

## Implementación de una herramienta de cálculo para LCOE

---

### 1 Contexto energético del hidrógeno y LCOH

El cambio climático se ha convertido en el principal problema de la humanidad debido al aumento de la temperatura y concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Un pedazo del problema se remonta en la forma en la que se está produciendo energía en la actualidad, pues casi un 83.5 % proviene de combustibles fósiles. Por lo que en las últimas décadas se ha buscado poder utilizar la producción de energía por medios alternativos, con el fin de poder disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> [1]. Entre las opciones mas viables ha vuelto a sonar el hidrógeno como una posible solución a este problema.

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica y el más abundante. Fue descubierto por Robert Boyle en 1671, pero no fue hasta un siglo después que se le dio el nombre característico con que hoy lo conocemos, ya que en un principio solo se conocía por ser “aire inflamable”, por lo que se deben tener las precauciones al usarlo. Lo curioso del hidrógeno es que puede reaccionar con la mayoría de la tabla periódica creando compuestos simples o complejos [2].

Debido a su afinidad con otros elementos y su abundancia desde hace bastante tiempo se ha pensado como una alternativa en la producción de energía, siendo mencionado hasta por el gran escritor Julio Verne en 1884 como el nuevo carbón [3]. Se ha buscado a lo largo de los años que su producción sea limpia, ya sea por medio de energías o recursos renovables. Aun así, el hidrógeno si ha estado presente en la industria farmacéutica o en la producción de plásticos y fertilizantes, pero se caracteriza principalmente por ser el combustible en cohetes [2].

Ahora bien, al conocer un poco mas del hidrógeno se puede abordar con respecto al eje central de este documento, que es el hidrógeno como un vector energético. Se debe recalcar la palabra vector, esto se debe a que se debe elaborar [2]. La producción del hidrógeno se da por la división del agua con ayuda de una energía renovable, procesos biológicos o reacciones en los combustibles fósiles [1]. En la figura 1 se puede observar las maneras del proceso del hidrógeno.

En consecuencia, se ha adoptado una nomenclatura de colores para poder diferenciar la forma de producción del hidrógeno, pero este método es ineficiente ya que no es algo estándar y puede cambiar dependiendo del país. Cabe resaltar que el hidrógeno es un gas incoloro, solo se usa el tema de colores para poder diferenciar de donde proviene. Como ejemplo se presenta la nomenclatura para Colombia expuesta en el documento “Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia” [4].

- Gris: El hidrógeno se produce por medio de los combustibles fósiles sin captura de CO<sub>2</sub>.
- Azul: El hidrógeno se produce por medio de los combustibles fósiles con captura de CO<sub>2</sub>.
- Verde: El hidrógeno es produce por fuentes no convencionales de energía renovable.

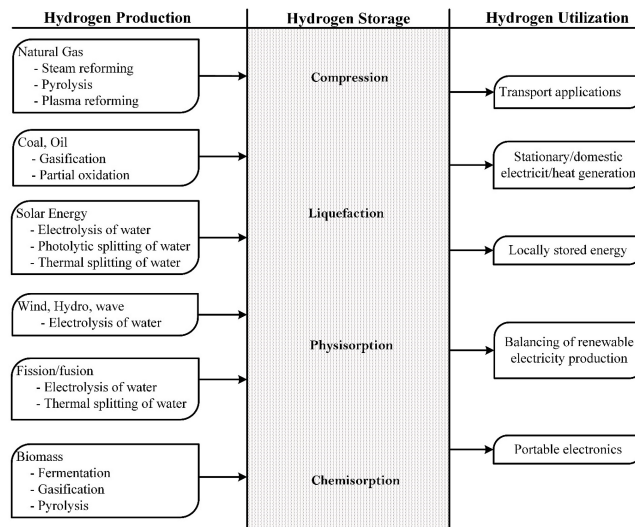


Figure 1: Producción, almacenamiento y aplicaciones del hidrógeno [1]

Pese a que suena como una solución bastante viable casi el 96% de la forma como se produce actualmente el hidrógeno es por medio de los combustibles fósiles y solo el 4% es por medio de la electrolisis del agua [1]. Para entrar en contexto se definirá los principales métodos que se utilizan para la producción de hidrógeno:

- **Termólisis:** Se da para energías renovables y energía nuclear. La termólisis es la separación del oxígeno e hidrógeno del agua, el proceso se da por medio de llegar a altas temperaturas por lo que se tienen problemas con la estabilización [1].
- **Electrolisis:** La electrolisis se da a partir de paso de corriente entre el ánodo y cátodo, de esta forma el hidrógeno se da sobre la superficie del cátodo. La desventaja de este método son los costos, para que logre ser sostenible se debe tener energías renovables como entrada. Asimismo, hoy en día existen tres formas de realizar este proceso a nivel comercial [1].
  - PEM
  - Electrolizador alcalino
  - Electrolizador a alta temperatura
- **Reformado y gasificación:** Este método es el más común en la actualidad, pero es el mayor generador de dióxido de carbono produce.

Primero, en el caso del reformado existen tres casos para convertir el hidrocarburo gaseoso en hidrógeno, los primeros dos son bastante similares, pero el primero si necesita calor externo en comparación al segundo, lo que hace un poco más eficiente el ATR. El tercero si es solo una oxidación parcial de metano en los residuos del crudo.

- Reformado autotérmico (ATR)
- Reformado con vapor (SR)
- Oxidación parcial (POX)

Segundo, en el caso de gasificación se tiene el problema de los altos niveles de CO<sub>2</sub> que deja el proceso, pues consiste en oxidar los combustibles a altas temperaturas, después se eliminan las

impurezas y por último se pasa por un reactor, el resultado es hidrógeno y grandes cantidades de CO<sub>2</sub>[1].

En cuanto al almacenamiento de hidrógeno es importante resaltar que es fácil de transportar, en varios casos con la energía renovable, la geografía del lugar es un impedimento para optar por implementar energías como las eólicas o solares [7]. Además, la transmisión puede ser costosa dependiendo de la distancia, es por esto que sigue siendo mas viable los combustibles fósiles, ya que son fáciles de llevar desde su extracción hasta el lugar en el que se requiere [1].

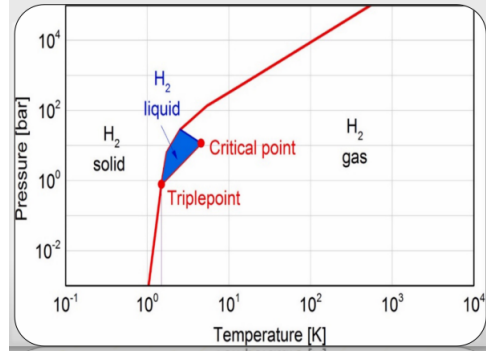


Figure 2: Estados del hidrógeno [8]

De ese modo, el almacenamiento del hidrógeno es más común que se haga por medio de su estado líquido o gaseoso. Primero para llegar a un estado líquido se debe tener en cuenta que según la figura 2 se debe llegar a temperaturas de casi -252.87 °C , pero se cuenta con el problema que tiene una energía volumétrica baja y puede sufrir de evaporación cuando se transporte. Segundo en el caso del esta gaseoso la presión debe encontrarse por lo menos de 350 a 700 bar y es la manera más común en la actualidad, pues se puede manejar con la temperatura del ambiente, lo que hace que sea más viable [5].

Se resalta el hecho de que el tema del hidrógeno se encuentra por ahora en una etapa de inicio por lo que los costos no son los óptimos y viables. Para conocer el valor de producción de 1Kg de hidrógeno verde existe el Costo Nivelado del Hidrógeno o mejor conocido por su abreviatura en ingles LCOH [6]. Para poder obtener este valor se debe tener en cuenta que:

- El LCOH incluye los costos que se genera de la explotación de activos que fueron necesarios para la producción.
- Los datos de producción, es decir, se debe contar con la información sobre la generación de energía por el periodo de un año a cada hora. En este ítem es necesario que se considere la ubicación y condiciones del sitio .
- Gastos de capital (CAPEX). Se tiene en cuenta todas las inversiones que se realizan en pro de los activos, por lo que el énfasis principal recae en la compra de equipos.
- Gastos de operaciones (OPEX). Se tiene en cuenta los gastos en la operación.

