41 m con respecto de la bomba. La potencia tan reducida necesaria para la bomba nos asegurará un flujo constante de agua, que permitirá la correcta recogida de los gases producidos en el electrolizador.

La cantidad mínima de agua que se colocará en el tanque será la misma cantidad de agua que se consuma a lo largo del año. En la ecuación 1, donde se muestra la reacción de la electrólisis, se puede observar como por cada mol de agua reaccionante se producirá otro mol de H_2 , por tanto, a lo largo de la electrólisis se mantendrá que $n_{H_2} = n_{H_2O}$. Al ya saber cuál es el ritmo de producción de volumen normalizado de hidrógeno (tabla 3), lo podremos relacionar con el ritmo en el que se consume una determinada masa de agua. Si escribimos el número de moles que hay en un determinado volumen de hidrógeno en condiciones normales de presión y temperatura (CNPT), es decir, a 0 °C y 1 atm (ecuación 58); podremos relacionarlos con la masa que tiene ese mismo número de moles de agua (ecuación 57).

$$n_{H_2} = n_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{M_{H_2O}} = \frac{m_{H_2O}}{18,02} \quad (57)$$

$$n_{H_2} = \frac{PV_{normal,H_2}}{TR} = \frac{101325}{273.15 \cdot 8.31} \cdot V_{H_2} = 44.64 \cdot V_{H_2} \quad (58)$$

$$\frac{m_{H_2O}}{18,02 \cdot 10^{-3}} = 44.64 \cdot V_{H_2} \Rightarrow m_{H_2O} = 0.804 \cdot V_{H_2} = 0.804 \cdot 0.452 = 0.363 \text{ (kg/h)} \quad (59)$$

En estas ecuaciones, M_{H_2O} representa la masa molar del agua en g/mol y las unidades utilizadas para R son $m^3 Pa / K mol$. En la ecuación 58 se ha utilizado el valor máximo de producción de H_2 para que en el tanque siempre haya la cantidad suficiente de agua que se pueda necesitar, incluso trabajando a máximo rendimiento. Considerando las 1087 horas de trabajo a lo largo del año (gráfica 9), la cantidad mínima de agua que se colocará en el tanque será de 394.58 kg.

6.4 Placa fotovoltaica

La placa fotovoltaica suministrará energía a todo el sistema, y tendrá que ser capaz de aportar la potencia necesaria para que funcionen correctamente todos los componentes del sistema, es decir, será igual a la suma de la potencia de cada componente (ecuación 60)

$$P_{Psolar} = P_{PEM} + P_{bomba} + P_{seguidor} = VI + P_b = VJA_{PEM} + P_b = G\eta_{Ps}A_{Ps} \quad (60)$$

La potencia del seguidor solar se ha despreciado frente al resto, al requerir muy poca potencia para su velocidad de movimiento (de traslación y rotación de la Tierra). Los valores de la potencia de la celda PEM los obtendremos de los datos expuestos en la tabla 3. Los términos η_{Ps} y A_{Ps} hacen referencia a la eficiencia y el área de la placa solar respectivamente. Se considerarán los datos de la placa fotovoltaica del modelo Tiger Neo 66HC, producido por la empresa Jinko Solar. Esta cuenta con una eficiencia de 23.51% y con unas dimensiones de 2382x1134 mm, lo que se traduce en un área de 2.7 m^2 .

La potencia que suministrará la placa solar será la que se obtenga bajo nuestro rango de irradiancias, $G_{60} = 557.43 W/m^2$ y $G_{80} = 831.83 W/m^2$. Esto quiere decir que la placa proporciona una potencia de entre $P_{60} = 353.69 W$ y $P_{80} = 527.8 W$ para el intervalo de la temperatura de trabajo. A fin maximizar la eficiencia (ecuación 19), se tendrá que fijar el potencial en el mínimo al que pueda trabajar el electrolizador (1.63 V de la tabla 3), utilizando un convertidor DC/DC regulado en tensión. Si además el hidrógeno se produjese directamente presurizado, le tendremos que añadir el potencial de Nerst (ecuación 40) al potencial mínimo de la tabla 3. Sustituyendo en la ecuación 40 por la temperatura mínima de trabajo, los 3 bares del agua y los 40 bares máximos que soporta nuestro electrolizador; el potencial mínimo que impondremos en el sistema será de 1.67 V. El resto de la potencia se aportará en forma de densidad de corriente, y variará entre 0.43 y 0.64 A/ cm^2 para 60 y 80 °C respectivamente.

6.5 Resultados y limitaciones

En estas condiciones ideales, la célula solar podría trabajar de manera autónoma 1087 horas al año a la máxima eficiencia posible, al fijar el potencial en el mínimo del fabricante. Por tanto, en un año este sistema será capaz de producir 491.32 Nm³ de hidrógeno (43.87 kg). Además, el oxígeno producido en la celda PEM sería recogido por el flujo de agua e impulsado hasta el tanque por la bomba. En un año, se producirían en torno a 350.71 kg de O₂ (aplicando conservación de la masa) que se separarían del agua en el tanque, donde se podría almacenar para darle un propósito posterior, como en bombonas de oxígeno para uso médico, por ejemplo.

Cuando la irradiancia solar es alta, la energía solar producida en España puede superar a la demanda energética, especialmente en zonas aisladas a la red. Como nuestro diseño trabaja a irradiancias, mayores que el promedio anual, estos excedentes energéticos se utilizarían para la producción de H₂. Este gas puede utilizarse posteriormente como combustible, permitiendo que la energía solar que no se aproveche se guarde en los enlaces del hidrógeno a modo de “pila” hasta su combustión. En momentos donde la irradiancia solar sea baja, y por tanto la demanda de esta energía sea alta, nuestro diseño vertería la potencia recogida a la red, ya que el electrolizador no estaría en funcionamiento al no poderse alcanzar su temperatura mínima.

El modelo que se ha diseñado permite estudiar la viabilidad conceptual de la integración de un electrolizador PEM para la producción de hidrógeno con la energía suministrada por una placa fotovoltaica de manera esquemática. Sin embargo, el diseño ha asumido condiciones ideales y se han despreciado pérdidas eléctricas o térmicas para obtener un análisis inicial simplificado. En el sistema se ha supuesto flujos constantes, irradiancias predecibles y eficiencias idóneas. Además, no se ha tenido en cuenta la relación de la potencia de la celda de la forma $P = V(I) \cdot I$, la dependencia de la presión y temperatura en el voltaje y los sobrepotenciales de la celda. Es por ello que, aunque el modelo y la integración es correcta, los valores numéricos obtenidos sólo serán realistas en la situación ideal.

