

Modalidad: Estudio de caso

Estudio de obtención de hidrógeno a partir de recurso energético y consumo hídrico: caso de estudio ITR-CS

Jairzinho Joao Torres Rodriguez¹, José Luis Pineda Delgado²

¹Laboratorio Solar, Departamento de Sostenibilidad Ambiental, Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC)

²Área Hidrógeno Verde, Departamento de Sostenibilidad Ambiental, Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC)



jairzinho.torres@utec.edu.uy

Resumen

Este estudio evalúa la viabilidad de producir hidrógeno verde (GH2) en el Instituto Tecnológico Regional Centro-Sur (ITR-CS) de la Universidad Tecnológica (UTEC), ubicado en Durazno, Uruguay, a partir de energía solar y eólica. Se estimó el recurso energético disponible con datos satelitales del *Global Solar Atlas* y el *Global Wind Atlas* y se calculó la superficie necesaria para generar 1 kg/día de GH2 mediante electrólisis. A eficiencias del 80 % se requieren entre 18,8 m² (eólica) y 61,1 m² (solar). Además, se analizó el consumo hídrico a partir de dos fuentes (red pública y río Yi), considerando variaciones en la eficiencia faradaica y de voltaje. El consumo total de agua varió entre 800 y 857 litros diarios para una planta hipotética instalada en una superficie de 3500 m². Los resultados subrayan la importancia de la eficiencia de voltaje en la reducción del uso

hídrico y el potencial del ITR-CS para contribuir a la estrategia nacional de hidrógeno verde y neutralidad de carbono.

Palabras clave: [Consumo hídrico, electrólisis, hidrógeno verde.](#)

Abstract

This study assesses the feasibility of producing green hydrogen (GH2) at UTEC's Regional Technological Institute Centro-Sur (ITR-CS) in Durazno, Uruguay, using solar and wind energy. Satellite data from the Global Solar Atlas and Global Wind Atlas were used to estimate the local energy potential, and the required surface area to produce 1 kg/day of GH2 via electrolysis was calculated. At 80 % efficiency, the required area ranges from 18.8 m² (wind) to 61.1 m² (solar). Water consumption was also analyzed using two available sources (public grid and Yi River), considering variations in faradaic and voltage efficiency. Total water demand ranged from 800 to 857 liters per day for a hypothetical plant covering 3500 m². Results highlight the strong influence of voltage efficiency on water consumption and the potential of ITR-CS to support Uruguay's green hydrogen roadmap and carbon neutrality goals.

Keywords: [Water consumption, electrolysis, green hydrogen.](#)

1. Introducción

La transición global hacia fuentes de energía renovables es uno de los mayores desafíos contemporáneos; sectores clave como la sociedad, la industria, el gobierno, el medio ambiente y la academia han reconocido la necesidad urgente de reducir drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para mitigar el calentamiento global (Cheng et al., 2024; Nadaleti et al., 2021; Wei et al., 2024; Zhang y Zhou, 2024). Esta convergencia de esfuerzos ha llevado a estos sectores a impulsar de manera conjunta la investigación y el desarrollo de tecnologías que fomenten un modelo de crecimiento

económico limpio y sostenible, orientado a proteger el medio ambiente mientras se asegura la competitividad y viabilidad de nuevas soluciones energéticas (Tanco et al., 2023). En este contexto, el GH2 ha emergido como una de las alternativas más prometedoras debido a su capacidad para almacenar, transportar y liberar energía sin producir emisiones de efecto invernadero, siempre que se obtenga mediante procesos que utilicen recursos o energías renovables, como lo son la electrólisis (Maghrabi et al., 2024). Este gas se proyecta como una solución estratégica para descarbonizar sectores difíciles de electrificar, como el transporte pesado, la aviación y ciertos procesos industriales de alto consumo energético (Ibagon et al., 2023). En este trabajo, GH2 (*green hydrogen*) se refiere a hidrógeno producido por electrólisis del agua alimentada exclusivamente con energía renovable, con emisiones de GEI cercanas a cero a lo largo de su ciclo de vida.

