

ANÁLISIS MULTICRITERIO DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE PARA EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA: UNA ESCUELA RURAL COLOMBIANA COMO CASO DE ESTUDIO

Mateo Bolaños Barreto ^a, Carlos Andres Alvarez Vasco ^b, Erika Yuliana Ortiz Montoya ^b, Andres Ceballos Bermudez ^d.

^a Estudiante de ingeniería Bioquímica, Departamento de Ingeniería Bioquímica, Facultad de Ingeniería, Universidad Icesi, Cali, Colombia

^b Profesor tiempo completo de Ingeniería Bioquímica, Departamento de Ingeniería Bioquímica, Facultad de Ingeniería, Universidad Icesi, Cali, Colombia – Ph D

^c Profesor tiempo completo de Ingeniería Bioquímica, Departamento de Ingeniería Bioquímica, Facultad de Ingeniería, Universidad Icesi, Cali, Colombia – Ms C

ABSTRACT

En los últimos años, se han visto los sistemas de energía fotovoltaicos como los más innovadores para suplir la demanda energética en zonas OFF GRID, sus aplicaciones en zonas no interconectadas (ZNI) para suplir las necesidades energéticas han sido extraordinarias, sin embargo, su almacenamiento ha sido un punto limitante que actualmente se ha visto como una oportunidad de mejora; por este motivo actualmente, se plantea el uso de hidrógeno verde como método de almacenamiento energético para estas centrales aisladas, debido a las grandes ventajas como su alta eficiencia y su facilidad de acoplarse a sistemas fotovoltaicos. Por consiguiente, este proyecto busca comparar sistemas de producción de hidrógeno verde (electrolisis alcalina y electrolisis PEM) contrastado con las baterías solares para su aplicación en un caso de estudio particular de una escuela rural ubicada en una ZNI del pacífico colombiano. Para esta investigación se usó la metodología de análisis multicriterio del tipo jerárquico (AHP) usando criterios como el coste de inversión, la eficiencia de almacenamiento de cada tecnología, entre otros; donde adicionalmente, se realizó un análisis de sensibilidad con ayuda de las herramientas del software Hiview 3.0 con el fin de examinar diferentes niveles de significancia para la toma de decisiones. Como resultado el sistema de almacenamiento en baterías solares sería la opción viable para la aplicación en el caso de estudio, sin embargo, los sistemas de hidrógeno verde, no se encuentran alejados como remplazo de opción de almacenamiento energético.

Keywords: Electrolisis Alcalina, Electrolisis PEM, Baterías Solares, MCDA, ZNI

1 - Introducción

Colombia actualmente tiene una infraestructura energética muy bien desarrollada, siendo la sexta matriz energética más limpia del mundo, con una contribución de la generación hidroeléctrica del 68,3% [1], sin embargo, esta red no se encuentra construida por todo el país y no cubre las necesidades de todos sus habitantes. Como resultado, el 52% del territorio nacional se denomina zonas no interconectadas o ZNI [2] y tienen características en común, por ejemplo: son

lugares apartados (no se encuentran cerca de las ciudades capitales o zonas urbanas grandes), con dificultades de acceso vial, terreno irregular, siendo su población demográfica en su mayoría campesinos de profesión y ubicándose en regiones como el pacífico colombiano, la zona amazónica y el caribe colombiano [3]. La combinación de estas características limita el acceso a importantes servicios de primera necesidad, por ejemplo, la energía eléctrica; que es importante para el desarrollo de una vida con calidad media donde se tenga acceso a la

iluminación, a las telecomunicaciones y a la conservación de alimentos.