Capítulo 7. CONCLUSIONES

Este trabajo ha consistido en un análisis detallado sobre el funcionamiento del proceso electroquímico de la electrólisis, motivado por su creciente relevancia en la transición a energías limpias y renovables. A lo largo del trabajo se ha explicado los principios químicos y termodinámicos de su funcionamiento, así como los factores físicos que afectan a su eficiencia, como la presión o la temperatura. Posteriormente, se expusieron las distintas tecnologías para las electrólisis actuales, explicando las peculiaridades de cada una y los materiales empleados en su fabricación. Se realizó una comparación de las distintas tecnologías comparando los puntos fuertes y desventajas que presentaba cada una. Para destacar el papel que puede ejercer la electrólisis en la descarbonización, se propuso un diseño en el que se produjese hidrógeno verde a partir de la energía solar, tanto para elevar la temperatura a un valor determinado como para el aporte eléctrico necesario para que se llevase a cabo la electrólisis.

Durante el desarrollo de este trabajo, se implementaron diversos programas para apoyar los conceptos explicados. Se reforzaron las ideas explicadas con diversas gráficas, que permiten al lector entender y cuantificar rápidamente la influencia de determinados parámetros en la electrólisis. Se diseñó un programa que determina el voltaje que necesita la celda electrolítica en base a las condiciones de presión ante temperatura que se introduzcan, así como el cambio de temperatura que hay que aplicar antes un cambio de presión para que el voltaje del sistema no varíe. Se realizó un modelo matemático y computacional para estimar la distribución anual de irradiancias en horas de sol. Este modelo fue capaz de predecir adecuadamente el número de horas de sol en una determinada zona de España (en torno a 2600 horas de insolación anual en la localidad de Carlet, Valencia). Bajo este modelo, se utilizaron dos programas complementarios: uno que indicase el tiempo en el que se podría mantener una determinada masa de agua entre dos temperaturas de operación, para la masa elegida por el usuario; y otro que determina la masa necesaria para maximizar el tiempo de operación entre dos temperaturas cualesquiera, realizando numéricamente una derivada no analítica. Todos los programas que se aportaron son fácilmente modificables, de manera que cualquier lector los pueda utilizar y particularizar para un caso en concreto.

Tras la explicación detallada del funcionamiento y componentes de cada tecnología electrolítica, se pudo realizar una comparación de sus características propias y las limitaciones de cada una. A partir de esta comparación, se seleccionó la electrólisis PEM para su integración autónoma con la energía solar. El diseño que se propuso contaba con un tanque de agua a cierta altura; un colector solar que precalentase el agua a una determinada temperatura; la celda PEM, que separase la molécula de agua en sus componentes elementales; una bomba de agua, que devolviese esta al tanque junto con el oxígeno producido; y una placa fotovoltaica, que suministrase energía eléctrica a todo el sistema.

Con este capítulo, se pretende ilustrar conceptualmente la producción de hidrógeno verde de manera descentralizada, junto con los parámetros mínimos necesarios para su puesta en marcha. Se modelizó el sistema para que fuese capaz de trabajar el mayor tiempo posible bajo la distribución de irradiancias previamente modelizada. Se determinó que, localizando 15.89 kg de agua cada hora en el foco del colector solar, se lograba obtener el máximo tiempo de operación, un total de 1087 horas, las cuales representan un 41.30 % del tiempo de insolación anual. De esta forma, se demostró la capacidad máxima de producción de hidrógeno para un electrolizador PEM que funcionase únicamente a partir de energía solar. Para mayor rigurosidad, se utilizaron valores reales de componentes comercializables, lo que favorece su puesta en práctica y aporta realismo a los parámetros utilizados en cada parte del sistema.

Para nuestro modelado se obviaron diversos aspectos técnicos, como sistemas de control o pérdidas energéticas, y se realizó un modelo ideal. Para futuras líneas de investigación, este trabajo puede sentar las bases que permitan un modelado más preciso, teniendo en cuenta una relación más detallada entre las variables de sistema, pérdidas energéticas o de eficiencia. Además, para una correcta puesta en práctica, cobran relevancia detalles sobre el diseño, como las dimensiones, pesos o integración estructural de todas las partes del modelo. El precio de cada componente y la optimización de su coste también es un aspecto esencial para su puesta en práctica, pero este no se tuvo en cuenta puesto que se pretendía explicar únicamente el funcionamiento del diseño.

Otra posible línea de investigación sobre el trabajo ya realizado consistiría en el aumento del intervalo de temperaturas y presiones admitido por el electrolizador. La ampliación del rango de temperaturas permitiría a la celda un mayor tiempo de operación anual y la obtención de eficiencias mayores, resultando en una mayor producción de hidrógeno verde. Por otra parte, los avances del presurizado de hidrógeno en el momento de su producción, evita compresiones posteriores y facilita la aplicación directa del gas obtenido.

Asimismo, el diseño que se ha empleado solo hace uso de la electrólisis PEM, pero podría adaptarse a otras tecnologías electrolíticas. En futuros trabajos, se podría modelar la integración de otras celdas para estudiar su comportamiento, y comprobar si estas tienen respuestas más satisfactorias para determinados parámetros. De la misma manera que se pueden utilizar otros electrolizadores, también es posible el uso de otras fuentes de energía, como la eólica o hidroeléctrica, que requerirían su modelado particular. Si se aborda la generación de hidrógeno verde desde distintos ámbitos será posible encontrar distintos nichos donde se pueda aplicar la electrólisis, permitiendo que se reduzca la dependencia de combustibles fósiles para la producción de este gas.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- Agrawal, D., Mahajan, N., Singh, S. A., & Sreedhar, I. (2024). Green hydrogen production pathways for sustainable future with net zero emissions. *Fuel*, 359, 130131.
- Argaw, N., Foster, R., & Ellis, A. (2003). *Renewable Energy for Water Pumping Applications In Rural Villages; Period of Performance: April 1, 2001--September 1, 2001*
- ASIT. (2022). *Guía Técnica de Energía Solar Térmica*. NIPO: 665-20-092-8
- Aziz, M., Amrite, A., Aryal, U. R., & Prasad, A. K. (2025). Electrochemical Hydrogen Separation and Compression. *Journal of Applied Electrochemistry*.
- Brzezina, J. (s. f.). *MeteoCarlet*. MeteoCarlet. Recuperado 2 de julio de 2025, de <https://www.meteocarlet.com>
- Cai, Q., Hong, W., Jian, C., He, X., & Liu, W. (2023). Recent Development of Self-Supported Alkaline Hydrogen Evolution Reaction Electrocatalysts for Industrial Electrolyzer. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 4(6), 2200178.
- Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(12), 4901-4934.
- Chen, P., & Hu, X. (2020). High-Efficiency Anion Exchange Membrane Water Electrolysis Employing Non-Noble Metal Catalysts. *Advanced Energy Materials*, 10(39), 2002285.
- David, M., Ocampo-Martínez, C., & Sánchez-Peña, R. (2019). Advances in alkaline water electrolyzers: A review. *Journal of Energy Storage*, 23, 392-403.
- Du, N., Roy, C., Peach, R., Turnbull, M., Thiele, S., & Bock, C. (2022). Anion-Exchange Membrane Water Electrolyzers. *Chemical Reviews*, 122(13), 11830-11895.
- Electrolyzers: The tools to turn hydrogen green*. (s. f.). Chemical & Engineering News. Recuperado 17 de junio de 2025, de <https://cen.acs.org/materials/electronic-materials/Electrolyzers-tools-turn-hydrogen-green/101/i21>
- El-Shafie, M. (2023). Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review. *Results in Engineering*, 20, 101426.
- Espiritu, R., Golding, B. T., Scott, K., & Mamlouk, M. (2017). Degradation of radiation grafted hydroxide anion exchange membrane immersed in neutral pH: Removal of vinylbenzyl trimethylammonium hydroxide due to oxidation. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(3), 1248-1267.
- Estufa De Agua Solar Plegable Portátil Para El Hogar Cocina Solar Parabólica De Condensación Sin Combustible* (s. f.). www.alibaba.com. Recuperado 2 de julio de 2025, de