Actualmente, Uruguay ha destacado en la transición de su matriz energética hacia fuentes renovables, por lo que la adopción del GH2 representa una extensión natural de sus políticas energéticas. El país cuenta con una matriz energética diversificada y predominantemente limpia que llega al 98 %, con una alta producción de energía eólica, solar e hidráulica (Corrêa et al., 2022). Atendiendo a esto, en 2022 y en sintonía con otros países de América Latina, el Gobierno uruguayo aprobó la primera versión de su *Hoja de ruta del hidrógeno verde* y derivados en Uruguay (Ministerio de Industria, Energía y Minería, 2023), en donde este vector energético se posiciona como un componente central de la llamada *segunda transición energética de la nación*, la cual busca establecer un marco institucional para convertirse en un país con neutralidad de emisiones de dióxido de carbono a través de acciones como la descarbonización del transporte e industria, la fabricación de materias primas de uso industrial y el impulso al desarrollo de una economía del hidrógeno verde (Ministerio de Industria, Energía y Minería, 2023), además de sostener la alta participación de energías renovables en la matriz eléctrica y conseguir un uso más eficiente del sistema eléctrico.

Es por esto que, en este estudio de caso, se evaluó la producción de GH2 utilizando el recurso solar y eólico total disponible en el predio de la Universidad Tecnológica (UTEC), con el objetivo de financiar un proyecto para la adquisición de una planta de GH2 para electromovilidad, la cual estará ubicada dentro de la institución (Agencia Nacional de Investigación e Innovación, s. f.). También se determinó el consumo hídrico proveniente de dos fuentes disponibles en la ciudad de Durazno evaluando la eficiencia de los equipos utilizados, además de la variabilidad de la eficiencia de los equipos de electrólisis.

2. Metodología

La metodología de este estudio se centra en dos partes. La primera abarca desde la obtención del recurso solar y eólico a través de datos satelitales —pasando por una geolocalización de la UTEC— hasta la estimación del recurso energético en función de la superficie disponible. La segunda se enfoca en el estudio hídrico necesario para la producción diaria objetivo de 1 kg de GH2 al variar las fuentes del recurso hídrico (agua del río Yi y agua de la red) y las eficiencias de los componentes principales de la planta, como la ósmosis inversa y los electrolizadores. En estos últimos se varió la eficiencia faradaica y de voltaje en un rango de 60 a 80 %, lo que afectó el consumo necesario de agua de enfriamiento para el proceso de electrólisis.

2.1. Obtención de recurso energético

Los valores de potencia son normalizados con base en los datos satelitales obtenidos de velocidad del viento del *Global Wind Atlas* (GWA) y de irradiación del *Global Solar Atlas* (GSA), los cuales están estandarizados a valor de $\text{kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ año y logran un valor combinado de potencia.

2.1.1. Obtención de recurso eólico

Para el recurso eólico, se obtiene un valor de densidad de potencia media (PDM) del sitio con base en los cálculos realizados por el GWA. Este valor se obtuvo utilizando los siguientes parámetros:

Tabla 1. Parámetros de energía eólica

Concepto	Valor	Descripción
Vm	6,82 m s ⁻¹	Velocidad media a 100 m de altura de buje
WR	30-35 % desde E-SE	Rosa de los vientos
Variación diaria	Pico nocturno, valle diurno	
Estacionalidad	Pico invernal	
Variabilidad Anual	< 5 %	
Tipo de equipo	IEC III Turbina Gamesa G114/200	
Z ₀	0,03-0,05 m	Longitudes de rugosidad del terreno

El software calculó un valor de 270 W m⁻² y la turbina se encuentra registrada a una altura de buje de 100 m. Este valor corresponde al 10 % de la zona más ventosa de la región seleccionada. Para obtener la energía útil, multiplicamos el PDM por la eficiencia global del sistema (aerogenerador + eléctricas), que ronda el 40 %, según la literatura (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2016). Además, se debe multiplicar por 8760, que es la cantidad de horas de un año y por 1000 para trabajar en kWh m⁻² a⁻¹.

$$E_{eol} = \frac{PDM * 0,4 * 8760}{1000} \quad \text{Ecuación 1}$$

2.1.2. Obtención de recurso solar

Para la energía solar fotovoltaica se extraen los valores de irradiación global en plano inclinado (GTI) del GSA, medidos en kWh m⁻² (E_{sol}) año utilizando los parámetros de la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de energía solar fotovoltaica