Algunas ZNI cuentan con suministro de energía eléctrica, que, a diferencia de las grandes ciudades, donde se provee un suministro constante; en estas regiones apartadas se obtiene por pequeñas estaciones de energía donde solo el 5% son tecnologías renovables [6]. La gran mayoría de estas estaciones son centrales fotovoltaicas tipo granjas solares acopladas a almacenamiento de baterías solares. No obstante, estas centrales no son una solución definitiva para suministrar toda la electricidad que requieren las ZNI, ya que, las baterías solares no son lo suficiente eficientes en el almacenamiento de energía [7] y se necesitan muchas unidades para albergar grandes cantidades de electricidad, además, esta limitación representa un mayor costo de inversión.

Como alternativa, en los últimos años se ha visto el hidrogeno verde y su producción como opción de almacenamiento de energía eléctrica, que a su vez suena prometedor para reemplazar las baterías solares. Esto debido a la alta eficiencia energética del hidrogeno, su cero contaminación por emisiones al momento de su combustión y su facilidad de acople con las granjas solares. Países como Canadá y Estados Unidos apuestan por el hidrogeno verde como futuro reemplazo de los combustibles fósiles por sus ya antes mencionadas características; aumentando así el interés investigativo en el hidrogeno verde como alternativa energética. Además, con los múltiples proyectos extranjeros europeos introduciendo el hidrogeno verde al "The green deal" [9], aumenta mucho más el interés por la aplicación de producción de hidrogeno verde combinado con energías alternativas, como la fotovoltaica.

El hidrogeno verde se caracteriza por producirse usando las tecnologías de electrolisis de agua, las cuales se dividen en tres tipos: electrolisis alcalina, electrolisis por membrana de intercambio protónico (PEM) o electrolisis a alta temperatura (SOEC). Al contrario de la electrolisis SOEC; el método alcalino y el PEM son tecnologías de electrolisis con alto potencial de acoplamiento a paneles solares por su simpleza y facilidad de operación; actualmente estas dos tecnologías son objeto de múltiples estudios enfocados en la aplicación de proyectos energéticos como alternativa de almacenamiento. [11].

Sin embargo, la elección de un sistema de electrolisis que reemplace a las baterías solares debe seguir una metodología detallada e imparcial, que sirva para tomar una correcta decisión con base a criterios que describan de manera correcta las características importantes del caso en particular donde se usará y así evitar gastos de dinero innecesarios o problemas logísticos futuros. Es por esto por lo que, el análisis multicriterio o MCDA (por sus siglas en ingles Multi-Criteria Decision Analysis) ofrece una metodología fiable para clasificar las alternativas en presencia de diferentes objetivos y limitaciones [4] que sirve para escoger de manera fiable la opción que más se acople a las necesidades de lo que se requiere tomando en cuenta aspectos básicos como el coste de inversión hasta aspectos específicos como los materiales que componen cada opción (si es el caso).

Este documento presenta la aplicación del análisis multicriterio del tipo proceso jerárquico analítico (AHP), con el objetivo de obtener resultados relevantes sobre la tecnología de electrolisis que pueda ser la opción de acople adecuada con los sistemas fotovoltaicos presentes en las ZNI del pacifico colombiano y determinar si puede

reemplazar el almacenamiento energético de las baterías solares por hidrogeno verde.

2 - Metodología

En esta investigación se usó el software de análisis multicriterio llamado Hiview 3.0 donde se ingresó la información de cada criterio seleccionado, basado en las tecnologías escogidas para análisis (sistemas de hidrogeno verde y las baterías solares) y se llevó a cabo un análisis de sensibilidad con diferentes matrices de pesos definidas para observar el impacto de cada criterio sobre la decisión final. Posteriormente, los resultados obtenidos fueron llevados a análisis y se determinó cual sistema de almacenamiento energético sería adecuado como acople con los paneles solares para ser aplicado en el caso de estudio de una escuela rural.

