

Producción de Hidrógeno a partir de Energía Eólica en un campus universitario ubicado en Lima-Perú

Johnny Nahui-Ortiz, Ph.D.¹, Alejandro Mendoza, MSc.¹, Caroline Camarena-Gamarra¹

¹National University of Engineering, Lima, Peru, jnahui@uni.edu.pe, amen807@hotmail.com, ccamarenag@uni.pe

Abstract– *El presente proyecto se desarrolló en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), en la cual existe interés en investigar acerca de la energía del hidrógeno como posible combustible del futuro, en el contexto del aprovechamiento de las energías renovables que es uno de los pilares de la Ingeniería Ambiental constituyendo un aspecto clave en el proceso formativo de los estudiantes.*

El objetivo general es evaluar experimentalmente la eficiencia energética de la producción de hidrógeno a partir de energía eólica. Se hicieron mediciones de velocidad de viento en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Ambiental (FIA-UNI). Los registros de las mediciones de velocidades de viento en el campus de la UNI, realizadas entre los meses de agosto y septiembre del 2019 oscilan, en promedio, entre 2,7 m/s y 3,5 m/s. Se implementó un sistema de producción de electricidad a partir del recurso eólico, constituido por un aerogenerador, dos baterías, un controlador y un inversor.

Este sistema se ha implementado como módulo demostrativo para ser usado como parte del proceso formativo de los estudiantes de la FIA-UNI. Se hicieron pruebas de producción de hidrógeno mediante electrólisis, utilizando un sistema integrado equipado con una celda de combustible tipo PEM. En promedio, se obtuvo un índice de 56,1 kWh/kg de producción de hidrógeno a partir de energía eólica utilizando una celda de combustible tipo PEM en el campus de la UNI. Se anticipa un próximo trabajo de investigación utilizando un sistema híbrido integrado solar-eólico operando en simultáneo.

Así mismo, la incorporación de un modelamiento energético-ambiental contribuirá a la evaluación del potencial de mitigación de emisiones de carbono asociado a la producción de hidrógeno a partir de energía eólica en condiciones locales.

Keywords—*Producción de Hidrógeno / Energía Renovable / Gestión Ambiental / Desarrollo Sostenible / Educación Superior.*

I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo fue realizado por el Grupo de Investigación denominado “Energía y Desarrollo Sostenible”, con la participación de estudiantes y profesores de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, ubicada en Lima-Perú, durante el año 2019.

A. Introducción

El grupo de Investigación “Energía y Desarrollo Sostenible” ha trabajado previamente en producción de hidrógeno con base en electricidad solar fotovoltaica, en el 2018.

La Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería se encuentra muy interesada en contribuir a la mitigación del cambio climático. Un área en particular de posible contribución está relacionada con la reducción de emisiones de carbono en redes eléctricas locales.

Al inicio del presente siglo, la combinación de generación eléctrica en Perú era alrededor de 90% centrales hidroeléctricas y 10% de centrales térmicas. Sin embargo, a partir del año 2005, el gas natural empezó a desempeñar un rol creciente en la generación eléctrica, en la actualidad la combinación de generación eléctrica es cerca de 58% hidroeléctricas, 48% centrales térmicas y 4% energías renovables (RER).

El término RER (Recursos Energéticos Renovables) es utilizado localmente a fin de incluir a los recursos energéticos solare, eólicos y biomásicos. Así mismo, incluye a las centrales hidroeléctricas, pero solo hasta una potencia instalada de 20 MW.

Con respecto a la introducción de la generación RER, la electricidad producida por biomasa se inició en el año 2010, por energía solar se inició en el año 2012, y por energía eólica se inició en el año 2014. En los últimos 10 años, proyectos con base en RER a gran escala se han implementado e interconectado a la red eléctrica nacional.

Sin embargo, una de las barreras claves para el incremento de producción eléctrica RER es la variabilidad del recurso disponible, particularmente energía solar y eólica. Por otro lado, la energía del hidrógeno es considerada como “el combustible del futuro” debido a su significativo potencial de contribución.

B. Antecedentes

En la Ref. [01], se indica que en los últimos años se ha prestado más atención a las fuentes de energía renovables y limpias como el viento. Debido a las incertidumbres relacionadas con las turbinas eólicas, los problemas de almacenamiento de energía son importantes.