Concepto	Valor	Descripción
GTI	1947,1 kWh m ⁻² a ⁻¹	Irradiación Global Inclinada
GHI	1742,5 kWh m ⁻² a ⁻¹	Irradiación Global Horizontal
DNI	1889,3 kWh m ⁻² a ⁻¹	Irradiación Normal Difusa
Inclinación óptima	30°	
Estacionalidad	Pico en verano, valle en invierno	
Orientación	Norte	
Pérdidas del sistema	15 al 20 %	

La GTI se multiplica por la eficiencia del módulo fotovoltaico y la eficiencia del sistema global (inversor + pérdidas) para obtener la energía en kWh m⁻² a⁻¹ útil, sería lo mismo que multiplicar GTI por el factor de planta, que para parques fotovoltaicos ronda entre el 15 y el 20 %, según la Programación anual de mantenimiento (s. f.).

$$E_{sol} = GTI * 0.18 * 0.83$$

Ecuación 2

2.2. Obtención de superficie necesaria para producción de 1 kg/día de GH2

El Instituto Tecnológico Regional Centro-Sur (ITR-CS) está ubicado en la ciudad de Durazno, en el departamento de Durazno. Este predio se encuentra localizado en las coordenadas a una latitud de -33,38 y una longitud de -56,51 y cuenta con un área de 3500 m². La figura 1 muestra una vista aérea del predio de la UTEC, que destaca la distribución del terreno y las instalaciones principales. Es una imagen satelital proporcionada por Google Maps.



Figura 1. Vista satelital del predio del ITR-CS

Para cuantificar la cantidad de superficie necesaria para la producción diaria de 1 kg de GH2, se utilizó la ecuación 3, la cual varía dependiendo de la eficiencia del electrolizador (Cheng et al., 2024). Esta relación es utilizada para estimar la superficie (m²) de paneles solares o molinos eólicos necesarios. En este estudio se evaluaron dos alternativas. La primera aplicando energía eólica y la segunda energía solar fotovoltaica. Se utilizó como

dato de referencia para el consumo energético por kg GH₂ el valor de la literatura: 55 kWh a 60 % de eficiencia.

$$\text{Superficie} = \frac{\text{Consumo Energético}/\text{kg}_{\text{H}_2}}{\text{Energía}_{\text{eol},\text{sol}}} \quad \text{Ecuación 3}$$

El consumo energético del electrolizador depende significativamente de su eficiencia. A una mayor eficiencia global el potencial necesario para realizar el proceso de electrólisis es menor, lo que representa un consumo energético bajo. Por otra parte, una eficiencia baja del equipo representa un sobrepotencial alto requerido en el proceso, lo cual significa una mayor cantidad de energía necesaria. La figura 2 muestra el consumo energético anual requerido para la producción de GH₂ expresado en una producción anual de 1 kg/día de este vector energético. Como se puede observar, se presenta una tendencia lineal en el comportamiento del electrolizador, basado en reporte hídrico para la producción de hidrógeno (Team, 2023).

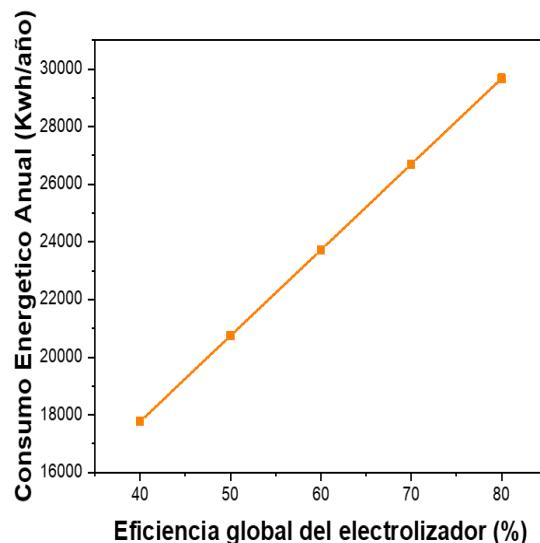


Figura 2. Consumo energético anual para la producción de 1 kg/día de GH₂. Datos basados en la IRENA (Team, 2023)