2.1 - Definición de tecnologías de electrolisis

Para la escogencia de las tecnologías de electrolisis, que participaron en el análisis, se realizó una búsqueda de literatura tomando en cuenta la existencia de antecedentes donde se acoplaban con paneles solares; y se encontró que los 3 tipos de electrolisis habían sido usados anteriormente combinados con esta fuente de energía renovable [21], sin embargo, no era muy común aplicar la tecnología SOEC en zonas remotas debido a la alta demanda energética del proceso, esto porque la tecnología SOEC tiene un paso previo de precalentamiento del agua, la cual supone un gasto alto de energía [22]. Esto hizo que este tipo de electrolisis fuera descartado para análisis, quedando solo las tecnologías de electrolisis alcalina y PEM contrastadas contra las baterías solares.

Se plantearon sistemas de producción de hidrogeno verde, donde se componían del electrolizador (Alcalino y PEM), un sistema de almacenamiento en tanque metálico y una celda de combustible PEM que convirtiera el hidrogeno verde en electricidad nuevamente. Esto para facilitar la comparación entre los sistemas de electrolisis y las baterías.

2.2 – Definición de Criterios

La definición de los criterios se dividió en 3 nodos fundamentales: técnico, económico y medioambiental. Para su selección, se realizó una investigación de literatura [23-26], donde se escribió y sintetizó una lista de criterios basados en previas investigaciones de análisis multicriterio. Se tomó en cuenta que todos los criterios abarcaran características fundamentales del caso de estudio; tomando en cuenta su particularidad de zona no interconectada y las limitaciones que esta trae consigo.

2.2.1 – Criterios técnicos:

2.2.1.1- Eficiencia: La eficiencia se definió como la cantidad de energía útil que podemos obtener de una fuente de energía. El coeficiente de eficiencia es la relación entre la energía de salida y la de entrada, que se utiliza para evaluar los sistemas energéticos. [26-30]

2.2.1.2- Seguridad / fiabilidad: La seguridad se definió como el parámetro que mide los niveles de disminución de riesgos en todo el sistema energético. Por otra parte, la fiabilidad energética se tomó como la capacidad de un sistema para funcionar según su diseño sin ningún tipo de problema o modificación, además de, la resistencia a los fallos del mismo sistema [31-32]. Debido a esto, es por lo que para este criterio se midió en los diferentes grados de protección IP (Ingress Protection por sus siglas en ingles) de cada sistema evaluado.

2.2.1.3- Madurez: La medición del grado de madurez de las tecnologías, se basó en el nivel de desarrollo de cada uno de los sistemas y su nivel comercial en los mercados a nivel nacional e internacional. Se clasificaron en las siguientes etapas (1) tecnologías que se encuentran en fase de desarrollo a escala de laboratorio; (2) tecnologías que realizan pruebas a una escala de plantas piloto, donde el objetivo demostrativo está ligado al experimental, referido a las condiciones operativas y técnicas; (3) tecnologías que aún pueden ser mejoradas; y (4) tecnologías consolidadas y de manufactura, que se encuentran establecidas en el mercado, además, se incluyeron escalas intermedias, para mostrar mucho más la precisión de los sistemas y su madurez actual. [35-36]

2.2.1.5- Profundidad de descarga: Se definió la profundidad de descarga como el porcentaje de la energía que da un acumulador previamente cargado en su totalidad. Es decir, toda la energía real que puede otorgar el sistema de almacenamiento completamente cargado y es sometido a una descarga "total" o profunda. [54,55]

2.2.2 – Criterios Económicos:

2.2.2.1- Inversión: El coste de inversión comprende todos los costes relativos a: la compra de equipos mecánicos, instalaciones tecnológicas, construcción de carreteras y conexiones a la red nacional, servicios de ingeniería, perforación y otros trabajos de construcción incidentales. Los costes de mano de obra o de mantenimiento de los equipos no se incluyen en los costes de inversión. [27,23,36,40,41]