Uno de los métodos más apropiados de almacenamiento de energía es la producción de hidrógeno. En este estudio, dos enfoques fueron usados; la potencia media real de la turbina eólica y el Weibull. Un sistema hidráulico eólico que consta de un controlador de potencia, un rectificador de alta eficiencia y un electrolizador alcalino. El sistema de conversión propuesto resultó en una relación lineal, relación entre la energía generada de la turbina eólica y la cantidad de hidrógeno producido.

En la Ref. [02], se indica que, en los últimos años, la importancia de la contaminación por gases de efecto invernadero se ha convertido en un problema mundial. Debido a las preocupaciones ambientales sobre los combustibles fósiles, la mayoría de los países están considerando las energías renovables como una alternativa para estos combustibles tradicionales, a fin de evitar daños ambientales. Sin embargo, la falta de acceso durante todo el año a los

recursos renovables es una problemática; sin embargo, el almacenamiento de la electricidad generada a partir de estos recursos en forma de gas o líquido es la solución más sensata. En este estudio, se propone un sistema de conversión de energía eólica a hidrógeno, en el que la producción de hidrógeno es proporcional a la potencia de salida de la turbina eólica. Los resultados muestran que todos los métodos utilizados tienen una precisión aceptable. Además, se evalúa la efectividad de los ruidos de velocidad del viento registrados en la potencia de la turbina eólica y la cantidad de hidrógeno. Como se esperaba, el aumento de la relación señal/ruido conduce a un error menor.

En la Ref. [03], se señala que el objetivo de este estudio es investigar los potenciales de generación de energía y producción de hidrógeno a través de recursos de energía solar y eólica en diferentes lugares de Arabia Saudita. Estos lugares representan la variedad de condiciones climáticas con diferentes radiaciones solares y potenciales de velocidad del viento. En cada ubicación, se consideran diferentes sistemas renovables de generación de energía fuera de la red para cubrir la demanda de carga de una casa típica que incorpora; matriz fotovoltaica (PV), turbinas eólicas, convertidor, baterías, electrolizador, pila de combustible (FC) y tanque de hidrógeno. Seis sistemas se consideran en simulaciones de base por hora; Banco de PV/batería, banco de viento/batería, banco de PV/viento/batería, PV/FC, viento/FC y PV/viento/FC. Las simulaciones y los estudios de optimización se llevan a cabo para identificar las configuraciones rentables. Los resultados muestran que la integración de un conjunto fotovoltaico de 2 kW, 3 turbinas eólicas, un convertidor de 2 kW y un banco de almacenamiento de 7 baterías es la mejor configuración que conduce al costo mínimo nivelado de energía. Reemplazando el banco de baterías por una combinación de electrolizador, pila de combustible y tanque de hidrógeno, es posible el sistema de almacenamiento; sin embargo, el costo aumenta debido al costo de inversión de los componentes del sistema.

En la Ref. [04], se señala que una de las formas más apropiadas para el almacenamiento de energía es producir hidrógeno a partir de recursos renovables. La energía eólica es reconocida como uno de los recursos de energía renovable ampliamente utilizados. Este documento investiga el uso de la energía eólica para producir hidrógeno en Irán. Todos los datos de viento se registraron en base a intervalos de tiempo de 10 minutos durante más de un año a diferentes alturas de mástil de viento. Para estimar los parámetros de Weibull, el método de desviación estándar (SDM), el método empírico de Lysen (EML) y el método de la densidad de potencia (PDM) se utilizan. Luego, se determinan los exponentes de la ley de potencia y la rugosidad de la superficie, el factor de capacidad, la producción anual de energía y la producción anual de hidrógeno para los sitios eólicos.

