

Generación de hidrógeno verde con energía eólica en La Ventosa

Falcon Salinas Paris Daniel, Medina Moreno Sebastián, Tagle Nardelli Pinto José Ignacio,
Martínez Guerrero Miguel Cuauhtli, Peña Prado Perla Karina

Preparatoria de la Universidad La Salle México, Unidad Santa Teresa, Ciudad de México, México

pd.fs@lasallistas.org.mx, sebastianmedina@lasallistas.org.mx,
josetagle@lasallistas.org.mx, m.cuauhtli@lasallistas.org.mx,
perla.pena@lasallistas.org.mx

Resumen. Este proyecto se ha diseñado con el propósito de promover y poner en práctica el uso de las energías renovables e hidrógeno verde, para así disminuir las emisiones de dióxido de carbono y ayudar a combatir el cambio climático global al eliminar la intermitencia de la energía eólica. Se propone el ahorro de 100 Ton de CO₂ con el uso de aerogeneradores ubicados específicamente en la zona de La Ventosa Oaxaca los cuales, mediante la electrólisis del agua, generarían hidrógeno verde. Dicho gas, al ser almacenado, podría ser una posible solución ante el problema de intermitencia que presenta la energía renovable antes mencionada. El desarrollo de este proyecto además de generar empleos fomenta una competencia que da lugar a mejores precios al consumidor y facilita el cambio a las energías renovables; logrando así impactar en una problemática prioritaria como lo es energía y cambio climático partiendo de las ODS 7 y 13.

Palabras Clave: Hidrógeno verde, Electrólisis, Celda de combustible, Energía eólica, La Ventosa, Estequiometría.

1 Descripción de la problemática prioritaria abordada

Las energías renovables son el medio más limpio de producción de energía en la industria, sin embargo, presentan un grave problema y es la intermitencia, ¿cómo podría un hospital tener energía únicamente cuando hay viento, o cuando hay sol?, la respuesta más efectiva es el hidrógeno verde.

El hidrógeno verde es el uso de la energía generada por una fuente limpia para electrolizar agua y conseguir hidrógeno, este gas puede ser almacenado para posteriormente ser introducido en una celda de combustible y producir electricidad, la misma que originalmente se generó. Todo esto sin producir mayor contaminante que vapor de agua y dando una posible solución al problema de intermitencia.

2 Objetivo

Ahorrar 100 toneladas de CO₂ producidas mediante la combustión de gas LP, este ahorro se dará a partir del aprovechamiento de la energía eólica y almacenada como hidrógeno mediante un proceso electrolítico para que esta pueda ser usada en cualquier momento y no únicamente cuando haya viento.

3 Propuesta de solución

Lo primero que se necesitará saber la cantidad de energía necesaria para ahorrar 100 toneladas de CO₂ producido mediante el gas LP en lo que se presenta en nuestro país. Considerando la (**Figura 1**) y mediante el uso de la regla de tres, podemos afirmar que para ahorrar 100T de CO₂ se necesitan 1.53×10^{12} J, o 10,736.842 kg de H₂, ya que cada 2 gramos de hidrógeno generan 285 kJ de energía.

A fin de obtener esta cantidad de hidrógeno se realizará un proceso electrolítico, y dado que en este proceso se pierde 40% de la energía de entrada, necesitamos cubrir este déficit aumentando la producción de energía del aerogenerador en un mismo 40%; por lo tanto, para ahorrar las 100T de CO₂ se necesitan 2.55×10^{12} J. Lo que equivale a 708,333 kW-h que se usan para producir los 10,736.842 kg de H₂, por lo tanto, para generar cada kilo de hidrógeno se necesitan 66 kW-h aproximadamente.

Para poder desarrollar nuestra propuesta de poner aerogeneradores en La Ventosa necesitamos calcular la potencia eólica de estos. Ocuparemos un aerogenerador GE 1.5sl con un área de barrido de 4,657 m² y con la velocidad promedio del viento en esa zona que es de 11.29 m/s, obtenemos una potencia eólica de 3,350,873.77 W. (ver ecuaciones 1 y 2)

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

$$3,350,873.77 = \frac{1}{2} (1)(4657)(11.29^3) \quad (2)$$

Con esta información también podemos calcular la energía que puede producir un aerogenerador en 30 días (2,592,000 segundos) y con un coeficiente de desempeño de 40%, lo que nos da una cantidad de 3.474x10¹²J en un mes. (ver ecuaciones 3 y 4)

$$E = (P)(\Delta t)(\%) \quad (3)$$

$$3.474 \times 10^{12} = (3,350,873.77)(2,592,000)(.40) \quad (4)$$

Esto quiere decir que con solo un aerogenerador se pueden generar 2.55x10¹²J en 22.02 días, funcionando este al 40%.

