

Factibilidad de producción de Hidrógeno verde en el Ecuador

Feasibility of green Hydrogen production in Ecuador

**Luis Contreras-Vásquez¹, Luis Escobar-Luna², Rodrigo Acosta-Lozada³,
Santiago Medina-Robalino**

¹ Universidad Técnica de Ambato, Dirección de Investigación y Desarrollo, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Ambato - Ecuador, lf.contreras@uta.edu.ec

² Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Ambato - Ecuador, leescobar@uta.edu.ec

³ Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Ambato - Ecuador, ri.acosta@uta.edu.ec

⁴ Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Ambato - Ecuador, wsmedina@uta.edu.ec

DOI: <https://doi.org/10.31243/id.v16.2022.1805>

Resumen

Esta investigación se centra en el análisis de factibilidad de producción de hidrógeno verde mediante el proceso químico de electrólisis, utilizando para esta, electricidad de fuentes renovables de energía en el Ecuador. Se evaluaron los potenciales de generación eléctrica de 3 fuentes de energía renovable: solar fotovoltaica, eólica e hidroeléctrica, mediante información obtenida de los atlas solar y eólico del Ecuador, así como de evaluaciones de la energía proveniente de las centrales hidroeléctricas. Con estos potenciales conocidos se realizó la estimación del potencial de generación de hidrógeno considerando un electrolizador tipo membrana de intercambio de protones PEM obteniendo una producción teórica total equivalente a 3.23×10^8 kg H₂/año. Finalmente, se examina los beneficios que supondría la implementación del hidrógeno como un vector energético en el cambio de la matriz energética, la economía y el medio ambiente del Ecuador, concluyendo que el Ecuador presenta un gran potencial para la inclusión de la tecnología del hidrógeno en varios sectores estratégicos.

Palabras clave:

Hidrógeno, Energías Renovables, Vector Energético, Electrólisis

Abstract

This research focuses on the feasibility analysis of green hydrogen production by electrolysis using electricity from renewable energy sources in Ecuador. The potential electrical generation of 3 renewable energy sources (solar photovoltaic, wind and hydroelectric) were evaluated, using information obtained from the solar and wind atlas of Ecuador, as well as evaluations of the available energy from hydroelectric plants. Consequently, the production potential of hydrogen from electrolysis was estimated, considering for the process a proton exchange membrane electrolyzer (PEM), obtaining a total theoretical production of hydrogen equivalent to 3.23×10^8 kg H₂/year. Finally, the benefits of the hydrogen implementation as an energy vector in changing the energy matrix, the economy and the environment of Ecuador were examined, concluding that Ecuador has great potential for the inclusion of hydrogen technology in several strategic sectors.

Keywords:

Hydrogen, Renewable Energies, Energy Vector, Electrolysis

Introducción

El crecimiento sostenido de la población mundial y la demanda energética que este supone, combinados con los problemas de contaminación ambiental generados por el uso desmesurado de los recursos energéticos; han llevado a gobiernos, centros de investigación, la academia y organizaciones tanto gubernamentales como del medio ambiente, a buscar soluciones prácticas y sostenibles en la generación energética a nivel mundial con la finalidad de suplir la demanda sin causar efectos adversos al medio ambiente. En este contexto, cada vez más, la búsqueda de fuentes renovables de energía ha ido en aumento (Inter-American Development Bank, 2021).

Entre las posibles alternativas, surge el hidrógeno (H_2) como un vector energético, que en la última década ha cobrado un gran interés a nivel global debido a sus excelentes propiedades energéticas, la posibilidad de obtenerlo mediante diversas fuentes y procesos, la fácil aplicación en un amplio rango de sectores productivos, su combinación con varias tecnologías (Nadaleti et al., 2021), además de que la combustión de este solamente produce vapor de agua. Sin embargo, para poder considerar al H_2 como un candidato para suplir la demanda energética, la producción de este deberá ser completamente verde es decir no deberá generar emisiones contaminantes en ninguna parte del proceso (Clerici & Furfari, 2021).

Uno de los grandes problemas para la incursión del hidrógeno en el mercado energético mundial es su producción, debido a que al ser un gas que no se encuentra de forma natural en nuestro planeta, este tiene que ser producido o descompuesto de moléculas químicas que contengan átomos de hidrógeno como los hidrocarburos C_xH_x , o el agua H_2O (Kovač et al., 2021). Esto conlleva a que la producción del hidrógeno se convierta en un proceso que genera contaminantes, ya que al descomponer los hidrocarburos se generan emisiones de carbono las cuales son las principales responsables de la contaminación ambiental, por lo que no es una opción viable (Filippov & Yaroslavtsev, 2021).