2.3. Obtención de consumo hídrico

El consumo hídrico asociado a la producción de hidrógeno verde ha generado controversia en la opinión pública desde el punto de vista social en Uruguay, esto se debe a la creciente preocupación por un uso racional y sostenible del uso del agua, tanto superficial como subterránea. La Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA por sus siglas en inglés) emitió un reporte hídrico para estimar el consumo de agua utilizado para la producción de hidrógeno. Utilizando los parámetros de este reporte (tabla 3), se realizaron estimaciones en cuanto al consumo hídrico del electrolizador, ósmosis inversa y calor liberado por electrolizador al variar las distintas eficiencias de cada componente.

Tabla 3. Parámetros del proceso de electrólisis utilizados por la IRENA (Team, 2023)

Concepto	Río Yi	Agua de la red
Eficiencia de ósmosis inversa	58 %	66 %
Tecnología de electrólisis	PEMWE	PEMWE
Temperatura de operación	80 °C	80 °C
Eficiencia global	70 %	70 %
Eficiencia faradaica	90 %	90 %
Energía no utilizada	100 % emitida como calor	100 % emitida como calor
Eficiencia del enfriador	75 %	75 %

Utilizando los parámetros bases de la IRENA para el consumo de agua proveniente de río (58 % de eficiencia para 17,2 L) y de la red (66 % de eficiencia 15,2 L) se realizó una extrapolación lineal fijando como eficiencia al 100 % el agua necesaria para el proceso de electrólisis a una eficiencia faradaica del 90 % (10 L). Posteriormente se hizo un

barido de eficiencias (60 %-100 %) para determinar el agua necesaria y el agua de rechazo en el proceso de ósmosis inversa.

Al fijar la producción diaria de 1 kg de GH2 para todos los casos, se estimó la cantidad de agua necesaria al variar las diferentes condiciones de eficiencia. Por ejemplo, al conocer que la cantidad objetivo de hidrógeno es equivalente a 9 L de agua, debido a la estequiométría de la reacción, obtenemos que, al variar la eficiencia faradaica a menos de 90 %, el consumo hídrico será mayor. Debido a que esta eficiencia está ligada a la energía utilizada para llevar a cabo la conversión de agua en hidrógeno mediante la ecuación de Faraday, esta describe que el producto de una reacción electroquímica es dependiente del peso molecular y de la corriente aplicada:

$$H_2O_{Electrolizador} = \frac{Agua\ equivalente\ al\ hidrógeno}{\eta_{faradaica}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Por otra parte, al variar la eficiencia de voltaje del electrolizador y fijar en un óptimo la eficiencia faradaica (90 %), se pudo calcular el cambio de agua necesario para el proceso de electrólisis y del enfriamiento del electrolizador. En este caso, el consumo hídrico del electrolizador se fijó en 10 L, según la IRENA. Sin embargo, el sobrepotencial utilizado para llevar a cabo la reacción electroquímica se desprende en forma de calor, por lo que el consumo de agua para enfriar varía de tal manera para regular la temperatura a 80 °C. A esta temperatura se favorece la actividad electrocatalítica y se reduce la resistencia óhmica de la membrana de intercambio mejorando la producción del electrolizador.

$$\eta_{Voltaje} = \frac{\eta_{Global}}{\eta_{Faradaica}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Utilizando este valor y cuando el proceso es 100 % eficiente, liberando nula energía en forma de calor, mediante una interpolación lineal simple se obtuvieron los valores del agua utilizada en el proceso de evaporación obteniendo una ecuación lineal.

$$Agua\ de\ vaporización\ (L) = -0,945(\eta_{Voltagen}) + 94,75 \text{ Ecuación 6}$$

$$Agua\ de\ vaporación_{(L)} = -0,945 (\eta_{Voltagen}) + 94,75 \text{ Ecuación 7}$$

$$Consumo\ H_2O_{Total} = Consumo\ H_2O_{red,río} + agua\ de\ enfriamiento \text{ Ecuación 8}$$

3. Resultados

3.1. Obtención de recurso energético

En la figura 3 se muestran los recursos energéticos disponibles en la localización del predio del ITR-CS. La figura 3a) muestra el mapa generado por el GWA, que ilustra la densidad de potencia media (PDM) a 100 m de altura. La figura 3b) presenta un recorte del mapa generado por el GSA, que ilustra la GTI en el área del predio estudiado (obtenidos de GWA y GSA en latitud -33,38 y longitud -56,51).