https://www.alibaba.com/product-detail/Portable-Foldable-Household-Solar-Water-Stove_1600459789975.html

- Flis, G. (2023). *Solid Oxide Electrolysis: A Technology Status Assessment*.
- Ghorui, U. K., Sivaguru, G., Teja, U. B., M, A., Ramakrishna, S., Ghosh, S., Dalapati, G. K., & Chakraborty, S. (2024). Anion-Exchange Membrane Water Electrolyzers for Green Hydrogen Generation: Advancement and Challenges for Industrial Application. *ACS Applied Energy Materials*, 7(18), 7649-7676.
- Givirovskiy, G., Ruuskanen, V., Ojala, L. S., Lienemann, M., Kokkonen, P., & Ahola, J. (2019). Electrode material studies and cell voltage characteristics of the in situ water electrolysis performed in a pH-neutral electrolyte in bioelectrochemical systems. *Heliyon*, 5(5), e01690.
- Godula-Jopek, A. (Ed.). (2015). *Hydrogen Production: Electrolysis* (1.ª ed.). Wiley.
- Gómez, M. J. (2022). *Desarrollo de nuevos materiales para la producción de hidrógeno de electrolizadores alcalinos*. <http://hdl.handle.net/11086/28539>
- González Rodríguez, R. (s. f.). Diseño de electrolizador con eficiencia óptima para la generación de hidrógeno industrial.
- Hammoudi, M., Henao, C., Agbossou, K., Dubé, Y., & Doumbia, M. L. (2012). New multi-physics approach for modelling and design of alkaline electrolyzers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(19), 13895-13913.
- Hancke, R., Holm, T., & Ulleberg, Ø. (2022a). The case for high-pressure PEM water electrolysis. *Energy Conversion and Management*, 261, 115642.
- Hancke, R., Holm, T., & Ulleberg, Ø. (2022b). The case for high-pressure PEM water electrolysis. *Energy Conversion and Management*, 261, 115642.
- Henkensmeier, D., Cho, W.-C., Jannasch, P., Stojadinovic, J., Li, Q., Aili, D., & Jensen, J. O. (2024). Separators and Membranes for Advanced Alkaline Water Electrolysis. *Chemical Reviews*, 124(10), 6393-6443.
- Henkensmeier, D., Najibah, M., Harms, C., Žitka, J., Hnát, J., & Bouzek, K. (2021). Overview: State-of-the Art Commercial Membranes for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 18(2), 024001.
- Highest Optical efficiency ever achieved for a solar collector. (s. f.). *Absolicon*. Recuperado 2 de julio de 2025, de <https://www.absolicon.com/t160-technology/optical-efficiency/>
- Hydrogen Innovation GmbH. (s. f.). *PEM Electrolyser Stack—Storager 40 bar*. <https://hyfindr.com/en/shop/products/pem-electrolyser-stack-storager-40-bar>
- IEA. (2022). *Global Hydrogen Review 2022*. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>

- J. Smith, P. (2021). *Effect of Reactant Pressure on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance*. NASA/TP-20205011192
- Jinko Solar-Tiger Neo. (s. f.). Recuperado 2 de julio de 2025, de <https://www.jinkosolar.com/en/site/tigerneo#s7>
- Laguna-Bercero, M. A. (2012). Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review. *Journal of Power Sources*, 203, 4-16.
- Lamy, C., & Millet, P. (2020). A critical review on the definitions used to calculate the energy efficiency coefficients of water electrolysis cells working under near ambient temperature conditions. *Journal of Power Sources*, 447, 227350.
- Lee, Y., Lee, W., & Kim, T. (2024). Enhancing the durability of anion exchange membrane water electrolysis cells via interfacial membrane–ionomer crosslinking. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 45(7), 620-630.
- Lehner, M., Tichler, R., Steinmüller, H., & Koppe, M. (2014). Water Electrolysis. En M. Lehner, R. Tichler, H. Steinmüller, & M. Koppe, *Power-to-Gas: Technology and Business Models* (pp. 19-39). Springer International Publishing.
- Lei, J., Wang, Z., Zhang, Y., Ju, M., Fei, H., Wang, S., Fu, C., Yuan, X., Fu, Q., Farid, M. U., Kong, H., An, A. K., Deng, R., Liu, F., & Wang, J. (2024). Understanding and resolving the heterogeneous degradation of anion exchange membrane water electrolysis for large-scale hydrogen production. *Carbon Neutrality*, 3(1), 25.
- Li, R., Lu, Y., Yu, Y., Ren, X., Ding, F., Guan, C., & Wang, J. (2023). Investigation on Long-Term Stability of Vermiculite Seals for Reversible Solid Oxide Cell. *Molecules*, 28(3), 1462.
- Li, W., Tian, H., Ma, L., Wang, Y., Liu, X., & Gao, X. (2022). Low-temperature water electrolysis: Fundamentals, progress, and new strategies. *Materials Advances*, 3(14), 5598-5644.
- Liu, C., Geng, Z., Wang, X., Liu, W., Wang, Y., Xia, Q., Li, W., Jin, L., & Zhang, C. (2024). Development of advanced anion exchange membrane from the view of the performance of water electrolysis cell. *Journal of Energy Chemistry*, 90, 348-369.
- Liu, L., Ma, H., Khan, M., & Hsiao, B. S. (2024). Recent Advances and Challenges in Anion Exchange Membranes Development/Application for Water Electrolysis: A Review. *Membranes*, 14(4), 85.
- Łosiewicz, B. (2024). Technology for Green Hydrogen Production: Desk Analysis. *Energies*, 17(17), 4514.
- Luo, S., Zhang, T., Xu, H., Zhang, J., Zhao, H., Yun, J., & Zhao, H. (2024). Optimizing Alkaline Water Electrolysis: A Dual-Model Approach for Enhanced Hydrogen Production Efficiency. *Energies*, 17(21), 5512.