En la Ref. [05], se señala que el hidrógeno es un insumo clave para los procesos industriales. El impulsor clave de esta investigación es la necesidad de evaluar las opciones para la industria energética para reducir su huella de carbono

mediante el uso de hidrógeno producido a partir de fuentes renovables. En este trabajo se evalúan los impactos ambientales asociados con la producción de hidrógeno a través de la electrólisis del agua utilizando la electricidad generada por una planta de energía eólica. La evaluación del ciclo se realizó para determinar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por unidad de masa de hidrógeno producido considerando las emisiones a partir de la extracción de energía eólica hasta la producción de hidrógeno. Se realizó un análisis de incertidumbre para evaluar los efectos de las variaciones de diferentes parámetros de entrada en la huella de GEI del hidrógeno producido por el viento. Las emisiones totales de GEI de una planta de producción de hidrógeno a base de viento se estiman en 0.68 ± 0.05 kg CO₂ eq./kg H₂, el 65% de las cuales provienen de la construcción del sistema de energía eólica. Los resultados se comparan con los de los sistemas convencionales basados en combustibles fósiles. Las emisiones globales de GEI de la producción de hidrógeno a base de viento son aproximadamente un 94% más bajas que las asociadas con la producción de hidrógeno a través del reformado de metano con vapor (SMR). Las emisiones de producción de hidrógeno a base de gas natural se encuentran principalmente en la etapa de operación de la planta. Para los sistemas de viento a hidrógeno, la fabricación y la instalación de los sistemas tienen impactos ambientales significativos. Sin embargo, el hidrógeno producido a partir de la energía eólica puede reducir significativamente la huella de GEI de la industria energética.

En la Ref. [06], se señala que se integra un sistema de energía de turbina eólica con una celda de combustible de hidrógeno y un electrolizador de membrana de intercambio de protones para proporcionar electricidad y calor a una comunidad de hogares. Se tienen en cuenta diferentes casos para diferentes velocidades del viento. Las turbinas eólicas satisfacen la demanda de electricidad cuando hay suficiente velocidad de viento disponible. Durante las altas velocidades del viento, el exceso de electricidad generada se suministra al electrolizador para producir hidrógeno que se almacena en un tanque de almacenamiento. Más tarde se utiliza en la celda de combustible para proporcionar electricidad durante períodos de baja velocidad del viento para superar la escasez de suministro de electricidad. La celda de combustible funciona en condiciones de alta demanda y proporciona electricidad y calor para la aplicación residencial. La eficiencia general del sistema se calcula a diferentes velocidades del viento. Las eficiencias globales de energía y ejercicio a una velocidad del viento de 5 m / s se encuentran entonces en 20.2% y 21.2% respectivamente.

II. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para desarrollar el presente trabajo se enfoca en la producción de hidrógeno a partir de energía eólica, mediante electrólisis utilizando una celda de combustible tipo PEM.

A. Enfoque

La metodología a seguir consideró la evaluación preliminar del recurso eólico disponible en la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería (FIA-UNI). En ese sentido, se realizaron las mediciones correspondientes utilizando anemómetro durante un período considerado como representativo en el contexto del presente proyecto. La velocidad de viento expresada en m/s, varía de acuerdo con la rugosidad del emplazamiento seleccionado y con la altura de medición, entre otros.

Seguidamente se procedió a la implementación de un sistema eólico, que consiste de un aerogenerador, una batería de acumulación, un controlador de carga y la instrumentación correspondiente para evaluar la energía eléctrica producida por el sistema eólico en función a la velocidad de viento disponible.

En esta etapa se procedió a caracterizar la energía eléctrica producida por el sistema eólico bajo las condiciones de velocidad de viento disponible en la FIA-UNI, identificando las variables principales que inciden en este proceso y la evaluación cuantitativa de los parámetros involucrados.

Seguidamente, se procedió a evaluar la cantidad de hidrógeno producida en función a la energía eléctrica utilizada y a la velocidad de viento disponible a fin de establecer la eficiencia energética del proceso en forma integral. De esta forma, el proceso experimental concluye, en la siguiente etapa, con la caracterización de las variables claves relacionadas con la producción de hidrógeno a partir de energía eólica, estableciendo los criterios correspondientes a la evaluación técnica de la eficiencia energética, así como información preliminar para su evaluación económica.

Finalmente, se procedió a poner a punto un sistema demostrativo a fin de que pueda ser utilizado para fines educativos por los docentes y estudiantes de la FIA-UNI.

B. Electricidad producida mediante energía eólica

En este caso, la electricidad producida mediante energía eólica, se concentra en la utilización de un sistema de conversión de energía con turbina eólica.