En cuanto a los costos de producción y el precio de venta, se pueden obtener de la siguiente manera. Según la GIZ Chile (La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammen), el costo promedio del kilo de hidrógeno en varias **plantas fotovoltaicas** es de 9.53 dólares; sin embargo, según la IRENA (International Renewable Energy Agency) 2019, el costo del kW-h de la **energía eólica** (0.053 dólares) es menor que el del kW-h de la **energía fotovoltaica** (0.068 dólares), por lo tanto, el costo de producción del hidrógeno verde por medio de energía eólica será menor que el de la energía fotovoltaica. Para calcular dicho costo, podemos usar las siguientes ecuaciones.

$$\text{Costo de la energía necesaria eólica para producir 1kg de H}_2 + \text{Costo de la maquinaria y demás procesos para producir 1 kg de H}_2 = \text{Costo total de producción del kg de H}_2 \text{ eólico} \quad (5)$$

$$\text{Costo de la energía necesaria fotovoltaica para producir 1kg de H}_2 + \text{Costo de la maquinaria y demás procesos para producir 1 kg de H}_2 = \text{Costo total de producción del kg de H}_2 \text{ fotovoltaico} \quad (6)$$

Al ser la maquinaria y los demás procesos los mismos en ambas plantas, ya que únicamente se cambia la fuente de energía (eólica o fotovoltaica), es posible calcular los valores de estos, despejándolos, y sustituyendo en la ecuación 6 el costo total de producción del kg de H₂ fotovoltaico (9.53 dólares) y de la energía fotovoltaica necesaria, se sabe que se necesitan 66 kW-h para producir 1 kg de H₂ y que aquel tiene un precio de 0.068 dólares para la energía fotovoltaica, quedando de la siguiente forma.

$$\text{Costo Maquinaria y demás procesos} = 9.53 - [(66)(0.068)] \quad (7)$$

$$\text{Costo Maquinaria y demás procesos} = 5.042 \text{ dólares} \quad (8)$$

Una vez obtenido el costo de la maquinaria y de los demás procesos se usa ese dato para calcular el costo total de producción del kg de H₂ eólico en la ecuación 5 al sustituirlo junto con el valor del costo de la energía eólica necesaria, considerando que se necesitan 66 kW-h para producir 1 kg de H₂ y que aquel tiene un precio de 0.053 dólares para la energía eólica, quedando así.

$$[(66)(0.053)] + (5.042) = \text{Costo total de producción del kg de H}_2 \text{ eólico} \quad (9)$$

$$[(66)(0.053)] + (5.042) = 8.54 \text{ dólares} \quad (10)$$

El precio de venta del hidrógeno verde es de 120 pesos en México, lo que equivale a unos 5.83 dólares, si sólo se vendiera el hidrógeno habría pérdidas de 2.71 dólares por kg de hidrógeno al restar el costo de producción al precio de venta; y no sería un negocio rentable por el momento, sin embargo, recordemos que, en la electrolisis, no sólo se produce el hidrógeno sino también el oxígeno, mismo que podemos vender. Para obtener las ganancias del oxígeno se deben de saber 2 cosas, el precio de venta de 1 kg de oxígeno y cuanto oxígeno se obtiene por cada kg de hidrógeno. El primero se calcula tomando en cuenta que una recarga de 1 m³ de oxígeno cuesta 45 pesos ya que la densidad del oxígeno ser de 1.331 m³ 1 kg de oxígeno serían 0.751 m³ de oxígeno aproximadamente o 33.8 pesos o 1.64 dólares aproximadamente. Lo segundo puede ser calculado haciendo una regla de 3 si se considera que cada 2 gramos de H₂ vienen

acompañados de 16 g de O₂ entonces 1 kg de H₂ vendrá acompañado junto con 8kg de O₂. Esto quiere decir que por cada kg de H₂ producido (-2.71 dólares) se producen también 8 kg de O₂ (270.4 pesos o 13.12 dólares).

Esto significa que por cada kg de H₂ y por lo tanto cada 8kg de O₂ se ganaría un total de 10.41 dólares. Cabe aclarar que el costo total de producción de 1 kg de H₂ y 8 de O₂ es el mismo, ya que ambos suceden en la electrolisis del agua. En total produciríamos 10,736.842 kg de hidrógeno (-29,096.841 dólares) y 85,894.736 kg de O₂ (140,867.367 dólares) resultando en una ganancia total de 111,770.526 dólares cada 22.02 días.