Por otro lado, se puede considerar la opción de descomponer la molécula del agua para obtener hidrógeno mediante la electrólisis de la misma. El proceso de electrólisis consiste en romper los vínculos entre los átomos de hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de electricidad (Kakoulaki et al., 2021). Este proceso de producción del hidrógeno se presenta como una alternativa viable para solucionar la problemática de las emisiones contaminantes, sin embargo, es necesario contar con un suministro eléctrico constante y renovable con la finalidad de poder producir hidrógeno verde (Kakoulaki et al., 2021). Esta energía podría obtenerse de fuentes renovables, no obstante, existen 2 grandes limitantes con estas: la intermitencia de su producción (al estar sujeta a disponibilidad de los recursos naturales) y la dificultad de almacenamiento de los excedentes de energía (producidos durante

períodos de menor demanda) (Estévez et al., 2021). Estas dificultades podrían ser suplidas por un mecanismo que permita tanto almacenar como transportar energía. Es por esto que, el hidrógeno sería un complemento excepcional para las energías renovables, ya que no solo permite almacenar y transportar energía de una manera eficiente, sino que también de una manera amigable con el medio ambiente (Egeland-Eriksen et al., 2021).

Entre las diferentes opciones renovables que se presentan tecnológicamente viables para la producción de hidrogeno mediante electrólisis de la molécula del agua tenemos: Los Sistemas de Energía Solar Hidrógeno donde el sol es la energía primaria para el proceso de electrólisis y el hidrógeno la energía secundaria para el uso final (Ares et al., 2019; Hosseini & Wahid, 2020). La energía eólica hidrógeno, que cumpliría con la misma función antes menciona siendo en este caso el viento la fuente primaria (Tian, 2021; Valverde Tapiador, 2021). Una de las opciones más viables económicamente hablando para la electrólisis, se puede considerar la energía del agua (hidroelectricidad) debido a su bajo coste; ya que no necesitaría de una infraestructura en particular, y en el caso de Latinoamérica, por su abundancia, ya que la mayoría de países cuentan con fuentes hidroeléctricas para el suministro energético (Amezcu Medina, 2021; Bamisile et al., 2020; Jovan et al., 2021; Nadaleti et al., 2020).

En este contexto, países como USA, Canadá, Brasil, México, Chile y principalmente Ecuador poseen un gran potencial para poner en práctica soluciones innovadoras que permitan combinar la generación eléctrica mediante el uso de recursos renovables reduciendo así su dependencia en el uso de combustibles fósiles (Asteria, 2018). De esta manera, para la correcta implementación de un sistema basado en energías renovables para producir hidrógeno, lo más importante es conocer la cantidad de hidrógeno que se podría producir mediante estas de una manera sostenida y constante. Lo cual ha llevado a que científicos de varios lugares se interesen en investigaciones relacionadas con el potencial de producción el hidrógeno mediante fuentes renovables (Sadik-Zada, 2021).

Estados Unidos, uno de los países más desarrollados de América y del mundo contiene gran cantidad de investigaciones desarrolladas por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) por sus siglas en inglés, de la producción de hidrógeno mediante energía solar, viento, biomasa e hidroeléctrica (NREL, 2022). En el caso de la energía solar para la producción de hidrógeno por electrólisis en los Estados Unidos el estudio se basó en la recolección de información geográfica de la insolación en ciertos puntos estratégicos, con una eficiencia de conversión del 10 %, de donde se pudo obtener una producción de hidrógeno equivalente a 8.7×10^9 ton/año (Connelly et al., 2020). En el caso de la energía eólica, se realizaron 2 estudios para cuantificar el potencial de producción de hidrógeno. El primer análisis reveló una producción total de 2.74×10^{11} ton de hidrógeno mapeando cada estado conforme a su potencial eólico (Melaina et al., 2013). El segundo estudio corrigió ciertos parámetros actualizando la información, obteniendo un total de producción de hidrógeno igual a 1.1×10^{12} ton/año (Connelly et al., 2020). Por último, el NREL estudió la producción de hidrógeno mediante fuentes de energía hidroeléctricas asumiendo que un 30% de la producción de estas sería utilizado para la generación de hidrógeno, obteniendo una producción de este de 1×10^6 ton (Milbrandt & Mann, 2009).

Otro país pionero en Latinoamérica en cuanto a estudios de producción de hidrógeno renovable es Argentina, donde se desarrollaron investigaciones con energía solar fotovoltaica PV, eólica y biomasa, utilizando la gasificación y electrólisis como procesos para la generación de hidrógeno. Los resultados de estos análisis utilizando sistemas de información geográfica GIS evidenciaron una producción aproximada de 1 billón de toneladas de hidrógeno al año utilizando estimaciones de energía eólica, solar y biomasa, obteniendo un costo aproximado de producción de 9.41 USD/Kg de hidrógeno (Sigal et al., 2017).

Brasil, uno de los países con mayor representación de energías renovables en Latinoamérica ha publicado varias investigaciones de producción de hidrógeno verde a través de electrólisis con fuentes de energía provenientes de centrales hidroeléctricas en combinación con energía solar y eólica alcanzando una

producción estimada de 3.22×10^6 ton de hidrógeno (Da Silva et al., 2005; Riveros-Godoy et al., 2013).