- Luo, X., Lau, G., Tesfaye, M., Arthurs, C. R., Cordova, I., Wang, C., Yandrasits, M., & Kusoglu, A. (2021). Thickness Dependence of Proton-Exchange-Membrane Properties. *Journal of The Electrochemical Society*, 168(10), 104517.
- Mazloomi, S. K., & Sulaiman, N. (2012). Influencing factors of water electrolysis electrical efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 4257-4263.
- Md Mamoon, R. (2015). *Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis. Volume-4 Issue-3.*
- Meteorología, A. E. de. (s. f.). *Valores climatológicos normales—Agencia Estatal de Meteorología—AEMET. Gobierno de España.* Recuperado 2 de julio de 2025, de <https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?k=val>
- Min, G., Choi, S., & Hong, J. (2022). A review of solid oxide steam-electrolysis cell systems: Thermodynamics and thermal integration. *Applied Energy*, 328, 120145.
- M.S. Sohal, J.E. O'Brien, C.M. Stoots, J. J. Hartvigsen, D. Larsen, S. Elangovan, J.S. Herring, J.D. Carter, V.I. Sharma, & B. Yildiz. (2009). *Critical Causes of Degradation in Integrated Laboratory Scale Cells during High Temperature Electrolysis*
- Mustain, W. E., Chatenet, M., Page, M., & Kim, Y. S. (2020). Durability challenges of anion exchange membrane fuel cells. *Energy & Environmental Science*, 13(9), 2805-2838.
- Nagai, N. (2003). Existence of optimum space between electrodes on hydrogen production by water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(1), 35-41.
- Nikiforov, A. V., Petrushina, I. M., Christensen, E., Tomás-García, A. L., & Bjerrum, N. J. (2011). Corrosion behaviour of construction materials for high temperature steam electrolyzers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(1), 111-119.
- Ozcan, H., El-Emam, R. S., Celik, S., & Amini Horri, B. (2023). Recent advances, challenges, and prospects of electrochemical water-splitting technologies for net-zero transition. *Cleaner Chemical Engineering*, 8, 100115.
- Qi, R., Gao, X., Lin, J., Song, Y., Wang, J., Qiu, Y., & Liu, M. (2021). Pressure control strategy to extend the loading range of an alkaline electrolysis system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(73), 35997-36011.
- Qureshi, F., Yusuf, M., Arham Khan, M., Ibrahim, H., Ekeoma, B. C., Kamyab, H., Rahman, M. M., Nadda, A. K., & Chelliapan, S. (2023). A State-of-The-Art Review on the Latest trends in Hydrogen production, storage, and transportation techniques. *Fuel*, 340, 127574.
- Ross, B., Haussener, S., & Brinkert, K. (2025). Impact of Gas Bubble Evolution Dynamics on Electrochemical Reaction Overpotentials in Water Electrolyser Systems. *The Journal of Physical Chemistry C*, 129(9), 4383-4397.

- Şahin, M. E. (2024). An Overview of Different Water Electrolyzer Types for Hydrogen Production. *Energies*, *17*(19), 4944.
- Santos, A. L., Cebola, M.-J., & Santos, D. M. F. (2021). Towards the Hydrogen Economy—A Review of the Parameters That Influence the Efficiency of Alkaline Water Electrolyzers. *Energies*, *14*(11), 3193.
- Sayma, A. (s. f.). *OPTIMISED MICROTURBINE SOLAR POWER SYSTEM*.
- Sebbahi, S., Assila, A., Alaoui Belghiti, A., Laasri, S., Kaya, S., Hlil, E. K., Rachidi, S., & Hajjaji, A. (2024). A comprehensive review of recent advances in alkaline water electrolysis for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, *82*, 583-599.
- Shih, A. J., Monteiro, M. C. O., Dattila, F., Pavesi, D., Philips, M., Da Silva, A. H. M., Vos, R. E., Ojha, K., Park, S., Van Der Heijden, O., Marcandalli, G., Goyal, A., Villalba, M., Chen, X., Gunasooriya, G. T. K. K., McCrum, I., Mom, R., López, N., & Koper, M. T. M. (2022). Water electrolysis. *Nature Reviews Methods Primers*, *2*(1), 84.
- Shiva Kumar, S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, *2*(3), 442-454.
- Shiva Kumar, S., & Lim, H. (2022). An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy Reports*, *8*, 13793-13813.
- Singhal, S. (2000). Advances in solid oxide fuel cell technology. *Solid State Ionics*, *135*(1-4), 305-313.
- Sood, S., Prakash, O., Boukerdja, M., Dieulot, J.-Y., Ould-Bouamama, B., Bressel, M., & Gehin, A.-L. (2020). Generic Dynamical Model of PEM Electrolyser under Intermittent Sources. *Energies*, *13*(24), 6556.
- Squadrito, G., Maggio, G., & Nicita, A. (2023). The green hydrogen revolution. *Renewable Energy*, *216*, 119041.
- Suermann, M., Schmidt, T. J., & Büchi, F. N. (2016). Overpotential Analysis in High Pressure Water Electrolysis. *ECS Meeting Abstracts*, *MA2016-02*(38), 2407-2407.
- Ulleberg, O. (2003). Modeling of advanced alkaline electrolyzers: A system simulation approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, *28*(1), 21-33.
- Ursua, A., Gandia, L. M., & Sanchis, P. (2012). Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends. *Proceedings of the IEEE*, *100*(2), 410-426.
- V6-6L - Potente bomba peristáltica con función de flujo y de dosificación ¡Compre aquí! (s. f.). Recuperado 2 de julio de 2025, de <https://drifton.es/tienda-online/11-bomba-peristaacuteltica-industrial/2053-bomba-peristaacuteltica-v6-6l/>
- Villagra, A., & Millet, P. (2019). An analysis of PEM water electrolysis cells operating at elevated current densities. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(20), 9708-9717.