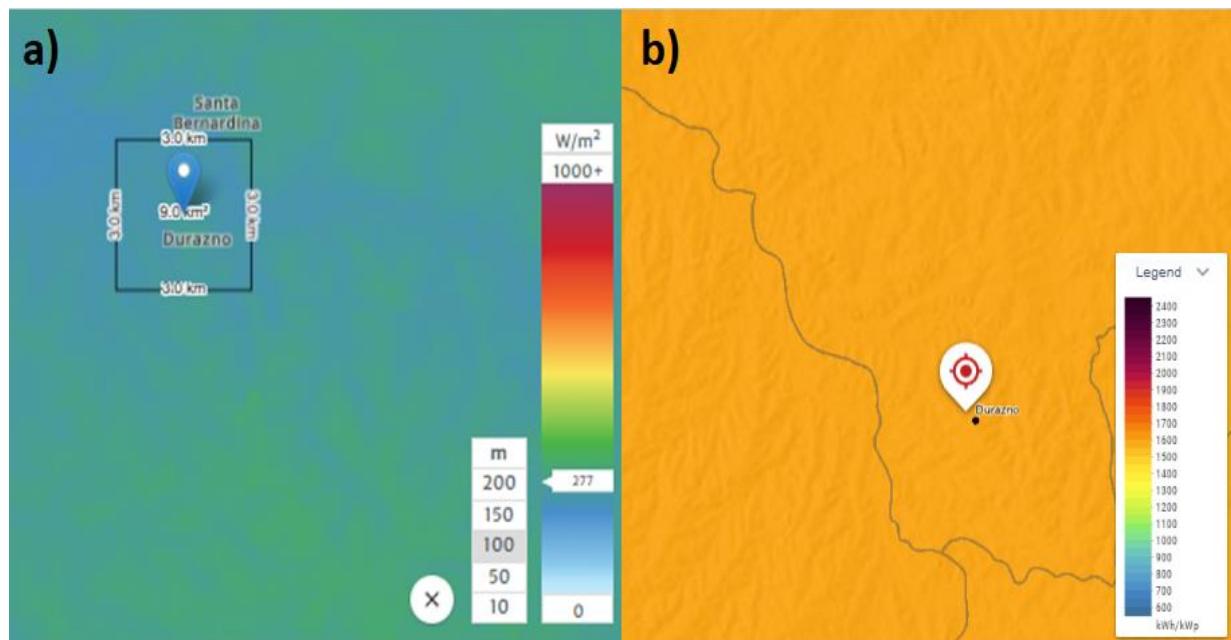


Figura 3. Mapa del recurso energético en el predio de la UTEC-CS. a) Recurso eólico y b) Recurso solar

Debido a la resolución de los mapas actuales, se estimó una densidad de potencia media (PDM) de 270 W m^{-2} a 100 m de altura, con una velocidad media del viento de $6,82 \text{ m s}^{-1}$. Para el recurso solar, la irradiación global en plano inclinado (GTI) es $1947,1 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ y la irradiación global horizontal (GHI) es $1742,5 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (tabla 2). Aplicando la ecuación 1 y la ecuación 2, se obtiene una energía útil anual de $946,1 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (eólica) y $290,9 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (fotovoltaica), respectivamente.

3.2. Estudio energético de superficie

Se utilizó la ecuación 3 para estudiar la superficie necesaria para la producción de 1 kg/día de GH2. En el caso de la eólica se estimó una superficie mínima de $18,8 \text{ m}^2$ cuando el electrolizador presenta una eficiencia del 80 %. Por otra parte, se obtuvo un área máxima de $31,4 \text{ m}^2$ a una eficiencia del 40 %. A su vez, para el caso de la solar fotovoltaica se presenta una superficie mínima de $61,1 \text{ m}^2$ a una eficiencia del 80 % y de 102 m^2 al 40 % respectivamente. Como puede observarse, estos comportamientos son

lineales y son correspondientes al comportamiento de consumo energético reportado por la IRENA.