4 Discusión de resultados e impactos obtenidos

Con un solo aerogenerador en la ventosa en tan solo 22.08 días podemos generar 2.55 TJ, la energía necesaria para ahorrar 100 Ton de CO₂ al producir 10,736.843 kg de H₂ verde con un valor energético total de 1.53 TJ, y a su vez producir 85,894.736 kg de oxígeno. Esto cumpliría con el ODS número 7 de producir energía asequible y no contaminante; y número 13 de acción por el clima, al ser el hidrógeno un medio eficaz de acabar con el problema de la intermitencia de las energías renovables y al ser una fuente de energía cuyo único contaminante es el vapor de agua. Por otro lado, las ganancias económicas del proyecto se pueden dividir en 2, las ganancias por la venta de hidrógeno verde y las ganancias por venta de oxígeno. La primera da una pérdida de 2.71 dólares por kg de hidrógeno verde, sin embargo, diferentes organizaciones esperan que para el 2030 su costo de producción se reduzca dramáticamente, incluso esperando alcanzar el precio de un dólar por kg, pudiendo así tener ganancias mayores en un futuro evitando pérdidas; además las pérdidas actuales por la venta del hidrógeno verde se compensan con las del oxígeno ganando así 10.71 dólares por kg de hidrógeno producido. Esto, además de lo anterior, cumple con el ODS número 8 de trabajo decente y crecimiento económico al ser un negocio rentable que pueda brindar muchos empleos.

5 Conclusiones y perspectivas futuras

Como pudimos observar el hidrogeno verde, además de ser un buen negocio, es una manera muy inteligente de almacenar y transportar energías limpias, ya que la energía que produce en la celda de combustible es muy similar a la potencia que se necesita para generarlo por medio de las susodichas técnicas *ecofriendly*.

Estas nuevos métodos y tecnologías tienen muchísimo potencial de desarrollo en un futuro no muy lejano ya que muchas empresas están incursionando en estas ramas lo que nos favorece a todos puesto que promueve la competencia y mejoran tanto la calidad de los productos como de los precios, sobre todo para la sociedad en general y las empresas fabricantes.

Sin duda toda una revolución energética en favor de la eficiencia y ecología.

6 Agradecimientos

A nuestras autoridades de la Preparatoria de la Universidad La Salle Unidad Santa Teresa por su apoyo para la realización de este proyecto.

7 Referencias

1. A. (2014, 1 agosto). Celdas de combustible. Saberes y Ciencias. <http://saberesyciencias.com.mx/2012/09/16/celdas-de-combustible/>
2. Barrigh, J., Comunicación personal, Ballard Generation Systems, octubre de 1999.
3. Bauer, L. (s. f.). GE General Electric GE 1.5sl - 1,50 MW - Aerogenerador. wind-turbine-models.com. Recuperado 14 de junio de 2022, de <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/20-ge-general-electric-ge-1.5sl>
4. Boosting Power Plant Efficiency, (1998) Departamento de Energía de los Estados Unidos, Energía de Origen Fósil.
5. C.U.Cano. (1999, septiembre/octubre). Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica. Instituto de Investigaciones Estéticas (IIE): boletín iie.
6. El Financiero. (2021, 12 mayo). Conforme suba el costo del gas natural, el hidrógeno verde entrará en precios competitivos: investigadora del IPN. Recuperado 6 de junio de 2022, de