En Colombia a su vez la producción de hidrógeno electrolítico se ha analizado a través de estudios en centrales hidroeléctricas con la propuesta de suministrar electricidad y calor para suplir necesidades de poblaciones aledañas a la producción (Carvajal-Osorio et al., n.d.).

Así mismo estudios desarrollados en Paraguay en la central de Iguazú proponen un análisis termo-económico sobre la producción de hidrógeno hidroeléctrico (Nadaleti et al., 2021).

En Venezuela el potencial estimado de producción de hidrógeno se ha analizado en función de energía solar obteniendo un aproximado de 2.0×10^7 ton H₂/año, eólica con un equivalente de 3.3×10^5 ton H₂/año, mientras con mini-hidroeléctricas fue posible obtener 7.1×10^5 ton H₂/año (Posso & Zambrano, 2014).

Chile, referente Latinoamericano cuenta con estudios relacionados a la generación de hidrógeno verde con la finalidad de utilizar este como combustible para maquinaria minera, fundiciones de cobre y la fabricación de amoníaco (Fuñez & Reyes, 2019).

Otros países donde se han realizado investigaciones relacionadas a la producción de hidrógeno de fuentes renovables son Canadá, con un estudio de producción de hidrógeno mediante la planta hidroeléctrica Tayson de donde se obtuvo una producción de hidrógeno de 7 ton/día (Olateju & Kumar, 2016). En Suecia, utilizando recursos eólicos se calculó una producción aproximada de 2.56×10^9 ton H₂/año (Siyal et al., 2015). Hong Kong podría generar hidrógeno para cubrir un 40 % de la demanda de energía del sector de transporte mediante fuentes renovables como solar, eólica y biomasa proveniente del tratamiento de desechos sólidos municipales (Ni et al., 2006).

En el Ecuador, varios estudios se han llevado a cabo en cuanto a la producción de hidrógeno de fuentes hidroeléctricas, la mayoría de estudios se basa en esta tecnología y su aplicación en el sector del transporte, sin embargo existen algunos trabajos donde se estudia el potencial de producción de hidrógeno mediante

sistemas fotovoltaicos los cuales se basan en el análisis del Atlas Solar del Ecuador y demuestran que existe la oportunidad de implementar este sistema para la producción de hidrógeno verde (Posso et al., 2016; Posso Rivera & Sánchez Quezada, 2014).

Por tal motivo este estudio tiene como objetivo analizar las diferentes fuentes de energía renovable existentes en el Ecuador (solar, eólica, hidroeléctrica) y su factibilidad para producir hidrógeno verde, para este análisis se utilizará como referencia investigaciones previas, así como datos base geográficos y de producción energética. Con esta información podremos establecer un argumento científico para la introducción y/o combinación de la producción de energía con el hidrógeno como vector energético y establecer su potencial uso para el cambio de la matriz energética de Ecuador conforme a las regulaciones establecidas y aprobadas para cumplir con el tratado de París.