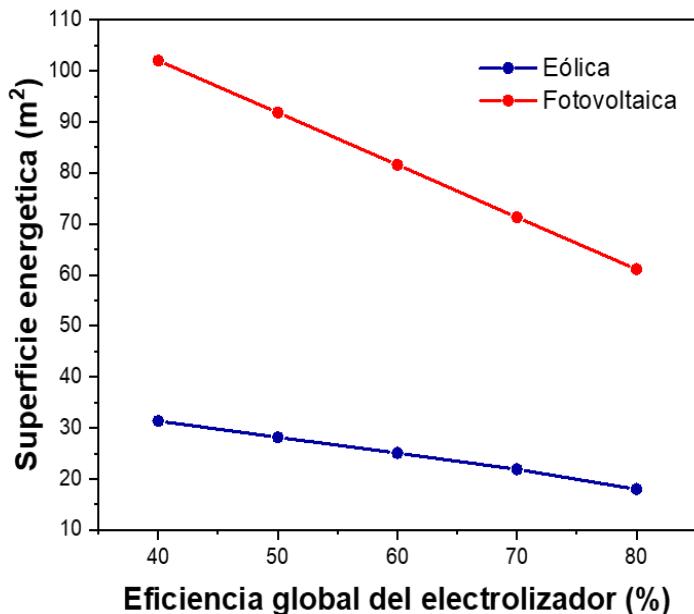


Figura 4. Estudio de superficie energética necesaria para la producción de 1 kg/día de GH2 en la UTEC-CS

3.3. Cálculo del consumo de agua para la producción de 1 kg/día de hidrógeno

La figura 5 muestra los resultados obtenidos a partir de la extrapolación lineal previamente descrita en la metodología. Como puede observarse, cuando la eficiencia del proceso de desalinización es baja (60 %), el consumo hídrico tiende a ser elevado, presenta valores de 16,86 L de consumo hídrico utilizando agua del río Yi (azul) y de 16,12 L con agua proveniente de la red pública (celeste). Este consumo de agua muestra una tendencia lineal decreciente hasta llegar a la eficiencia del 100 %, en donde el consumo hídrico ideal es de 10 L en ambos casos. Por otra parte, el agua de rechazo proveniente del proceso presenta la misma tendencia lineal decreciente, con consumos

máximos a una eficiencia del 60 %. En este punto se obtuvieron valores de 6,86 L para el agua del río Yi (violeta) y de 6,12 L para el agua proveniente de la red (rosa).

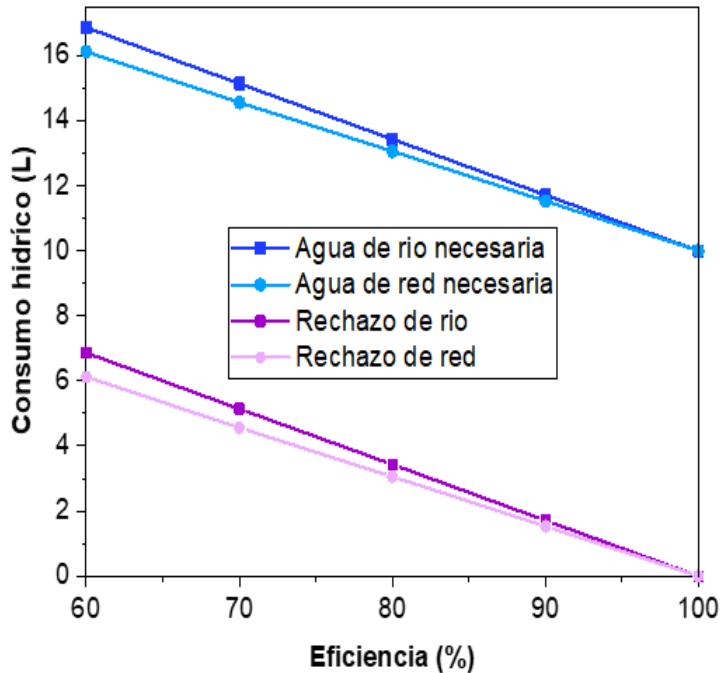


Figura 5. Agua necesaria y de rechazo de ósmosis inversa dependiente de la eficiencia del proceso, a partir de diferentes recursos hídricos (río y red pública)