- <https://www.elfinanciero.com.mx/empresas/2021/05/12/conforme-suba-el-costo-del-gas-natural-el-hidrogeno-verde-entrara-en-precios-competitivos-rosa-gonzalez-investigadora-del-ipn/>
7. Energía eólica: cómo funciona y sus ventajas. (2021, 27 junio). factorenergia. Recuperado 1 de diciembre de 2021, de <https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/energia-eolica/>
 8. Enshassi, A. (2014). Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción. Revista ingeniería de construcción. Recuperado 1 de diciembre de 2021, de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732014000300002
 9. Fernández, G. (2018, 1 septiembre). Introducción a la teoría cinética de los gases | FísicoQuímica. Química General. Recuperado 1 de diciembre de 2021, de <https://www.quimicafisica.com/introduccion-teorica-cinetica-de-los-gases.html>
 10. Gubinelli, G. (2021, 11 junio). ¿Cuánto cuesta producir hidrógeno con plantas fotovoltaicas menores a 3 MW? Energía Estratégica. <https://www.energiaestrategica.com/cuanto-cuesta-producir-hidrogeno-con-plantas-fotovoltaicas-menores-a-3-mw/>
 11. Karol García 18 de mayo de 2021, 11:39, Horas, H. D. V. P., Horas, H. A. P., Horas, H. G. F. P., Horas, H. G. K. A. P., González, L., Content, B., González, L., Flores, L., del PilarMartínez, M., R., K., & Reuters. (2021, 19 mayo). Crecimiento eólico en México se frenará a partir del 2022. El Economista. <https://www.economista.com.mx/empresas/Crecimiento-eolico-en-Mexico-se-frenara-durante-la-presente-administración-AMDEE-20210518-0057.html>
 12. La atmósfera y sus capas - Generalitat Valenciana. (2015). Generalitat Valenciana. Recuperado 1 de diciembre de 2021, de <https://agroambient.gva.es/es/web/calidad-ambiental/la-atmosfera-y-sus-capas>
 13. Leyes de los gases: cuáles son y sus fórmulas (con ejemplos). (2021, 23 junio). Toda Materia. Recuperado 1 de diciembre de 2021, de <https://www.todamateria.com/leyes-de-los-gases/>
 14. Manzanar, J. (2021, 29 junio). Hidrógeno: características y cómo se produce. okdiario.com. <https://okdiario.com/curiosidades/hidrogeno-caracteristicas-h2o-450494>
 15. Malo, T.J. y C.U. Cano, (1999, enero) La tecnología de celdas de combustible como alternativa de generación eléctrica, reporte, Instituto de Investigaciones Eléctricas, IIE/15/10902/1 01/P.
 16. OCU. (2019, 27 septiembre). ¿Cuánta energía consume una casa? www.ocu.org. Recuperado 14 de junio de 2022, de <https://www.ocu.org/vivienda-y-energia/gas-luz/noticias/cuanta-energia-consume-una-casa-571584>
 17. Ofrecemos. (s. f.). Oxigas «La Central». Recuperado 14 de junio de 2022, de <https://oxigas-la-central.ueniweb.com/price-list>
 18. Precio del Hidrógeno. (2021, 9 marzo). Hidrogeno verde. Recuperado 14 de junio de 2022, de <https://hidrogeno-verde.es/precio-del-hidrogeno/>
 19. ¿Qué es la Electrolisis? (s. f.). HelloAuto. Recuperado 1 de diciembre de 2021, de <https://helloauto.com/glosario/electrolisis>
 20. ¿Qué significa energía limpia? - ¿Sabías que? (2010, 30 marzo). Compromiso RSE. <https://www.compromisorse.com/sabias-que/2010/03/30/que-significa-energia-limpia/>
 21. Rodríguez, A. R. (2021, 29 junio). ¿Qué es la energía eléctrica? BBVA NOTICIAS. Recuperado 1 de diciembre de 2021, de <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-energia-electrica/>
 22. Troncoso G., F. (2021, julio). Claves del Hidrógeno Verde - InduAmbiente. InduAmbiente. Recuperado 14 de junio de 2022, de <https://www.induambiente.com/informe-tecnico/calderas/claves-del-hidrogeno-verde#:~:text=Para%20producir%201%20kg%20de%20hidr%C3%B3geno%20por%20electr%C3%B3lisis%20se%20necesitan,eficiencia%20del%20equipo%20a%20utilizar>
 23. Westreicher, G. (2021, 26 mayo). Derivada de una función. Economipedia. <https://economipedia.com/definiciones/derivada-de-una-funcion.html>

Muestra	Densidad Fase líquida	Densidad Fase gas	Contenido de carbono	Poder calorífico Neto	Contenido de carbono	Factor de emisión		
	kg/l	kg/m ³	% peso	MJ/kg	kg C /GJ	kg CO ₂ /TJ	kg CO ₂ /kg GLP	kg CO ₂ /l GLP fase líquida
Promedio	0.525	1.96	81.99	46.16	17.76	65,082.90	3.00	1.58
Desviación estándar	0.010	0.06	0.12	0.09	0.06	221.52	0.00	0.03
Incert. 95% Confianza	0.007	0.04	0.08	0.06	0.04	142.99	0.00	0.02
% Incert. 95%Confianza	1.248	2.10	0.10	0.12	0.22	0.22	0.10	1.34
# Muestras % deseado incert	1	3	1	1	1	1	1	2

Figura 1. Factores de emisión para gas LP (INECC)