- Vincent, I., & Bessarabov, D. (2018). Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*, 1690-1704.
- Vinchhi, P., Khandla, M., Chaudhary, K., & Pati, R. (2023). Recent advances on electrolyte materials for SOFC: A review. *Inorganic Chemistry Communications*, *152*, 110724.
- Vinodh, R., Kalanur, S. S., Natarajan, S. K., & Pollet, B. G. (2023). Recent Advancements of Polymeric Membranes in Anion Exchange Membrane Water Electrolyzer (AEMWE): A Critical Review. *Polymers*, *15*(9), 2144.
- Wang, C. R., Stansberry, J. M., Mukundan, R., Chang, H.-M. J., Kulkarni, D., Park, A. M., Plymill, A. B., Firas, N. M., Liu, C. P., Lang, J. T., Lee, J. K., Tolouei, N. E., Morimoto, Y., Wang, C., Zhu, G., Brouwer, J., Atanassov, P., Capuano, C. B., Mittelsteadt, C., ... Zenyuk, I. V. (2025). Proton Exchange Membrane (PEM) Water Electrolysis: Cell-Level Considerations for Gigawatt-Scale Deployment. *Chemical Reviews*, *125*(3), 1257-1302.
- Wang, M., Wang, Z., Gong, X., & Guo, Z. (2014). The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *29*, 573-588.
- Wang, T., Cao, X., & Jiao, L. (2022). PEM water electrolysis for hydrogen production: Fundamentals, advances, and prospects. *Carbon Neutrality*, *1*(1), 21.
- Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., & Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *146*, 111180.
- Zeng, K., & Zhang, D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, *36*(3), 307-326.
- Zhang, K., Liang, X., Wang, L., Sun, K., Wang, Y., Xie, Z., Wu, Q., Bai, X., Hamdy, M. S., Chen, H., & Zou, X. (2022). Status and perspectives of key materials for PEM electrolyzer. *Nano Research Energy*, *1*, e9120032.
- Zhang, M., Wang, E., Mao, J., Wang, H., Ouyang, M., & Hu, H. (2022). Performance analysis of a metal-supported intermediate-temperature solid oxide electrolysis cell. *Frontiers in Energy Research*, *10*, 888787.
- Zhegur, A., Gjineci, N., Willdorf-Cohen, S., Mondal, A. N., Diesendruck, C. E., Gavish, N., & Dekel, D. R. (2020). Changes of Anion Exchange Membrane Properties During Chemical Degradation. *ACS Applied Polymer Materials*, *2*(2), 360-367.

Capítulo 9. ANEXOS

9.1 Gráfica 1. Contribuciones al voltaje de electrólisis del agua

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# Constantes físicas
F = 96485 # C/mol
R = 8.314 # J/mol·K
T = 298.15 # K
# Parámetros electroquímicos
j0 = 0.001 # A/cm^2
alpha = 0.5
sigma = 0.3 # S/cm
d = 0.5 # cm
# Resistencia óhmica
R_ohmic = d / sigma # ohm
# Voltajes estándar
E_rev = 1.229 # V (potencial reversible, LHV) ec 10
E_tn = 1.481 # V (voltaje termoneutral, HHV) ec 11
# Rango de corriente (A)
I = np.linspace(0.001, 0.5, 300) # A
# Sobrepotencial de activación (logaritmo natural)
eta_act = (2.3 * R * T) / (alpha * F) * np.log(I / j0) # ec 17
# Sobrepotencial óhmico
eta_ohm = I * R_ohmic # ec 13
# Voltaje total aplicado
U = E_rev + eta_ohm + eta_act # ec 18
# Líneas constantes para voltajes de referencia
```

```
E_rev_line = np.full_like(I, E_rev)
E_tn_line = np.full_like(I, E_tn)
# Gráfica
plt.figure(figsize=(10, 6))
# Curvas
plt.plot(I, U, label='Voltaje total de celda $U^\circ$', color='blue', linewidth=2)
plt.plot(I, eta_act, label='Sobrepotencial de activación $V_{\{act\}}$', color='orange')
plt.plot(I, eta_ohm, label='Sobrepotencial óhmico $V_{\{ohm\}}$', color='purple')
# Líneas de referencia
plt.plot(I, E_rev_line, 'g--', label='Voltaje reversible (E°, 1.229 V)')
plt.plot(I, E_tn_line, 'r--', label='Voltaje termoneutral (V°, 1.481 V)')
# Estética
plt.xlabel('Densidad de corriente (A/$cm^2$)', fontsize=12)
plt.ylabel('Voltaje de celda (V)', fontsize=12)
plt.title('Contribuciones al voltaje de electrólisis del agua', fontsize=14)
plt.grid(True)
plt.legend(fontsize=8.5)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

9.2 Gráfica 2. Eficiencias vs Densidad de corriente

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# Constantes físicas
F = 96485 # C/mol
R = 8.314 # J/mol·K
T = 298.15 # K
# Parámetros electroquímicos
j0 = 0.001 # A/cm^2
```

```
alpha = 0.5
sigma = 0.3 # S/cm
d = 0.5 # cm
# Resistencia óhmica
R_ohmic = d / sigma # ohm
# Voltajes estándar
E_rev = 1.229 # V (potencial reversible, LHV) ec 10
E_tn = 1.481 # V (voltaje termoneutral, HHV) ec 11
# Rango de corriente (A)
I = np.linspace(0.001, 0.5, 300) # A
# Sobrepotencial de activación (logaritmo natural)
eta_act = (2.3 * R * T) / (alpha * F) * np.log(I / j0) # ec 17
# Sobrepotencial óhmico
eta_ohm = I * R_ohmic # ec 13
# Voltaje total aplicado
U = E_rev + eta_ohm + eta_act # ec 18
# Eficiencias
Ef_elect = E_rev / U * 100
Ef_tn = E_tn / U * 100
# Gráfica
plt.figure(figsize=(10, 6))
# Curvas
plt.plot(I, Ef_elect, label='Eficiencia eléctrica  $\eta_{\text{electrical}}$ ', color='blue')
plt.plot(I, Ef_tn, label='Eficiencia termoneutral  $\eta_{\text{thermal}}$ ', color='green')
# Estética
plt.xlabel('Densidad de corriente (A/cm2)', fontsize=12)
plt.ylabel('Eficiencia de la celda (%)', fontsize=12)
plt.title('Eficiencias (%) VS Densidad de corriente (A/cm2)', fontsize=14)
plt.grid(True)
plt.legend(fontsize=12)
```

```
plt.tight_layout()  
plt.show()
```

9.3 Gráfica 3. Voltaje total en función de J a distintas T

```
import numpy as np  
import matplotlib.pyplot as plt  
# Parámetros del modelo (S. Luo et al., 2024)  
r1 = 4.825747e-5  
r2 = 5.674751e-8  
s = 0.082272  
t1 = 0.013255  
t2 = 4.151465  
t3 = 176.488351  
# Erev en función de T (°C)  
def E_rev(T):  
    return 1.50342 - 9.956e-4 * T + 2.5e-7 * T**2  
# Modelo de voltaje (Ecuación 25)  
def U_cell(i, T):  
    E = E_rev(T)  
    ohm = (r1 + r2 * T) * i  
    act = np.log((t1 + t2 / T + t3 / T**2) * i + 1)  
    return E + ohm + s * act  
# Densidad de corriente (A/m²)  
i_vals = np.linspace(0, 6000, 300)  
# Temperaturas a graficar  
temps = [25, 45, 65, 85] # en °C  
# Gráfico  
plt.figure(figsize=(10, 6))  
for T in temps:
```

```
U_vals = U_cell(i_vals, T)
plt.plot(i_vals, U_vals, label=f"T = {T} °C")
plt.title("Voltaje de celda vs Densidad de corriente", fontsize=14)
plt.xlabel("Densidad de corriente (A/m²)", fontsize=12)
plt.ylabel("Voltaje de celda (V)", fontsize=12)
plt.legend(fontsize=12)
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