Por lo que la formula para su calculo quedaría de la siguiente forma:

$$LCOE_{h2} = P_{ins}I \times \frac{FRC + M(f_p)}{hf_p Q_{h2}} + Q_{H_2O} P_{H_2O} + Q_e P_e \quad (1)$$

Los parámetros para ecuación 1 son:

- $P_{ins}$  : La potencia del electrolizador en  $MW$  .
- $I$  : Inversión de la capacidad instalada en  $USD/MW$  .
- $FRC$  : Factor de recuperación de capital en función de la tasa de descuento :
- $f_p$  : Porcentaje del factor de planta.
- $M$  : Porcentaje de la inversión en función de los costos para el mantenimiento.
- $h$  : Horas en un año.
- $Q_{H_2}$  : Producción de hidrógeno en  $kg/h$
- $Q_{H_2O}$  : Agua consumida en  $m_3/kgdehidrógeno$
- $P_{H_2O}$  : Precio por el agua en  $USD/m_3$
- $Q_e$  : Electricidad consumida en  $[kWh/kgdehidrógeno]$
- $P_e$  : Precio de la electricidad en  $USD/kWh$

Es así que se puede llegar a un modelo óptimo. Por el momento el hidrógeno tiene un precio bastante elevado, pero se espera que la demanda en los siguientes años pueda ir en bajando. Además, se predice que el país con mayor inversión es Asia, los países del continente han fijo ciertas metas de instalar estaciones de servicios para sus automóviles de hidrógeno [4] . Es una inversión bastante llamativa por ser una solución sostenible en cuanto al tema de energías para los siguientes años, con el fin de poder disminuir las emisiones y poder detener el cambio climático.

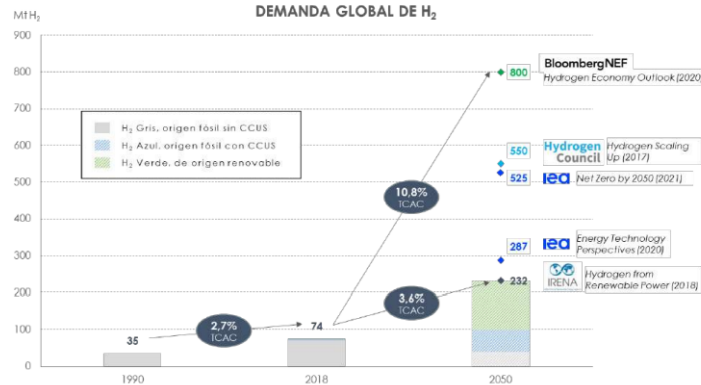


Figure 3: Demanda de hidrógeno a nivel global [4]

En la figura 3 se observa la demanda de hidrógeno a nivel mundial, se ve como se destaca el verde, con el objetivo ya antes mencionado de disminuir las emisiones de carbono. Su producción actual va enfocado al parque automotriz, pero con el paso de los años se puede utilizar para alimentar edificaciones o contribuir con la energía dentro de las ciudades [4].

## 2 Beneficios, impactos y retos del hidrógeno

Como se pudo entender anteriormente, el Hidrógeno se ha identificado como un vector energético importante debido a sus grandes beneficios en cuestión de sostenibilidad y reducción de gases de efecto invernadero (GEI). Adicionalmente, es reconocido por su capacidad para almacenar y transportar energía de manera eficiente y limpia. Además, se deben conocer las metas de Colombia descritas en el Plan Energético Nacional 2020-2050 y en los acuerdos de París, en donde la reducción de emisiones (Reducción del 20% de emisión de GEI para el 2030) y la implementación de energías renovables no convencionales

(ERNC) son los principales protagonistas [9]. Con esto en mente, Colombia tiene en el Hidrógeno un gran potencial para cumplir con lo pactado el 2015 en París, pudiendo diversificar su matriz energética, reducir la dependencia de combustibles fósiles y optar por una economía muy baja en carbono. Sin embargo, es necesario tener claro lo que el hidrógeno nos puede aportar, teniendo en cuenta su impacto y los retos que trae consigo para su utilización en Colombia.