Según el Mapa Eólico del Perú, el potencial para aplicaciones de la energía eólica puede ser elevado en ciertas regiones, alcanzando niveles de velocidad de viento de hasta 7 m/s medidos a 10 m de altura. Sin embargo, en otros lugares del país niveles más bajos, como de 3 m/s pueden registrarse a 3 m de altura.

La potencia eólica, WP, puede ser calculada mediante:

$$WP = C_p \times \rho \times g \times A \times V^3 \quad (1)$$

donde:

C_p = factor de potencia, sin unidades

ρ = densidad del aire, kg/m³

g = aceleración de la gravedad, m/s²

A = área del rotor, m²

V = velocidad promedio, m/s

Por lo tanto, la producción diaria de electricidad eólica, WDEP, puede ser calculada mediante:

$$WDEP = WP \times 24h \quad (2)$$

Además, el factor de capacidad eólica, WCF, puede ser calculado mediante:

$$WCF = WDEP / (kW \times 24h) \quad (3)$$

donde:

kW = capacidad instalada del aerogenerador, kW

A efectos de ilustración, la producción promedio diaria de electricidad eólica para una planta de 32 MW, durante el año pasado, e instalada en una región costera del sur del país, se muestra en la Tabla I.

TABLA I
PRODUCCIÓN DIARIA PROMEDIO DE ELECTRICIDAD EÓLICA

Month	MWh/month	Days/Month	MWh/day	WCF
JAN	8824	31	284.6	0.37
FEB	13214	29	455.7	0.59
MAR	14025	31	452.4	0.59
APR	14076	30	469.2	0.61
MAY	12727	31	410.5	0.53
JUN	13641	30	454.7	0.59
JUL	16769	31	540.9	0.70
AUG	16138	31	520.6	0.68
SEP	16007	30	533.6	0.69
OCT	15991	31	515.8	0.67
NOV	13164	30	438.8	0.57
DIC	12281	31	396.2	0.52

Fuente: Informe COES [Ref. 7].

C. Producción de Hidrógeno

Hidrógeno puede ser producido por medio de una variedad de formas, incluyendo el uso de combustibles fósiles y de energías renovables. Dos trayectorias principales de conversión de energía existen que conducen a la producción de hidrógeno verde (energía renovable, residuos y calor de procesos) o no-verde (energía de combustibles fósiles).

Los procesos de producción de hidrógeno incluyen las siguientes alternativas: Conversión química, Termólisis, Electrólisis, Fermentación, Proceso fotolítico y Proceso fotobiológico.

D. Hidrógeno producido mediante electrólisis

La electrólisis consiste en la ruptura de la molécula de agua por medio de una corriente eléctrica. Cuando ello ocurre

bajo condiciones ambientales normales (25°C y 0.1 MPa), el proceso es como sigue:



En el caso de electrólisis a baja temperatura, el consumo de electricidad es muy elevado. Por lo tanto, se recomienda obtener hidrógeno in situ en pequeñas cantidades y en la ausencia de otro tipo de compuestos.

Otra alternativa podría ser la integración con energía renovable en la búsqueda de una forma de almacenar el exceso de electricidad variable. La temperatura de operación puede ser en realidad cercana a 80°C en electrolizadores con membrana alcalina o de intercambio de protones.

En el caso peruano, atención especial podría dedicarse a la electricidad solar y eólica debido a su elevado potencial en ciertas regiones.

En el caso de electrólisis a alta temperatura, el consumo de electricidad se torna más aceptable. Es necesario tener vapor de agua y una fuente térmica a alta temperatura. Los electrolizadores tienen que ser de tipo óxido sólido.

En el presente trabajo de investigación, la producción de hidrógeno se basa en la utilización de electricidad de energía renovable a través de un proceso de electrólisis.

En este caso, una celda de combustible del tipo membrado de intercambio de protones (PEM) es considerada para el proceso de electrólisis.

La producción diaria de hidrógeno, DHP, puede ser calculada mediante:

$$\text{DHP} = \eta \times \text{WDEP} \quad (5)$$

donde:

η = eficiencia de la celda de combustible, sin unidades

E. Módulo demostrativo para propósitos educativos

Se propone un módulo educativo que pueda ser utilizado para propósitos demostrativos. En este caso, la producción de hidrógeno se basa en energías renovables, por lo tanto, podría ser considerado como hidrógeno “verde”.