9.4 Gráfica 4. Eficiencia eléctrica en función J a distintas T

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# Parámetros del modelo (S. Luo et al., 2024)
r1 = 4.825747e-5
r2 = 5.674751e-8
s = 0.082272
t1 = 0.013255
t2 = 4.151465
t3 = 176.488351
# Voltaje reversible en función de la temperatura (°C) ec 24
def E_rev(T):
    return 1.50342 - 9.956e-4 * T + 2.5e-7 * T**2
# Modelo de voltaje de celda (ecuación 25)
def U_cell(i, T):
    E = E_rev(T)
    ohm = (r1 + r2 * T) * i
    act = np.log((t1 + t2 / T + t3 / T**2) * i + 1)
    return E + ohm + s * act
```

```
# Eficiencia eléctrica como porcentaje
def eficiencia_electrica(i, T):
    return 100 * E_rev(T) / U_cell(i, T)
# Rango de densidades de corriente (A/m²)
i_vals = np.linspace(100, 6000, 300) # evitar i = 0
# Temperaturas en °C
temps = [25, 45, 65, 85]
# Gráfico
plt.figure(figsize=(10, 6))
for T in temps:
    eta_vals = eficiencia_electrica(i_vals, T)
    plt.plot(i_vals, eta_vals, label=f"T = {T} °C")
plt.title("Eficiencia eléctrica vs Densidad de corriente", fontsize=14)
plt.xlabel("Densidad de corriente (A/m²)", fontsize=12)
plt.ylabel("Eficiencia eléctrica (%)", fontsize=12)
plt.ylim(50, 100) # Mostrar solo a partir del 50%
plt.legend(fontsize=12)
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

9.5 Gráfica 5. Curvas isotermas de voltaje reversible en función de P

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# Constantes físicas
R = 8.314 # J/mol·K
F = 96485 # C/mol
# Temperaturas en °C y su conversión a K
temps_C = [25, 45, 65, 85]
```

```
temps_K = [T + 273.15 for T in temps_C]
# Rango de presiones (en bar)
P_vals = np.linspace(1, 80, 300) # desde 1 bar hasta 80 bar
# Función para E estándar en función de la temperatura (°C) ec 24
def E_standard(T_C):
    return 1.50342 - 9.956e-4 * T_C + 2.5e-7 * T_C**2
# Calcular y graficar
plt.figure(figsize=(10, 6))
for T_C, T_K in zip(temps_C, temps_K): # ec 31
    E0 = E_standard(T_C)
    E_vals = E0 + (3 * R * T_K) / (4 * F) * np.log(P_vals)
    plt.plot(P_vals, E_vals, label=f"T = {T_C} °C")
plt.title("Potencial reversible (V) VS Presión (bar)", fontsize=14)
plt.xlabel("Presión (bar)", fontsize=12)
plt.ylabel("Potencial reversible E (V)", fontsize=12)
plt.grid(True)
plt.legend(fontsize=12)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

9.6 Gráfica 6. Influencia simultánea de P y T en U, para J fijo

```
%matplotlib notebook
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
from matplotlib import cm
# Constantes físicas
R = 8.314 # J/mol·K
F = 96485 # C/mol
```

```
# Parámetros del modelo (S. Luo et al., 2024)
r1 = 4.825747e-5
r2 = 5.674751e-8
s = 0.082272
t1 = 0.013255
t2 = 4.151465
t3 = 176.488351
# Rango de temperatura (°C) y presión (bar)
T_rango = np.linspace(25, 85, 50)
P_rango = np.linspace(1, 80, 50)
T_C_graf, P_graf = np.meshgrid(T_rango, P_rango)
T_K_graf = T_C_graf + 273.15
# Corriente fija
I = 1000 # Amperios
# E_rev
E_standard = 1.50342 - 9.956e-4 * T_C_graf + 2.5e-7 * T_C_graf**2 # ec 24
E_rev = E_standard + (3 * R * T_K_graf) / (4 * F) * np.log(P_graf) # ec 31
# Voltaje total ec 25
ohmic = I * (r1 + r2 * T_C_graf)
log_term = np.log((t1 + t2 / T_C_graf + t3 / T_C_graf**2) * I + 1)
U_total = E_rev + ohmic + s * log_term
# Gráfica 3D con temperatura en el eje X y presión en el eje Y
fig = plt.figure(figsize=(10, 7))
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
surf = ax.plot_surface(T_C_graf, P_graf, U_total, cmap=cm.viridis)
ax.set_title("Voltaje total de celda (V) vs Temperatura (°C) y Presión (bar)", fontsize=14)
ax.set_xlabel("Temperatura (°C)", fontsize=12)
ax.set_ylabel("Presión (bar)", fontsize=12)
ax.set_zlabel("Voltaje total de la celda (V)", fontsize=12)
fig.colorbar(surf, shrink=0.5, aspect=10)
```

```
plt.tight_layout()  
plt.show()
```

9.7 Programa de cálculo de U (T, P)

```
import numpy as np  
  
# Constantes físicas  
R = 8.314 # J/mol·K  
F = 96485 # C/mol  
  
# Parámetros del modelo (S. Luo et al., 2024)  
r1 = 4.825747e-5  
r2 = 5.674751e-8  
s = 0.082272  
  
t1 = 0.013255  
t2 = 4.151465  
t3 = 176.488351  
  
# Valores impuestos  
I = 1000 # Corriente A  
A = 1 # Área m2  
J = I / A # Densidad de corriente A/m2  
  
print("Cálculo de U (T,P) \n")  
  
try:  
    # Entrada del usuario  
    T_C = float(input("Introduce la temperatura en °C : "))  
    P_bar = float(input("Introduce la presión en bar : "))  
  
    # Conversión a Kelvin  
    T_K = T_C + 273.15  
  
    # Cálculo del voltaje reversible  
  
    E_standard = 1.50342 - 9.956e-4 * T_K + 2.5e-7 * T_K**2 # ec 24  
    E_rev = E_standard + (3 * R * T_K) / (4 * F) * np.log(P_bar) # ec 31
```

```
# Caídas de voltaje adicionales ec 25
ohmic = J * (r1 + r2 * T_C)
act = np.log((t1 + t2 / T_C + t3 / T_C**2) * J + 1)
# Voltaje total
U_total = E_rev + ohmic + s * act
print(f"\n Resultados para T = {T_C} °C y P = {P_bar} bar: \n")
print(f" - Voltaje reversible : {E_rev:.4f} V")
print(f" - Sobrepotencial óhmico : {ohmic:.4f} V")
print(f" - Sobrepotencial de activación : {s * act:.4f} V")
print(f" - Voltaje total : {U_total:.4f} V")
except ValueError:
    print("Por favor, introduce valores numéricos válidos.")
```