En primer lugar, ya se vio que el Hidrógeno es un elemento que puede producirse a través de energías renovables, trayendo como consecuencia que en el proceso de producción y utilización, haya una emisión cero de gases de efecto invernadero. Adicionalmente, su facilidad para transportar, hace que pueda producirse en ciertos lugares estratégicos y lograr llevarlo a lugares lejanos, aumentando la seguridad energética del país. Otro beneficio del hidrógeno, es la posibilidad de diversificar la matriz energética del país, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles que hoy en día existe.

Por otro lado, aunque los beneficios del Hidrógeno dan una gran esperanza en lo que conviene al cambio climático y sostenibilidad del planeta, la transición a este vector energético tiene muchos impactos y retos que no hacen que sea una tarea fácil. En primer lugar, aunque el hidrógeno puede producirse a partir de fuentes de energía renovable, la tecnología necesaria para producir hidrógeno a gran escala aún es costosa. Además, su producción, almacenamiento y transporte requerirá una infraestructura específica que aún no existe en Colombia, lo que se traduce en que se necesitarán grandes inversiones para desarrollar dicha infraestructura.

Adicional a lo anterior, en Colombia existen muchos retos que se tienen que cumplir para lograr el objetivo de ser un país con bajo impacto de gases de efecto invernadero. Comenzando por la producción y el almacenamiento del Hidrógeno, como se mencionó anteriormente, este puede ser producido a partir de diversas fuentes, como la electrólisis del agua, el procesamiento de gas natural o la gasificación de biomasa. Sin embargo, la producción de hidrógeno a gran escala todavía no es rentable y requiere de grandes cantidades de energía, por lo que su uso actualmente es limitado. Además, su almacenamiento es otro reto importante, ya que este gas debe ser comprimido o enfriado para lograrlo, lo que requiere de infraestructura adicional. Sumado a esto, el transporte y distribución también complican el trato del hidrógeno. Gracias a que es un gas ligero y altamente inflamable, su transporte y distribución presenta riesgos significativos de seguridad. Además, su baja densidad energética significa que se necesita transportar grandes volúmenes de hidrógeno para satisfacer la misma demanda de energía que otros combustibles, lo que puede aumentar los costos de transporte y disminuir la eficiencia energética.

En general, el hidrógeno se perfila como una importante alternativa energética para Colombia en el marco de sus compromisos con el medio ambiente y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Aunque sus beneficios son muy buenos, también hay que tener en cuenta los retos y desafíos que su producción, almacenamiento, transporte y distribución conllevan. Para lograr una transición exitosa hacia el hidrógeno como vector energético, es necesario un compromiso conjunto entre el sector público y privado para invertir en tecnología e infraestructura, así como en la formación de capital humano especializado para desarrollar los proyectos y de esta manera se podrá aprovechar todo el potencial del hidrógeno para una economía más limpia y sostenible en Colombia.

### **3 Caso de cálculo del LCOH para el contexto energético en la Guajira**

Para realizar el cálculo del LCOH (*"Levelised Cost Of Hydrogen"*) se tomó como referencia el caso de estudio de pequeña escala descrito en "Diagnostico de requisitos técnicos para la implementación de un sistema de producción de hidrógeno verde a pequeña escala en La Guajira" [5].

### 3.1 Electrolizador

Hoy en día existen dos tecnologías de electrolizadores que son las más comunes en el mercado, los alcalinos y los PEM. Para este caso de estudio, se escoge un electrolizador tipo PEM. Esta decisión, se basa en que este tipo de electrolizadores pueden llegar a mayores valores de densidad de corriente y de eficiencia, lo que se traduce en una reducción del gasto de capital. Además, técnicamente los electrolizadores PEM tienen una mejor respuesta ante alteraciones en la fuente de alimentación. Por lo que se utiliza un electrolizador de  $1.05 \text{ Nm}^3/\text{h}$  de capacidad,  $6.1 \text{ kWh/Nm}^3$  de consumo energético, 99.99% de pureza del  $\text{H}_2$  y  $0.9 \text{ l/Nm}^3$  de consumo de agua. [5]