Además, la sustitución parcial de combustibles fósiles por hidrógeno conllevaría a una reducción potencial de emisiones de carbono en redes eléctricas locales. Aunque la disponibilidad del recurso solar y eólico no sea uniforme a través del país, el módulo educativo apunta a proporcionar a los estudiantes y profesores una primera aproximación a los beneficios ambientales potenciales del hidrógeno “verde”.

III. RESULTADOS

Los registros de las mediciones de velocidades de viento en el campus de la UNI, realizadas entre los meses de agosto y septiembre del 2019 oscilan, en promedio, entre 2,7 m/s y 3,5 m/s, a una altura de 10 m, según se muestra en la Tabla II.

TABLA II
VELOCIDAD DE VIENTO EN M/S (FIA-UNI)

Hora	V (m/s)	Hora	V (m/s)
0-1	3.5	12-13	2.8
1-2	3.2	13-14	2.7
2-3	3.4	14-15	3.0
3-4	3.1	15-16	2.9
4-5	3.3	16-17	3.1
5-6	3.2	17-18	3.3
6-7	3.1	18-19	3.4
7-8	3.3	19-20	3.5
8-9	3.2	20-21	3.3
9-10	2.9	21-22	3.1
10-11	2.8	22-23	3.2
11-12	3.1	23-24	3.4

Sobre la base de los registros de velocidades de viento obtenidos, se han determinado los parámetros de forma y escala correspondientes a la función de Weibull, estableciendo $k = 2,1$ y $c = 3,3$ m/s respectivamente.

Se implementó un sistema de producción de electricidad a partir del recurso eólico. El sistema está compuesto por un aerogenerador, una batería, un inversor, y un controlador. El sistema se utilizará en adelante como módulo demostrativo como parte del proceso formativo de los alumnos de la FIA-UNI, según se muestra en la Fig. 1.

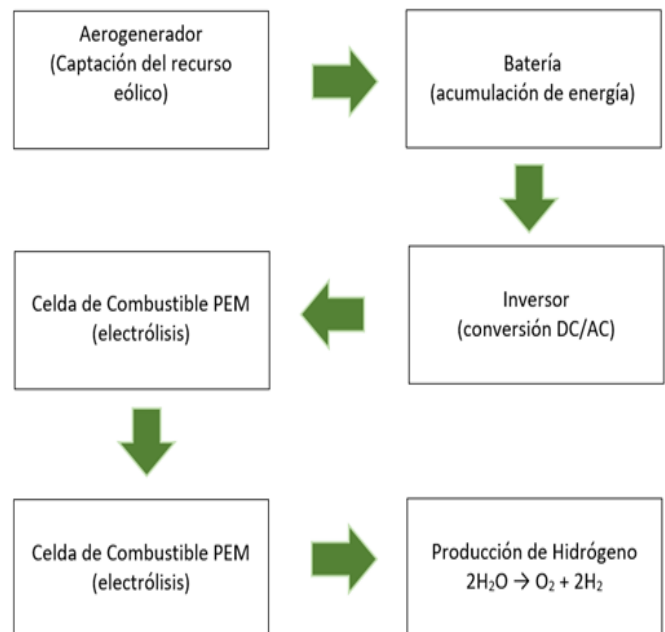


Fig.1 Esquema de sistema eólico con celda de combustible implementado en la FIA-UNI.

Se hicieron pruebas de producción de hidrógeno, utilizando un sistema integrado provisto de una celda de combustible tipo PEM.

La producción de energía eléctrica, considerando el potencial eólico del régimen de viento en el campus de la UNI, se establece utilizando la curva del fabricante, en la cual se correlaciona la potencia eléctrica que entrega el aerogenerador para una velocidad de viento específica.

Se demostró que es posible obtener energía eléctrica a partir de las velocidades de viento registradas en las instalaciones de la FIA-UNI.

Se comprobó que, utilizando energía eléctrica, es posible producir hidrógeno mediante electrólisis, utilizando una celda de combustible.

Así mismo, como resultado de este trabajo, se implementó un módulo demostrativo compuesto por un sistema de energía eólica y una celda de combustible tipo PEM, en la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, en Lima-Perú para propósitos educativos.