9.8 Programa de compensación de T frente a ΔP

```
import numpy as np
# Constantes físicas
R = 8.314 # J/mol·K
F = 96485 # C/mol
# Parámetros del modelo (S. Luo et al.)
r1 = 4.825747e-5
r2 = 5.674751e-8
s = 0.082272
t1 = 0.013255
t2 = 4.151465
t3 = 176.488351
I = 1000 # Corriente fija (A)
# Derivada de E_rev respecto a T
def dErev_dT(T):
    return -9.956e-4 + 5e-7 * T
```

```
# Derivada dT/dP para mantener U constante
```

```
def dT_dP(P, T):
```

```
    T_K = T + 273.15
```

```
    A = t1 + t2 / T + t3 / T**2
```

```
    dA_dT = -t2 / T**2 - 2 * t3 / T**3
```

```
    numerador = (3 * R * T_K) / (4 * F * P)
```

```
    denominador = (
```

```
        dErev_dT(T) +
```

```
        (3 * R / (4 * F)) * np.log(P) +
```

```
        I * r2 +
```

```
        (s * I * dA_dT) / (A * I + 1)
```

```
    )
```

```
    return -numerador / denominador
```

```
# Función para calcular voltaje total
```

```
def U_total(P, T):
```

```
    T_K = T + 273.15
```

```
    E_estandar = 1.50342 - 9.956e-4 * T + 2.5e-7 * T**2 # ec 24
```

```
    E_rev = E_estandar + (3 * R * T_K) / (4 * F) * np.log(P) # ec 31
```

```
    ohmic = I * (r1 + r2 * T) # ec 25
```

```
    log_term = np.log((t1 + t2 / T + t3 / T**2) * I + 1) # ec 25
```

```
    return E_rev + ohmic + s * log_term
```

```
# Función principal para calcular incremento de temperatura
```

```
def calcular_incremento_temperatura(P1, P2, T1, pasos=100):
```

```
    dP = (P2 - P1) / pasos
```

```
    T = T1
```

```
    for i in range(pasos):
```

```
        P_actual = P1 + i * dP
```

```
        T += dT_dP(P_actual, T) * dP
```

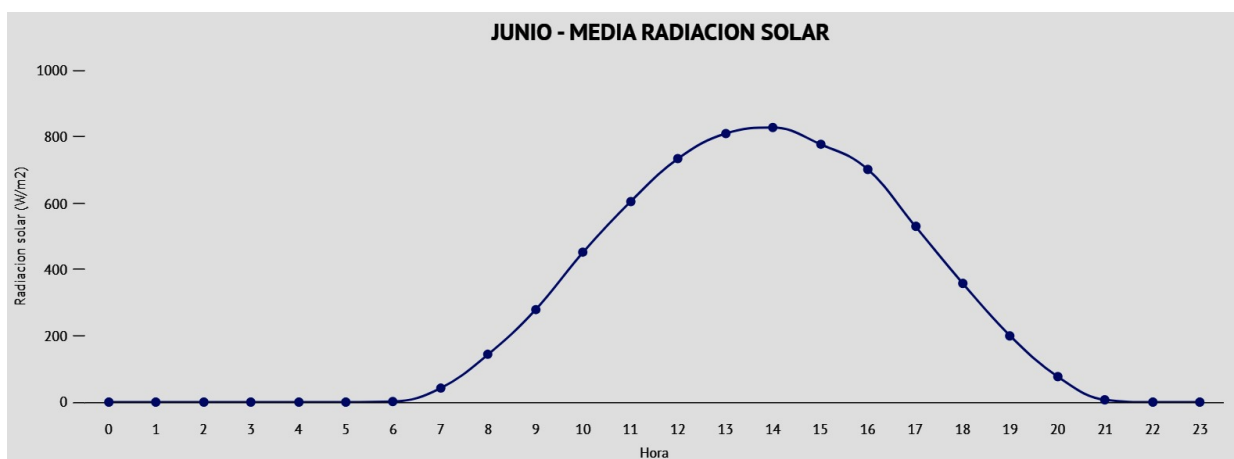
```
    return T
```

```
# Entradas del usuario
```

```
P1 = float(input("Introduce la presión inicial (bar): "))
P2 = float(input("Introduce la presión final (bar): "))
T1 = float(input("Introduce la temperatura inicial (°C): "))
# Calcular temperatura final compensada
T2 = calcular_incremento_temperatura(P1, P2, T1)
# Calcular voltajes
U_ini = U_total(P1, T1)
U_fin = U_total(P2, T2)
# Mostrar resultados
print(f"\nPara mantener el mismo voltaje al pasar de {P1} a {P2} bar:")
print(f"La temperatura debe aumentar de {T1:.2f} °C a {T2:.2f} °C")
print(f"Incremento de temperatura: {T2 - T1:.2f} °C")
print(f"\nVoltaje inicial de celda (U): {U_ini:.5f} V")
print(f"Voltaje final de celda compensado: {U_fin:.5f} V")
print(f"Diferencia absoluta: {abs(U_fin - U_ini):.5f} V")
print(f"Índice de aproximación: {(100 * U_fin / U_ini):.5f} %")
```

9.9 Irradiancias medias por hora en junio 2025

La imagen se obtuvo de la página web de “MeteoCarlet”, y se le invirtieron los colores para obtener un fondo más claro que los utilizados en la página.



9.10 Gráfica 7. Distribución sinusoidal de Irradiancias en un año

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# Pedir datos al usuario
I_max = float(input("Introduce la irradiancia máxima (W/m²): "))
media = float(input("Introduce la irradiancia media anual (W/m²): "))
# Calcular el tiempo de sol anual
Tsol = 2 * 365 * 24 * media / I_max
print(f"\nHoras de sol en el año : {int(Tsol)} h")
# Crear vector de tiempo
N = int(Tsol)
t = np.linspace(0, Tsol, N)
# Crear distribución sinusoidal de irradiancia frente al tiempo
irr = I_max * np.sin(2 * np.pi * t / Tsol - np.pi / 2) / 2 + I_max / 2
# Línea horizontal en I_max/2, media de irradiancia bajo sol
I2 = I_max / 2
print(f"Irradiancia media en horas de sol anuales : {I2:.2f} h")
# curva solo donde irr > I2
resaltada = irr.copy()
resaltada[irr >= I2] = np.nan
# Gráfica
plt.figure(figsize=(10,6))
plt.plot(t, irr, color='blue', label='Distribución sinusoidal de irradiancia')
plt.plot(t, resaltada, color='darkblue', linewidth=2.5, label='Irradiancia bajo $ I_{\max} / 2 $')
plt.axhline(I2, color='red', linestyle='--', label=f'$ I_{\max} / 2 : {I2:.2f} W/m^2 $')
plt.title('Distribución anual de la irradiancia en horas de sol',fontsize=14)
plt.xlabel('Tiempo de sol anual (h)',fontsize=12)
plt.ylabel('Irradiancia (W/m²)',fontsize=12)
```