Reflexión

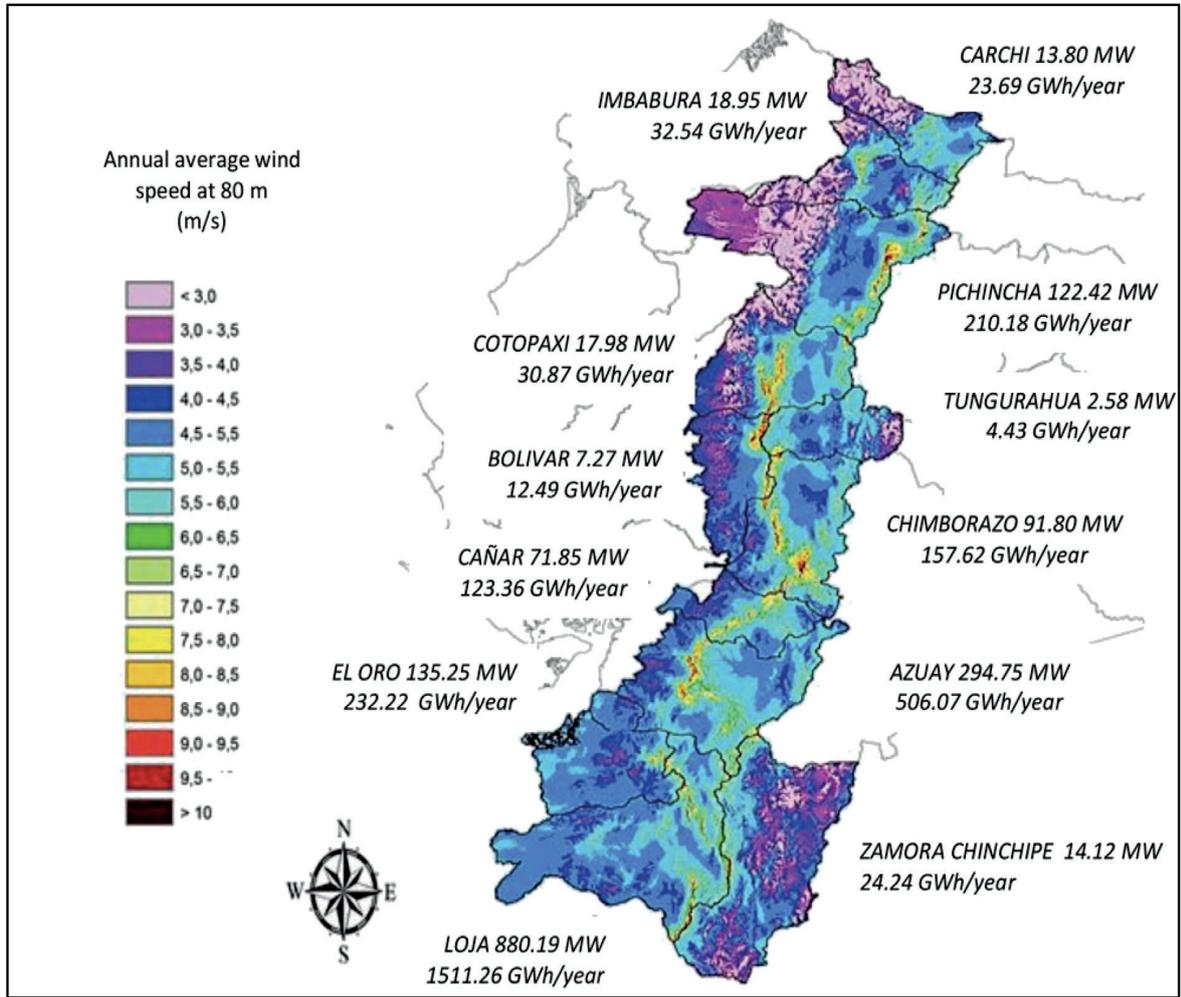
Para la estimación del potencial de producción del hidrógeno se debe considerar lo siguiente: Primero se debe calcular el potencial eléctrico disponible para la electrólisis, este dato proviene de la capacidad de generación de las fuentes de energía renovables. Consecuente, se debe calcular el potencial de hidrógeno que se puede obtener de cada proceso. En este contexto, a continuación describimos el análisis de la estimación del potencial de hidrógeno tomando en consideración los dos pasos antes mencionados.

En Ecuador para estimar el potencial de viento se toma como referencia el Atlas Eólico desarrollado en base a un sistema MesoMap que genera una serie de mapas de variación de velocidades de viento anuales con una resolución de 200 m como se presenta en Fig.1. De esta información se obtiene los valores teóricos de generación eléctrica por provincia, siendo Loja la provincia que presenta los más altos índices de generación, seguida por Azuay, El Oro y Pichincha con un total de

potencial de generación al año de 1511.26 GWh, 506.07 GWh, 232.22 GWh y 210.18 GWh respectivamente (MEER, 2016). En la provincia de Loja, se ha desarrollado desde el 2013 el proyecto de la Central Eólica Villonaco, la cual cuenta con 11 turbinas con la finalidad de aprovechar el potencial eólico de la provincia que representa un 52.4 % del potencial eólico aprovechable del país (CELEC, 2019).