El módulo educativo mencionado está destinado a ser utilizado por estudiantes y profesores con fines de aprendizaje acerca del uso de energías renovables para la producción de hidrógeno y su contribución potencial a la reducción de emisiones de carbono en función a la disponibilidad del recurso local.

IV. CONCLUSIONES

Con relación al presente trabajo, las siguientes conclusiones preliminares se pueden enumerar:

1. El régimen de viento establecido a partir de las mediciones realizadas indica que el potencial eólico no es elevado. Las velocidades registradas oscilan entre 2,7 y 3,5 m/s, mientras que en el mapa eólico existen valores de mayor magnitud en otras regiones del país.
2. Los factores de la función de Weibull obtenidos en base a los registros de velocidades de viento son $k = 2,1$ y $c = 3,3$ m/s.
3. El aerogenerador instalado, opera aún con velocidades bajas como las registradas, y además se autoregula ante cambios de dirección del viento.
4. La energía eólica permite producir hidrógeno, utilizando una celda de combustible PEM en un proceso de electrólisis, en una relación de 56,1 kWh por kilogramo de hidrógeno.
5. Se instaló un sistema eólico demostrativo en la FIA para producción de hidrógeno, el cual podrá ser utilizado con fines educativos, tanto en los cursos regulares de pregrado como de posgrado.
6. Se recomienda realizar mediciones prolongadas a fin de validar los factores de la función de Weibull, así como establecer la incidencia de la rugosidad en el área de operación del aerogenerador en las inmediaciones de la FIA-UNI.

7. Se recomienda evaluar la posible integración del sistema eólico con un sistema solar para producción simultánea de hidrógeno.
8. Un modelamiento energético-ambiental de la celda de combustible tipo PEM podría contribuir a evaluar el potencial de mitigación de emisiones de carbono asociado.
9. La simulación de un sistema de producción de hidrógeno con base en energía eólica utilizando el software HOMER podría contribuir a examinar la incidencia de otras variables complementarias.

ACKNOWLEDGMENT

Los autores desean reconocer la contribución de los estudiantes de pregrado, de la Facultad de Ingeniería Ambiental en la Universidad Nacional de Ingeniería.

Además, un especial reconocimiento al Prof. John W. Sheffield de la Asociación Internacional de Energía del Hidrógeno (IAHE), por su continuo respaldo y orientación.

Finalmente, deseamos agradecer a todas las personas que de una u otra manera han contribuido a este trabajo.

REFERENCES

- [1] Omid Alavi, Ali Mostafaeipour, Mojtaba Qolipour (2016). Analysis of hydrogen production from wind energy in the southeast of Iran. Department of Electrical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
- [2] Omid Alavi, Parviz Najafi, Abbas Hooshmand Viki (2016). Influence of noise of wind speed data on a wind-hydrogen system. Department of Electrical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
- [3] Abdullah Al-Sharafiah, Ahmet Z. Sahina, Tahir Ayarc, Bekir S. Yilbasa (2017). Techno-economic analysis and optimization of solar and wind energy systems for power generation and hydrogen production in Saudi Arabia. Mechanical Engineering Department, KFUPM, Dhahran 31261, Saudi Arabia.
- [4] Zabihollah Najafian Ashrafi, Masoud Ghasemian, Misagh Irandoost Shahrestani, Erfan Khodabandeh, Ahmad Sedaghat (2017). Evaluation of hydrogen production from harvesting wind energy at high altitudes in Iran by three extrapolating Weibull methods. School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, 11365-4563, Iran.
- [5] Samane Ghandehariun, Amit Kumar (2016). Life cycle assessment of wind-based hydrogen production in Western Canada. Department of Mechanical Engineering, University of Alberta, Edmonton, AB T6G 2G8, Canada.
- [6] Haris Ishaq, Ibrahim Dincer, Greg F. Naterer (2018). Performance investigation of an integrated wind energy system for co-generation of power and hydrogen. Faculty of Engineering and Applied Science, University of Ontario Institute of Technology, 2000 Simcoe Street North, Oshawa, Ontario, L1H 7K4, Canada.
- [7] COES (2021). Electricity Generation Report 2020. Lima-Perú.