La figura 6 muestra el consumo hídrico del proceso de electrólisis al fijar la eficiencia de voltaje al 66,6 %. El agua utilizada para el proceso de electrólisis presenta un consumo máximo de 13 L/día a una eficiencia del 60 %, presenta también a esta eficiencia faradaica un mayor rechazo del agua del electrolizador con un valor de 23,5 L/día y son necesarios 32,5 L/día de los cuales, según la literatura, se contempla 19,50 L/día para el proceso de enfriamiento del electrolizador. Por otra parte, al incrementar la eficiencia a un 90 %, el agua alimentada al electrolizador se reduce a 10 L/día. El agua rechazada a esta eficiencia es de 20,5 L/día y son necesarios 29,5 L/día para este proceso.

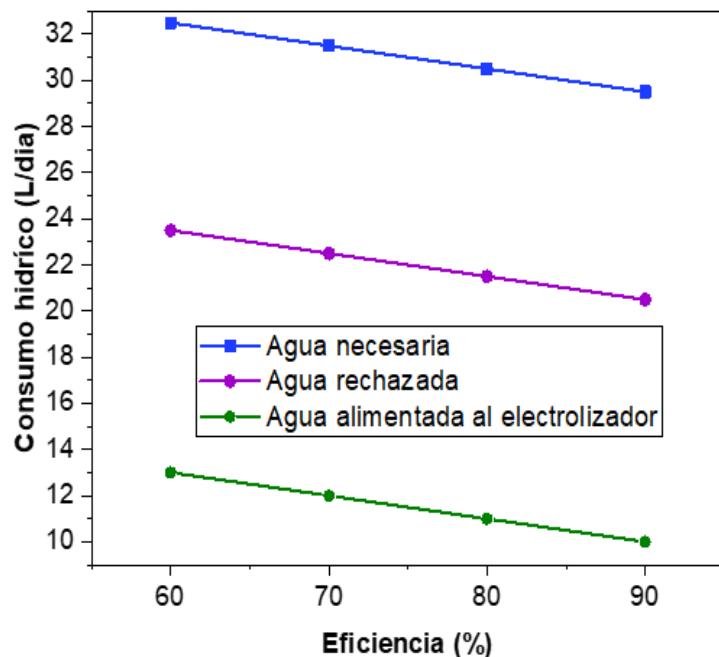


Figura 6. Consumo hídrico en los procesos de electrólisis, rechazo y necesarios. Eficiencia faradaica

Finalmente, la figura 7 muestra el agua necesaria y rechazada al variar la eficiencia de voltaje, pero manteniendo la eficiencia faradaica en un 90 %. Como puede observarse, al disminuir la eficiencia de voltaje al 60 %, el agua de rechazo es de 39 L/día y son necesarios 48 L/día, esto manteniendo el consumo del recurso hídrico de 10 L/día del electrolizador. Por otra parte, al incrementar la eficiencia se presentaron valores de 10,5 L/día y 19 L/día, respectivamente.