2.2.2.2- Coste de operación y mantenimiento (OP/MNT): Los costes de operación y mantenimiento se definieron

como los costes por año que se debe gastar en los sistemas para su mantenimiento y revisión. Se estimó el costo de horas de cada especialista realiza el mantenimiento de cada sistema en particular. Los fondos gastados para el mantenimiento son menores que los daños financieros obtenidos por un fallo del sistema energético y aumentan el índice de credibilidad y confianza del sistema energético. [37,39,42,43]

2.2.2.3- Vida Útil: La vida útil de un sistema energético es su vida útil prevista, o el periodo aceptable de uso en servicio. [29,39,40,43]

2.2.3 – Criterios Medioambientales:

2.2.3.1- Huella de Carbono: Se definió como la cantidad en gramos de gases de efecto invernadero que se usaron para crear los sistemas de almacenamiento por cada KWh de energía que puedan almacenar dentro del mismo sistema. Se usaron gramos de CO₂ equivalente sin tener en cuenta aspectos tan profundos de la fabricación como el de extraer cada compuesto de la tierra. [38-42]

2.2.3.2- Suelo / Área: Se definió como el área o la superficie que ocuparía el sistema en el área de destino. Este se calculó basándonos en las medidas de cada componente de cada sistema y sumando sus áreas. [41,42,44,45]

2.3 – Análisis de sensibilidad

2.3.1- Recolección de información

Por cada uno de los criterios seleccionados, se realizó una investigación de los datos específicos para cada una de las tecnologías preseleccionadas. Esta investigación consto de recolectar toda la información en cifras,

datos de productos, porcentajes y todo lo relacionado con cada uno de los criterios limitándose a las tecnologías de baterías solares, electrolisis alcalina y PEM. Se indago en bases de datos de artículos científicos donde hacían descripciones generales de estas tecnologías, sin embargo, también se buscó en páginas específicas de marcas y fabricantes para obtener una información un poco más detallada. Esta metodología, es propia de esta investigación y no ha sido descrita en artículos de análisis multicriterio previamente investigados.

2.3.2- Definición de sistema de pesos

Para esta investigación se definió un solo sistema de pesos inicial siguiendo la regla de pesos del software Hiview 3.0 en donde la sumatoria en porcentaje de cada uno de los nodos debe ser igual al 100%, y la sumatoria de cada criterio debe dar como resultado el porcentaje del peso otorgado al nodo en particular donde se encuentra descrito. Este sistema de pesos fue desarrollo basado en el criterio ingenieril de equidad de importancia, donde se muestra la interacción de cada criterio entre sí y como afecta la decisión final, se optó por otorgar el mismo nivel de significancia a los 3 nodos (Técnico, Económico y Medio Ambiental), siendo una distribución del 33,3% de importancia a cada nodo.

Posteriormente se usaron la herramienta del programa Hiview 3.0 de análisis de sensibilidad para observar cómo afectaría el cambio en la ponderación de pesos si se variaran en otros posibles escenarios. Esta herramienta nos proporcionó ciertas graficas donde nos muestran una aproximación hecha por el mismo software de como sería si se alteraran los pesos en mayor o en menor medida.

3 - Caso de estudio

3.1 - Caso hipotético de estudio

Se consideró conveniente para el propósito de esta investigación, diseñar y definir como caso de estudio un prototipo de escuela rural ubicada en la región pacífica de Colombia. Con el objetivo de conocer el compartimento y la demanda de energía real de esta, ya que está ubicada en una

zona no interconectada. Se definió que su ubicación sería en la vereda El Zanjón, en el departamento de Nariño; debido al acceso de información proporcionada por los docentes del territorio. Este prototipo de escuela cuenta con vías de acceso por carretera destapada, servicio de agua mediante un acueducto primario y es empleada como comedor comunitario y salón social.