### 3.2 Desalinizador

Al trabajar con el agua proveniente del mar Caribe, se debe de tener en cuenta la pureza del agua que va a llegar al electrolizador. Al utilizar un electrolizador tipo PEM, se requiere una baja conductividad del agua (menor o igual a  $1 \mu \text{ S/cm}$ ), por lo que se espera que el agua sea lo más pura posible. Para esto, se espera que el agua además de pasar por el desalinizador, sea tratada por un proceso de Ósmosis inversa.[11]

### 3.3 Esquemático

A continuación, en la figura 4, se muestra un esquema que muestra el esquema del sistema de producción de hidrógeno verde.

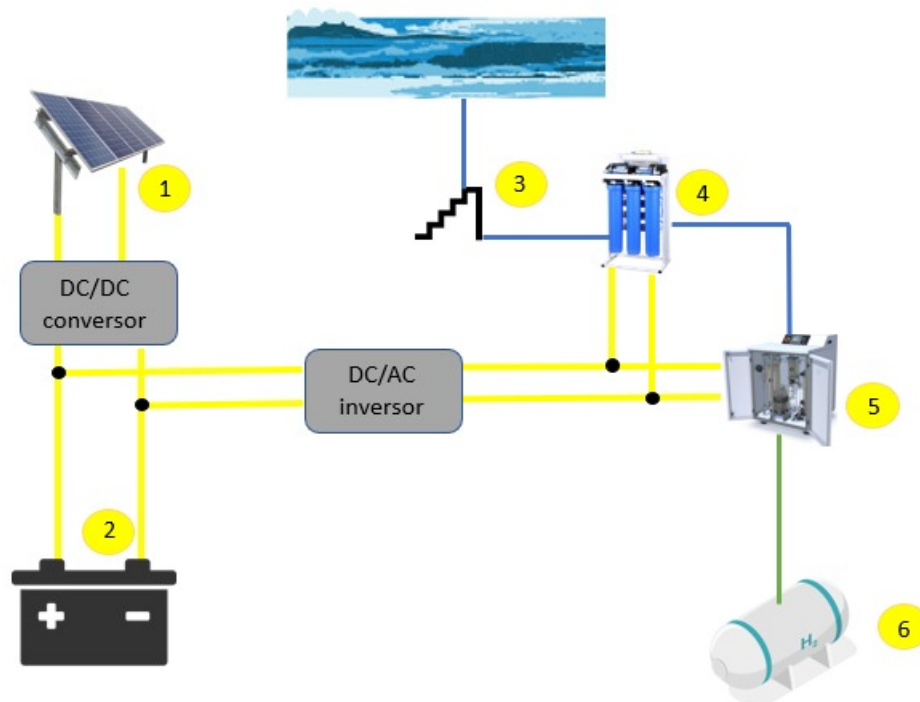


Figure 4: Esquemático del caso de estudio

- 1: *Recolector fotovoltaico*
- 2: *Baterías*
- 3: *Desalinizador*
- 4: *Ósmosis inversa*
- 5: *Electrolizador*
- 6: *Almacenamiento de  $\text{H}_2$*

### 3.4 Cálculo del LCOH

Como se menciona anteriormente el LCOH es el valor de producción de 1 Kg de hidrógeno. De esta manera y teniendo en cuenta cada uno de los puntos abordados se declara cada uno de los parámetros para realizar el cálculo. Además, se tiene en cuenta la fórmula 1.

Para tener un mayor alcance se tendrá en cuenta el artículo de “Diagnostico de requisitos técnicos para la implementación de un sistema de producción de hidrógeno verde a pequeña escala en La Guajira” [5], pues con ayuda de herramientas se tiene una mayor aproximación de los costos de producción de agua y energía.