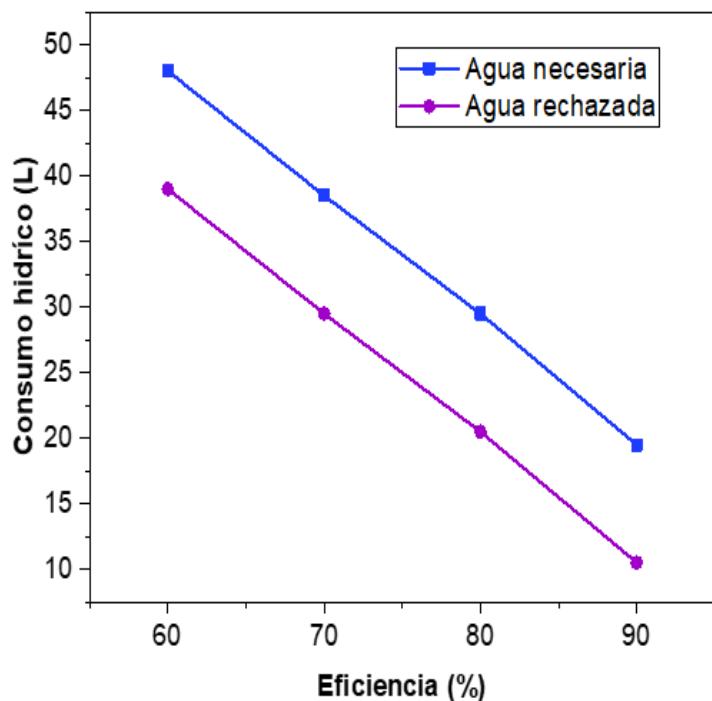


Figura 7. Consumo hídrico en los procesos de electrólisis, rechazo y necesarios. Eficiencia de voltaje

4. Conclusiones

Estos resultados demuestran que la eficiencia de voltaje, que afecta directamente a la termodinámica del proceso de electrólisis, tiene una mayor influencia en el consumo hídrico en comparación al provocado por la variación de la eficiencia faradaica. Esto se puede atribuir a que en una planta de GH2 el consumo de agua requerida por el electrolizador es menor en comparación a otros procesos, como lo son el enfriamiento del electrolizador o la ósmosis inversa. Por otra parte, parece que no hay una diferencia significativa en tomar agua de la llave y agua del río Yi para la producción de hidrógeno verde.

Referencias

- Agencia Nacional de Investigación e Innovación. (s/f). *Programa de equipamiento científico (compra y actualización)*. <https://www.anii.org.uy/apoyos/investigacion/101/programa-de-equipamiento-cientifico-compra-y-actualizacion/>
- Cheng, H., Xia, Y. y Wei, W. (2024). Hydrogen production efficiency enhancement for alkaline water electrolyzers operating at varying temperature via an adaptive multi-mode control. *International Journal of Hydrogen Energy*, 93, 430-440. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.10.421>
- Corrêa, K. C., Uriona-Maldonado, M. y Vaz, C. R. (2022). The evolution, consolidation and future challenges of wind energy in Uruguay. *Energy Policy*, 161, 112758. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112758>
- Ibagon, N., Muñoz, P., Díaz, V., Teliz, E. y Correa, G. (2023). Techno-economic analysis for off-grid green hydrogen production in Uruguay. *Journal of Energy Storage*, 67, 107604. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107604>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2016). *Wind Power Technology Brief*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA-ETSAP_Tech_Brief_Wind_Power_E07.pdf
- Maghrabi, L. M., Singh, N. y Polychronopoulou, K. (2024). A mini-review on the MXenes capacity to act as electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 51, 133-166. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.291>
- Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2023). *Hoja de ruta de hidrógeno verde en Uruguay*. <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/hoja-ruta-hidrogeno-verde-uruguay-0>

Nadaleti, W. C., Lourenço, V. A. y Americo, G. (2021). Green hydrogen-based pathways and alternatives: Towards the renewable energy transition in South America's regions – Part A. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(43), 22247–22255. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.239>

Administración del Mercado Eléctrico (ADME). (2023, 28 de septiembre). *Programación Anual de Mantenimiento (PAM) Octubre 2023 - Abril 2024*. Montevideo: ADME. Recuperado de www.adme.com.uy

Tanco, M., Cavallieri, M. S., Levy, M., Rossi, S. y Jurburg, D. (2023). Impact of electric trucks in GHG inventory - A Uruguayan scenario study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 117, 103614. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103614>

Team, H. E. (2023). IRENA releases 'Water for hydrogen production' report. *Hydrogen Tech World.Com.* <https://hydrogentechworld.com/irena-releases-water-for-hydrogen-production-report>

Wei, Z., Jiang, L., Chen, S., Dong, Z., Chen, Y., Liu, B., Xue, D., Liu, J., Kong, X.-Z., Zhang, J., Chen, Z. y Farouq Ali, S. M. (2024). Towards A hydrogen economy: Understanding pore alterations in the context of underground coal gasification. *Journal of Cleaner Production*, 484, 144325. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144325>

Zhang, X. y Zhou, Y. (2024). Life-cycle carbon-intensity mapping for hydrogen-driven energy and economy. *Cell Reports Physical Science*, 5(9), 102146. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2024.102146>