Se realizó una revisión de literatura sobre múltiples modelos de escuelas ubicadas en las ZNI. Basados en la información que muestra [16] e información proporcionada por una docente de la escuela, se diseñó un modelo base. Para esto, se definió que la escuela tenga los equipos electrónicos necesarios para la educación básica, detallando la cantidad y potencia de consumo de estos (**tabla 1**). Con esta información se calculó el gasto energético por día, teniendo en cuenta los siguientes supuestos, según [17]:

- Se estima que la escuela puede beneficiar a 25 estudiantes del territorio en promedio
- La distribución espacial de la escuela es de 1 salón, 1 sala de video y 1 baño
- El uso de 1 computador puede distribuirse para la formación de 5 estudiantes

- El agua de la escuela es potabilizada por un equipo de osmosis inversa.

Tabla 1. Equipos que componen la escuela rural y su respectivo gasto energético

Equipo	Cantidad	Potencia de consumo (KW)
Luminarias	7	0,025
Computadores	5	0,100
Radio	1	0,080
Televisor	1	0,115
Impresora	1	0,150
DVD	1	0,050
Nevera	1	0,500
Licuadaora	1	0,015
Equipo de Osmosis	1	0,35

Para el cálculo de la demanda de energía de la escuela, se tomó la potencia de consumo de cada equipo y multiplicó por el número de horas, en las cuales estos estarían en funcionamiento un día hábil de estudio con doble jornada (diurna y nocturna); teniendo en cuenta un horario de 24 horas y las actividades que son llevadas a cabo de manera regular, tales como ver una película o documental, usar los computadores para hacer uso de algún software, imprimir documentos, etc. La demanda obtenida fue de 20,17 KWh para un día hábil de estudio. Adicionalmente, se calculó la demanda energética de un día de fin de semana donde no hay funcionamiento de la escuela, sin embargo, hay consumo de energía por parte de la nevera, algunas luminarias y el equipo de osmosis inversa, que es necesario para la producción de hidrógeno, dicha demanda fue de 17,425 KWh por día festivo.

Posteriormente, se realizó el diseño del arreglo de paneles solares empleando la calculadora PVWatts de National Renewable Energy Laboratory (NREL), donde se puede estimar la producción de energía y el costo de la energía de sistemas fotovoltaicos (FV) conectados a la red eléctrica en todo el mundo. Para esto, se suministraron las siguientes especificaciones e información:

Tabla 2. Datos suministrados a la Calculadora PVWatts de NREL

Ubicación e identificación de la estación	
Ubicación solicitada	Nariño
Fuente de datos meteorológicos	Lat., long.:1,49,-78,02 1,5 mi
Latitud	1,49°N
Longitud	78,02°W
Especificaciones del sistema FV	
Tamaño del sistema (área)	8 m ²
Tipo de módulo	Estándar
Tipo de campo	Fijo (montaje en techo)

La calculadora proporcionó datos de producción de energía fotovoltaica por hora en el área donde estaría el prototipo de escuela. Estos datos se compararon con la demanda de energía de la escuela para definir el número de arreglo de paneles necesario para suplir el consumo antes calculado, tanto para los días hábiles como para los festivos. Los valores de consumo y de producción se desglosan hora a hora en la **gráfica 1**, donde se observa las líneas de consumo en los días hábiles y los fines de semana, además, se contrasta la información con los arreglos de paneles necesarios para suplir esa demanda energética.