En el caso de estudio se tuvo en cuenta diferentes tecnologías pero entre las comerciales se decide que la más óptima y la que mayor uso tiene en el mercado es el electrolizador PEM. Si bien es importante conocer la tecnología, se debe tener en cuenta lo que conlleva el uso de esta como la pureza del agua. El agua que se toma proveniente del mar, por lo que no es pura y necesita un desalador, el precio que se tiene en cuenta es de 42 centavos por litro, valor que proviene de un estudio sobre los costos de mantenimiento, producción, intereses y tratamiento [5].

Del mismo modo, se debe analizar la producción de energía eléctrica, por cómo se había mencionado antes entre mas precisa sea la información mejor será el resultado. Para calcular el costo de la generación de energía eléctrica se debe tener en cuenta la ubicación, las horas y la radiación. Por lo que se toma en cuenta el valor del estudio con el fin de obtener valores más precisos el costo de producción de energía . El precio se deriva después de hacer un análisis de la radiación de la estación de Riohacha, obteniendo un promedio de la irradiación y haciendo un análisis de la cantidad de horas predeterminadas por los picos alcanzados. El valor obtenido se da por medio de la herramienta NREL, que se utiliza en el estudio, ingresando todos los valores de entrada como las variaciones de radiación en el tiempo y los meses .En conclusión, el precio de producción de energía es de 19 pesos/ kWh [5].

Parámetro	Valor
FRC	0.1359
fp	90%
M(fp)	348 USD
$P_{H_2O}$	0.042 USD/1
$P_{H_2O}$	0.9 1/Nm <sup>3</sup>
$Q_e$	6.1 kWh/ Nm <sup>3</sup>
$P_e$	0.126 USD/kWh
$Q_{H_2}$ 1 año	7884 Nm <sup>3</sup>
interés	6%
Vida útil	10 años

Table 1: Parámetros para el calculo del LCOH [5]

Al utilizar la formula 1 se tiene un valor de producción de hidrógeno a 10.7 USD/kg , pero la mayoría de este valor se debe a los precios de los costos de producción de agua y energía. Por lo que con esto se concluye que para caso de estudio es necesario que los valores puedan ser los mas óptimos y viables con el fin de que el costo del hidrógeno pueda ser factible para una inversión.

## References

- [1] Abdin, Z., Zafaranloo, A., Rafiee, A., Mérida, W., Lipiński, W., & Khalilpour, K. R. (2020). Hydrogen

- as an energy vector. *Renewable and sustainable energy reviews*, 120, 109620.
- [2] Suárez, K. (2019) “Un poco de todo sobre el hidrógeno,” *Ciencia - Academia Mexicana de Ciencias*, pp. 72–80.
  - [3] Groll, M. (2023). Can climate change be avoided? Vision of a hydrogen-electricity energy economy. *Energy*, 264, 126029.
  - [4] Ministerio de Minas y Energía. (n.d). Hoja de Ruta de Hidrógeno de Colombia.
  - [5] Bolívar, A. (2021) Diagnóstico de requisitos técnicos para la implementación de un sistema de producción de hidrógeno verde a pequeña escala en la Guajira. Edited by G. Jiménez and C. Saldarriaga. thesis. Séneca Repositorio Institucional .
  - [6] LCOH, ¿Cómo se calcula el precio del Hidrógeno Verde? (2022) Vector Renewables. Vector Renewables. Available at: <https://www.vectorenrenewables.com/es/recursos/blog/lcoh-como-se-calcula-el-precio-del-hidrogeno-verde> .
  - [7] d’Amore-Domenech, R., Leo, T. J., & Pollet, B. G. (2021). Bulk power transmission at sea: Life cycle cost comparison of electricity and hydrogen as energy vectors. *Applied energy*, 288, 116625.
  - [8] Sierra, R. (2023). El papel del hidrógeno y el biogas en la transición energética. Universidad de Los Andes.
  - [9] Plan Energético Nacional 2020-2050
  - [10] NEL, ”PEM electrolyser S series”. Available at: <https://nelhydrogen.com/product/s-series/>
  - [11] Guadalupe, O. (2018). “DESALINIZACIÓN DE AGUA PARA APLICACIONES DE POTABILIZACIÓN MEDIANTE EL DESARROLLO DE TECNOLOGÍA SOLAR SUSTENTABLE”