```
plt.legend()  
plt.grid(True)  
plt.tight_layout()  
plt.show()
```

9.11 Gráfica 8. Proporción temporal de irradiancias de operación

```
import numpy as np  
import matplotlib.pyplot as plt  
# Datos meteocarlet  
irr_max = 1188  
media = 178.6  
Ti = 19.37  
# Datos colector, ajustables a cualquier colector  
cp = 4181.3  
A = 1.77  
eff = 0.76  
tiempo = 3600  
Tf_min = 60  
Tf_max = 80  
# Calculo tiempo de sol  
# Si no se visualiza o tarda mucho, ponerlo en horas  
t = 365 * 24 * 3600 # tiempo en s  
N = int(t * media / (irr_max / 2)) # total de tiempo con sol  
h = 1 / 3600 # pasar a horas. Si el tiempo t esta en horas, h tiene que valer 1  
# Pedir masa  
m = float(input("Introduce el valor de la masa (kg): "))  
# Calcular irradiancia objetivo  
def G(m):  
    G = (m * cp) / (A * eff * tiempo)
```

```
    return G

G_min = G(m) * (Tf_min - Ti)
G_max = G(m) * (Tf_max - Ti)

# Comprobamos que la masa se puede calentar hasta la mínima temperatura de operación
if G_min > irr_max:

    print(f"\nLa masa introducida es demasiado grande, no se puede calentar con esta irradiancia
máxima ({irr_max} W/m²).")

    quit()

# Definimos la variable irradiancia (eje x)
irr = np.linspace(0, irr_max, N)

# Tiempo asociado a cada nivel de irradiancia:
# Función seno que vale 0 en 0 y Irr max, y tiene máximo en t max / 2
t_max = media * t / (irr_max)
t_G = (t_max * np.sin(np.pi * irr*2 / irr_max - np.pi/2)/2 + t_max/2)

# Rango de interés
rango = (irr >= G_min) & (irr <= G_max)

# Calcular integral, tiempo de trabajo en el rango
norma = 4 / irr_max # normalizamos el seno para que la integral total sea N
integral = np.trapz(t_G, irr) * norma # tiempo de sol al año
integral_rg = np.trapz(t_G[rango], irr[rango]) * norma # tiempo de sol en intervalo

# Media de irradiancia durante el día
irr_med = np.mean(irr)

# Mostrar resultados

print(f"\nLa irradiancia necesaria para elevar la temperatura (desde los {Ti} °C) de {m} kg de agua
es de")

print(f"G = {G_min:.2f} W/m² para que llegue hasta {Tf_min} °C")
print(f"G = {G_max:.2f} W/m² para que llegue hasta {Tf_max} °C")

print(f"\nNúmero de horas con irradiancia entre {G_min:.2f} y {G_max:.2f} W/m²:
{int(integral_rg*h)} h")

print(f"Porcentaje que representa del total de horas de sol: {(integral_rg / N * 100):.2f} %")

print(f"\nHoras de sol en el año: {int(integral * h)} h")
```

```
print(f"Media anual de irradiancia durante el día : {(irr_med):.2f} W/m2")  
  
# Graficar  
plt.figure(figsize=(10, 6))  
plt.plot(irr, t_G/(2*t_max), label='Distribución sinusoidal de irradianzas', color='blue')  
plt.fill_between(irr, 0, t_G/(2*t_max), where=rango, color='skyblue', alpha=0.5, label='Zona de  
operación')  
plt.axvline(G_min, color='green', linestyle='--', label=f'$G_{{Tf_min}}$ = {G_min:.2f} W/m2')  
plt.axvline(G_max, color='red', linestyle='--', label=f'$G_{{Tf_max}}$ = {G_max:.2f} W/m2')  
plt.title('Proporción anual de irradianzas aprovechadas', fontsize=14)  
plt.xlabel('Irradiancia (W/m2)', fontsize=12)  
plt.ylabel('Proporción de tiempo (t/$t_{{sol}}$)', fontsize=12)  
plt.legend()  
plt.grid(True)  
plt.tight_layout()  
plt.show()
```

9.12 Programa de cálculo de derivada numérica.

```
import numpy as np  
import matplotlib.pyplot as plt  
from scipy.optimize import brentq  
  
# Datos meteocarlet  
irr_max = 1188  
media = 178.6  
  
# Datos colector  
cp = 4181.3  
A = 1.77  
eff = 0.76  
tiempo = 3600  
Ti = 19.37
```

```
# Calculo tiempo de sol
t = 365 * 24 # en horas
N = int(t * media / (irr_max / 2)) # total de horas de sol aproximadas
h = 1
# pedir temperaturas
Tfmin = float(input("Introduce la temperatura inicial Tfmin (°C): "))
Tfmax = float(input("Introduce la temperatura final Tfmax (°C): "))
# calcular masa máxima para que Gmin=irr_max
m_max = (A * eff * tiempo * irr_max) / (cp * (Tfmin - Ti))
# irradiancia
irr = np.linspace(0, irr_max, N)
t_max = media * t / irr_max
t_G = (t_max * np.sin(np.pi * irr**2 / irr_max - np.pi/2))/2 + t_max/2
norma = 4 / irr_max
def G(m):
    G = (m * cp) / (A * eff * tiempo)
    return G
# tiempo de operación para cierto Tf
def tiempo_operacion(m, Tf_obj):
    G_m = G(m)
    G_min = G_m * (Tf_obj - Ti)
    if G_min > irr_max:
        return 0
    rango = irr >= G_min
    integral = np.trapz(t_G[rango], irr[rango]) * norma
    return integral
# diferencia de tiempos
def f(m):
    return tiempo_operacion(m, Tfmax) - tiempo_operacion(m, Tfmin)
# derivada numérica
```

```
def df_dm(m, h=1e-1):
    return (f(m + h) - f(m - h)) / (2*h)

# valores de masa ajustados
m_vals = np.linspace(1, m_max, 200)
df_vals = np.array([df_dm(m) for m in m_vals])

# graficar derivada
plt.figure(figsize=(10,6))
plt.plot(m_vals, df_vals, color='blue', label="df/dm")
plt.axhline(0, color='black', linestyle='--')
plt.xlabel("Masa (kg)")
plt.ylabel("Derivada de la diferencia de tiempos (h/kg)")
plt.title("Derivada de la diferencia de tiempos de operación")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()

# buscar cero de la derivada
solucion = None

for i in range(len(m_vals)-1):
    if df_vals[i] * df_vals[i+1] < 0:
        try:
            raiz = brentq(df_dm, m_vals[i], m_vals[i+1])
            solucion = raiz
            break
        except:
            continue

if solucion:
    print(f"\nLa derivada se anula en m = {solucion:.3f} kg, posible óptimo.")
else:
    print("No se encontró un punto crítico en el rango de masas.")
```