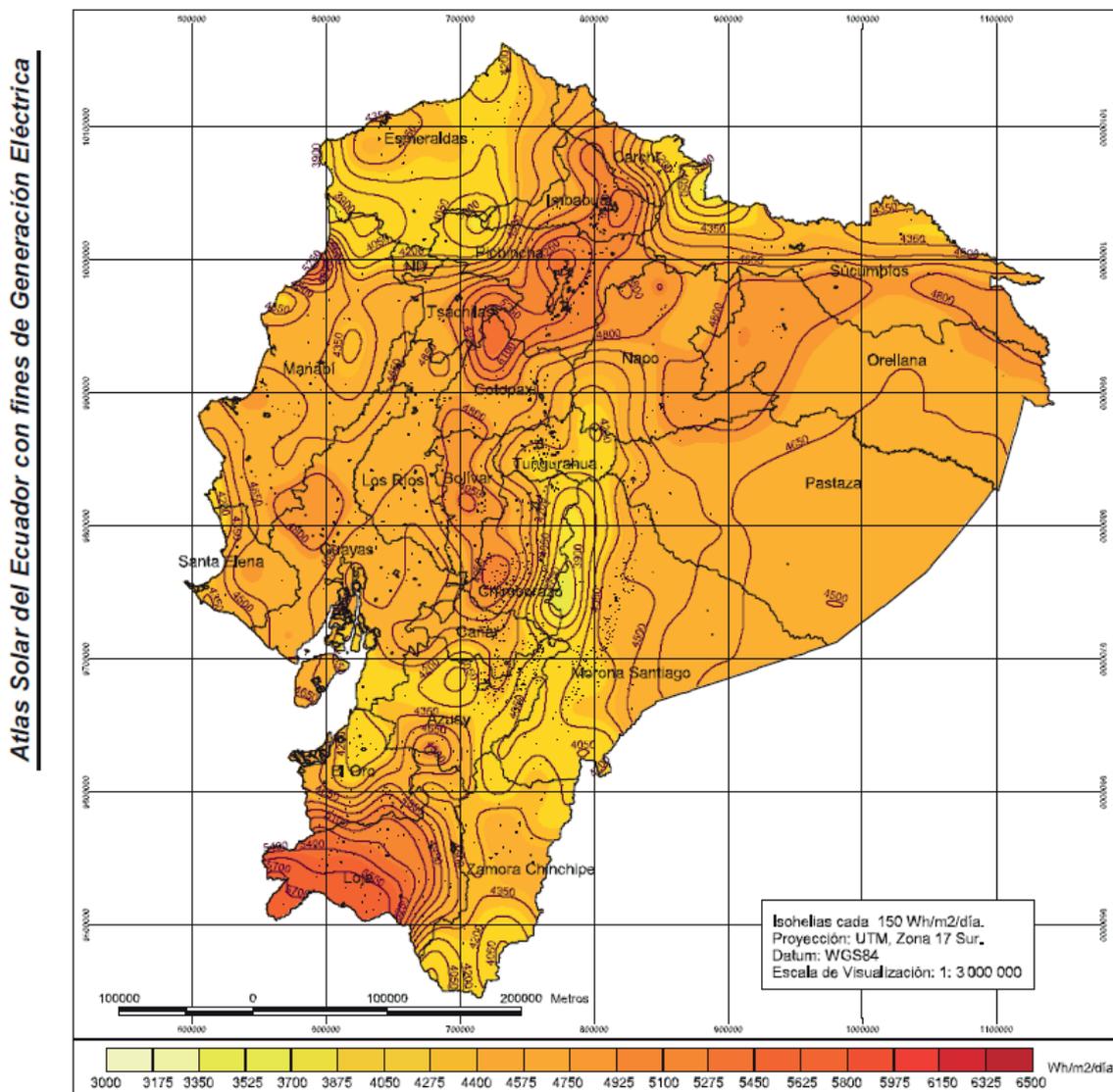
Para estimar el potencial solar en el Ecuador, se hace uso del Atlas Solar el cual tiene como base información del NREL sobre irradiación solar diaria directa, difusa y global. Los resultados son estadísticamente interpolados, generados para celdas de 1 Km² y expresados en un promedio mensual y anual como se puede observar en Fig. 2. De aquí, se obtienen resultados de la capacidad teórica de generación eléctrica por provincia donde provincias como Manabí, Sucumbíos, Orellana, Pastaza y Morona presentan un potencial teórico de generación eléctrica fotovoltaica mayor a los 1000 GWh/año (CONELEC & Energética, 2019).

Para el caso del potencial de generación hidroeléctrica, se presentan 2 posibles métodos de cálculo, el primero asumiendo que un porcentaje aleatoriamente escogido de la producción total de la central es considerado exclusivamente para la producción de hidrógeno. El segundo método está basado en la estimación del potencial energético de agua turbinable que es descartada de la planta hidroeléctrica y que potencialmente puede ser usada para la producción de hidrógeno, aumentando así el factor de eficiencia de la planta en general. Teóricamente, la capacidad hidroeléctrica del Ecuador es de 91 GWh provenientes de un total de 71 centrales hidroeléctricas en todo el Ecuador (MERNNR, 2021).



Fuente: Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, Atlas Eólico del Ecuador con fines de generación eléctrica (2013).

Figura 1. Atlas Eólico del Ecuador, potencial de generación eléctrica en provincias seleccionadas.



Fuente: Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), Atlas Solar del Ecuador con fines de generación eléctrica (2008).

Figura 2. Atlas Solar del Ecuador, insolación global promedio por provincias en el Ecuador.

Una vez conocido el potencial de generación eléctrica de cada uno de las diferentes fuentes renovables estudiadas, se procede con la segunda fase que es la estimación del potencial de hidrógeno que se podría obtener de la generación de las energías renovables a través de la electrólisis utilizando como referencia un electrolizador de membrana de intercambio de protones PEM (Proton Exchange

Membrane) con una eficiencia aproximada del 75 % basada en el poder calorífico superior del hidrógeno y un factor disponible de electrólisis del 95 % valores que se han usado como referencia para varios estudios en la literatura (Altayib & Dincer, 2022; Ma et al., 2020; Padilha et al., 2009). Con estos datos se calcula el potencial de hidrógeno utilizando la ecuación 1.

$$P_{H_2} = \frac{(E_d \times \eta_e \times F_{ae})}{PCS} \quad (1)$$

Donde E_d es el potencial de energía eléctrica disponible para el proceso de electrólisis calculado de las diferentes fuentes renovables (kWh/año), η_e representa el factor de eficiencia del electrolizador (75%), F_{ae} es el factor disponible de la electrólisis (adimensional) y PCS que representa al poder calorífico del hidrógeno (39.4 kWh/kg H_2).

Entonces, de la aplicación de esta fórmula para los resultados antes obtenidos se puede estimar la cantidad de hidrógeno tentativa. Para la energía eólica acorde con los potenciales de generación eléctrica más altos obtenidos (Loja, Azuay, El Oro, Pichincha) del Atlas Eólico se puede estimar una producción de hidrógeno equivalente a 4.45×10^7 kg H_2 /año, siendo Loja la provincia que mayor potencial presenta.

Para la energía solar, utilizando los valores del Atlas Solar de generación eléctrica en el Ecuador, podemos estimar utilizando la ecuación 1 de donde se observa que se podría producir un equivalente a 1.14×10^8 kg H_2 /año, evidenciando que las provincias de la Costa y el Oriente ecuatoriano poseen los potenciales más altos de generación solar fotovoltaica.

Por otro lado, para la generación hidroeléctrica, tomando en consideración los potenciales de electricidad provenientes de esta, se puede estimar que podríamos obtener una potencia de generación de hidrógeno al año equivalente a 1.67×10^8 kg H_2 /año.

Los resultados de este análisis presentan un panorama alentador para el Ecuador ya que demuestran la factibilidad de implementar la tecnología del hidrógeno utilizando recursos renovables existentes en el país, siendo la energía hidroeléctrica la que tendría mayor contribución, esto se presenta favorable para nuestro país por la gran apuesta hidroeléctrica que durante la última década se ha establecido, lo cual permitiría un gran potencial de generación de hidrógeno verde y su contribución a la diversificación de la matriz energética nacional así como al desarrollo sustentable de varios sectores incluyendo la industria, el transporte, y el usuario final. En el Ecuador, el potencial uso del hidrógeno podría tener un nicho importante de mercado en el sector del transporte (Castro Verdezoto et al., 2019; Posso et al., 2017, 2020), reemplazando los vehículos propulsados por combustibles fósiles con vehículos que utilicen celdas de combustible, esto no solamente reduciría considerablemente la importación de gasolina y diésel aportando a la economía nacional, sino que contribuiría con la reducción de emisiones contaminantes generadas por estos; ya que el producto de la combustión del hidrógeno en las celdas de combustible es solamente vapor de agua, de esta manera estaríamos dando cumplimiento al compromiso adquirido por el Ecuador de reducir las emisiones a la atmósfera, en el marco de la Convención de las Naciones Unidas para el Cambio Climático celebrada este 2021 en Glasgow, UK (Naciones Unidas, 2021). Sin embargo, para la implementación de la tecnología del hidrógeno a nivel nacional se requiere de un análisis técnico y económico más detallado, además de políticas públicas que impulsen el uso de las energías renovables y el hidrógeno a nivel nacional e internacional.

Conclusiones

Se analizó la factibilidad de generación de hidrógeno verde en el Ecuador mediante el proceso químico de la electrólisis, en el cual se obtiene el hidrógeno descomponiendo la molécula del agua mediante la aplicación de energía eléctrica para separar los átomos de hidrógeno y de oxígeno. La energía necesaria para la electrólisis, se consideró mediante el potencial de generación eléctrica de 3 tipos de tecnologías renovables existentes en el Ecuador: Solar fotovoltaica, eólica e hidroeléctrica, con un potencial total de generación de hidrógeno equivalente a 3.23×10^8 kg H₂/año, donde la mayor contribución se obtiene de las fuentes hidroeléctricas. Del análisis realizado se concluye que el hidrógeno como vector energético tiene un gran potencial de aplicación en el Ecuador y puede contribuir hacia el cambio en la matriz energética nacional. La inclusión del hidrógeno como una fuente de energía, permite disminuir el consumo de combustibles fósiles y a su vez la necesidad de importación de los mismos, lo cual conlleva beneficios no solamente ambientales; por la disminución de emisión de gases a la atmósfera, sino también económicos.

Se puede evidenciar que el Ecuador presenta grandes proyecciones para la producción de hidrógeno verde y su incorporación en el sistema energético. No obstante, se necesita llevar a cabo estudios que permitan determinar la viabilidad económica y técnica para el desarrollo de este sector energético. Además, es necesario contar con regulaciones y políticas públicas que incentiven el uso de nuevas tecnologías limpias y renovables.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección de Investigación y Desarrollo DIDE de la Universidad Técnica de Ambato por el financiamiento de esta investigación mediante el proyecto #PFICM23 “Análisis de la capacidad de generación de Hidrógeno como energía no contaminante mediante fuentes de energía renovables fotovoltaica y eólica”.

Referencias

Altayib, K., & Dincer, I. (2022). Development of an integrated hydropower system with hydrogen and methanol production. *Energy*, 240, 122780. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122780>

Amezcua Medina, J. A. (2021). *Modelado de un sistema de power-to-hidrógeno basado en energía hidroeléctrica*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/161134>

Ares, J. R., Leardini, F., Sánchez, C., Fernández, J. F., & Ferrer, I. J. (2019). *El hidrógeno como vector energético: Mucho hecho pero casi todo por hacer*. <https://repositorio.uam.es/handle/10486/688504>

Asteria, T. (2018). Powering The World With Hydrogen. *Konfrontasi: Jurnal Kultural, Ekonomi Dan Perubahan Sosial*, 5(2), 55–65. <https://doi.org/10.33258/KONFRONTASI2.V2I2.71>

Bamisile, O., Li, J., Huang, Q., Obiora, S., Ayambire, P., Zhang, Z., & Hu, W. (2020). Environmental impact of hydrogen production from Southwest China's hydro power water abandonment control. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(46), 25587–25598. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.06.289>

Carvajal-Osorio, H., Competitividad, J. B.-I. y, & 2010, undefined. (n.d.). Estudio sobre producción de H₂ con hidroelectricidad para una economía de hidrógeno en Colombia. *Redalyc.Org*. Retrieved January 14, 2022, from <https://www.redalyc.org/pdf/2913/291323517003.pdf>

Castro Verdezoto, P. L., Vidoza, J. A., & Gallo, W. L. R. (2019). Analysis and projection of energy consumption in Ecuador: Energy efficiency policies in the transportation sector. *Energy Policy*, *134*, 110948. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2019.110948>

CELEC. (2019). *CENTRAL EÓLICA VILLONACO LA DE MAYOR PRODUCCIÓN POR TURBINA EN EL MUNDO*. <https://www.celec.gob.ec/gensur/index.php/84-central-eolica-villonaco-la-de-mayor-produccion-por-turbina-en-el-mundo>

Clerici, A., & Furfari, S. (2021). *Challenges for green hydrogen development*. 1–6. <https://doi.org/10.23919/AEIT53387.2021.9627053>

CONELEC, & Energética, C. para la I. (2019). *ATLAS SOLAR DEL ECUADOR CON FINES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA Corporación para la Investigación Energética*.

Connelly, E., Penev, M., Milbrandt, A., Roberts, B., Melaina, M. W., & Gilroy, N. (2020). *Resource Assessment for Hydrogen Production*. <https://www.h2knowledgecentre.com/content/researchpaper1728>

Da Silva, E. P., Marin Neto, A. J., Ferreira, P. F. P., Camargo, J. C., Apolinário, F. R., & Pinto, C. S. (2005). Analysis of hydrogen production from combined photovoltaics, wind energy and secondary hydroelectricity supply in Brazil. *Solar Energy*, *78*(5), 670–677. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2004.10.011>

Egeland-Eriksen, T., Hajizadeh, A., & Sartori, S. (2021). Hydrogen-based systems for integration of renewable energy in power systems: Achievements and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(63), 31963–31983. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.06.218>

Estévez, R. A., Espinoza, V., Ponce Oliva, R. D., Vásquez-Lavín, F., & Gelcich, S. (2021). Multi-Criteria Decision Analysis for Renewable Energies: Research Trends, Gaps and the Challenge of Improving Participation. *Sustainability* *2021*, Vol. 13, Page 3515, *13*(6), 3515. <https://doi.org/10.3390/SU13063515>

Filippov, S. P., & Yaroslavtsev, A. B. (2021). Hydrogen energy: development prospects and materials. *Russian Chemical Reviews*, 90(6), 627–643. <https://doi.org/10.1070/RCR5014/XML>

Fuñez, C., & Reyes, L. (2019). *No Title El hidrógeno como vector energético pieza clave en la descontaminación de la economía chilena.*

Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2020). Hydrogen from solar energy, a clean energy carrier from a sustainable source of energy. *International Journal of Energy Research*, 44(6), 4110–4131. <https://doi.org/10.1002/ER.4930>

Inter-American Development Bank. (2021). *El papel de la transición energética en la recuperación sostenible de América Latina y el Caribe | Publications.* <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/El-papel-de-la-transicion-energetica-en-la-recuperacion-sostenible-de-America-Latina-y-el-Caribe.pdf>

Jovan, D. J., Dolanc, G., & Pregelj, B. (2021). Cogeneration of green hydrogen in a cascade hydropower plant. *Energy Conversion and Management: X*, 10, 100081. <https://doi.org/10.1016/J.ECMX.2021.100081>

Kakoulaki, G., Kougias, I., Taylor, N., Dolci, F., Moya, J., & Jäger-Waldau, A. (2021). Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. *Energy Conversion and Management*, 228, 113649. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.113649>

Kovač, A., Paranos, M., & Marciuš, D. (2021). Hydrogen in energy transition: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(16), 10016–10035. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.11.256>

Ma, F., Li, L., Zeng, Q., & Zheng, J. (2020). Development Concept of Integrated Energy Network and Hydrogen Energy Industry Based on Hydrogen Production Using Surplus Hydropower. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 555(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/555/1/012022>

MEER. (2016). *MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGIA RENOVABLE*

PRESENTÓ EL PRIMER ATLAS EÓLICO DEL ECUADOR – Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. <http://historico.energia.gob.ec/ministerio-de-electricidad-y-energia-renovable-presento-el-primer-atlas-eolico-del-ecuador/>

Melaina, M., Penev, M., & Heimiller, D. (2013). *Resource Assessment for Hydrogen Production: Hydrogen Production Potential from Fossil and Renewable Energy Resources.* <https://doi.org/10.2172/1260322>

MERNNR. (2021). *Plan Maestro de Electricidad.* chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.rekursyenergia.gob.ec%2Fwp-content%2Fuploads%2F2020%2F01%2F4.-EXPANSION-DE-LA-GENERACION.pdf&clen=3814251&chunk=true

Milbrandt, A., & Mann, M. (2009). *Hydrogen Resource Assessment: Hydrogen Potential from Coal, Natural Gas, Nuclear, and Hydro Power.* <https://doi.org/10.2172/950142>

Naciones Unidas. (2021). *COP26 THE GLASGOW CLIMATE PACT.* <https://ukcop26.org/wp-content/uploads/2021/11/COP26-Presidency-Outcomes-The-Climate-Pact.pdf>

Nadaleti, W. C., Borges dos Santos, G., & Lourenço, V. A. (2020). The potential and economic viability of hydrogen production from the use of hydroelectric and wind farms surplus energy in Brazil: A national and pioneering analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(3), 1373–1384. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.08.199>

Nadaleti, W. C., Lourenço, V. A., & 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>

Ni, M., Leung, M. K. H., Sumathy, K., & Leung, D. Y. C. (2006). Potential of renewable hydrogen production for energy supply in Hong Kong. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(10), 1401–1412. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2005.11.005>

NREL. (2022). *Renewable Electrolysis | Hydrogen and Fuel Cells | NREL*.

<https://www.nrel.gov/hydrogen/renewable-electrolysis.html>

Olateju, B., & Kumar, A. (2016). A techno-economic assessment of hydrogen production from hydropower in Western Canada for the upgrading of bitumen from oil sands. *Energy*, 115, 604–614.

<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.08.101>

Padilha, J. C., da Trindade, L. G., de Souza, R. F., & Miguel, M. (2009). An evaluation of the potential of the use of wasted hydroelectric capacity to produce hydrogen to be used in fuel cells in order to decrease CO₂ emissions in Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(19), 7898–7902.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.07.074>

Posso, F., Narváez, R. A. C., Sigüencia, J., & Sánchez, J. (2017). Use of Municipal Solid Waste (MSW)-Derived Hydrogen in Ecuador: Potential Applications for Urban Transportation. *Waste and Biomass Valorization* 2017 10:6, 10(6), 1529–1537.

<https://doi.org/10.1007/S12649-017-0161-1>

Posso, F., Sánchez, J., & Sigüencia, J. (2016). Estimación del Potencial de Producción de Hidrógeno a partir de Energía Solar Fotovoltaica en Ecuador. *Revista Técnica “Energía,”* 12(1).

<https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v12.n1.2016.62>

Posso, F., Sigüencia, J., & Narváez, R. (2020). Residual biomass-based hydrogen production: Potential and possible uses in Ecuador. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(26), 13717–13725.

<https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.09.235>

Posso, F., & Zambrano, J. (2014). Estimation of electrolytic hydrogen production potential in Venezuela from renewable energies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(23), 11846–11853.

<https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2014.06.033>

Posso Rivera, F., & Sánchez Quezada, J. (2014). La Economía del Hidrógeno en el Ecuador: oportunidades y barreras. *Avances En Ciencias e Ingeniería*, 6(2).

<https://doi.org/10.18272/aci.v6i2.187>

Riveros-Godoy, G. A., Cavaliero, C., & Silva, E. (2013). Analysis of electrolytic hydrogen production models and distribution modes for public urban transport: study case in Foz do Iguacu, Brazil. *International Journal of Energy Research*, 37(10), 1142–1150. <https://doi.org/10.1002/ER.2972>

Sadik-Zada, E. R. (2021). Political Economy of Green Hydrogen Rollout: A Global Perspective. *Sustainability 2021*, Vol. 13, Page 13464, 13(23), 13464. <https://doi.org/10.3390/SU132313464>

Sigal, A., Leiva, E. P. M., & Rodríguez, C. R. (2017). Assessment of the potential for hydrogen production from renewable resources in Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(16), 8204–8214. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2014.03.157>

Siyal, S. H., Mentis, D., Mörtberg, U., Samo, S. R., & Howells, M. (2015). A preliminary assessment of wind generated hydrogen production potential to reduce the gasoline fuel used in road transport sector of Sweden. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(20), 6501–6511. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2015.03.108>

Tian, L. (2021). *Almacenamiento químico de energía eólica: producción de hidrógeno*. <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/180149>

Valverde Tapiador, A. (2021). *Sistema Híbrido Eólico Fotovoltaico con Almacenamiento para Producción de Hidrógeno*.