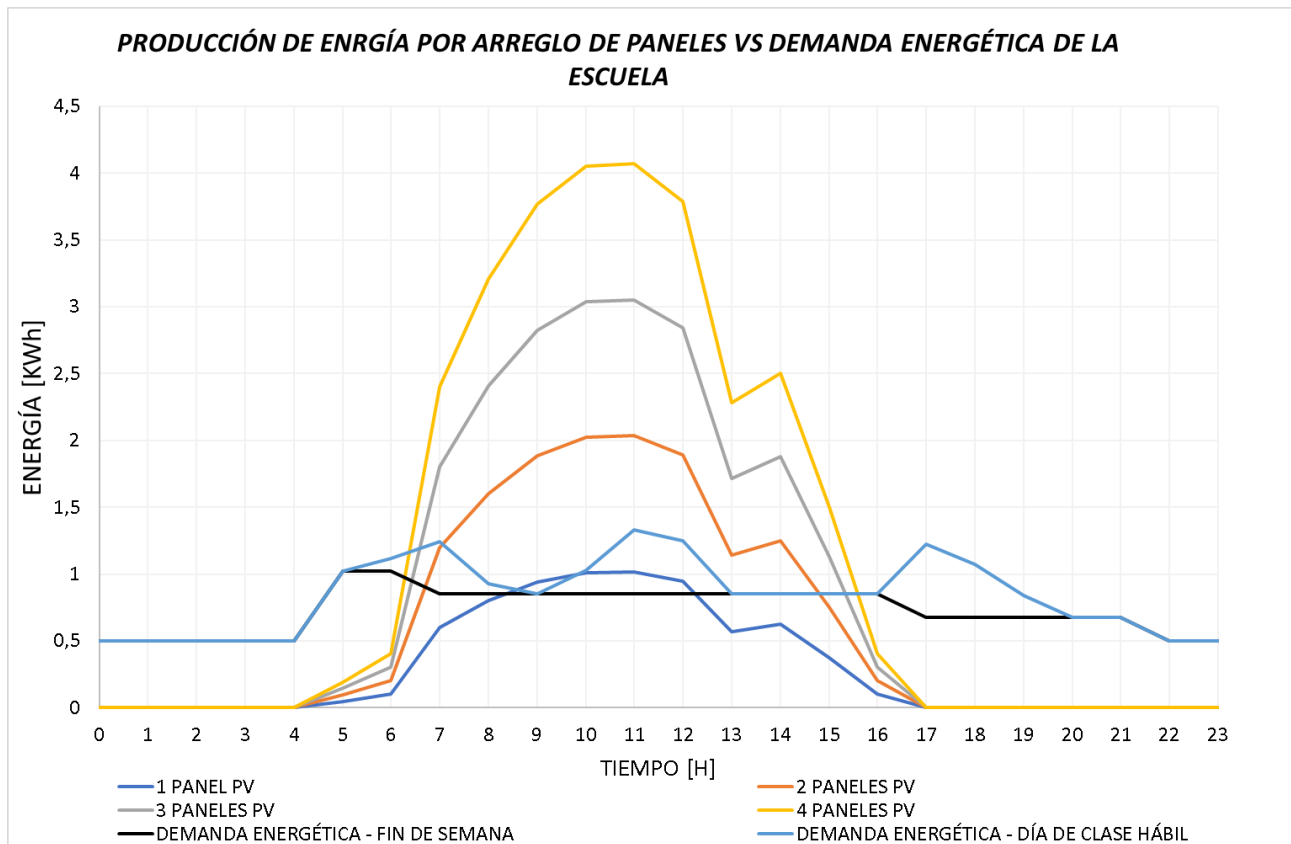


Gráfico 1. Contrastes de producción de energía por arreglo de paneles vs demanda energética de la escuela tanto días hábiles como fines de semana

En el **grafico 1**, se detalla la producción de energía fotovoltaica con distintos arreglos de paneles, partiendo de tener 1 solo panel hasta un arreglo de 4 paneles. Esta información nos sirvió como punto de partida para dimensionar la cantidad de energía que se almacenaría en los sistemas de baterías y que entraría en los sistemas de producción de hidrogeno verde.

4 – Resultados

Como podemos observar en la **imagen 1**, se describe el árbol de criterios usado para el análisis multicriterio que se realizó en esta investigación, en este se describen los 3 nodos principales en los cuales basamos nuestro estudio, además, de cada criterio que se evaluó para cada tecnología. Esta

distribución nos ayuda a dimensionar que criterio está conectado cada nodo y como se encuentran distribuidos en cada ramificación.

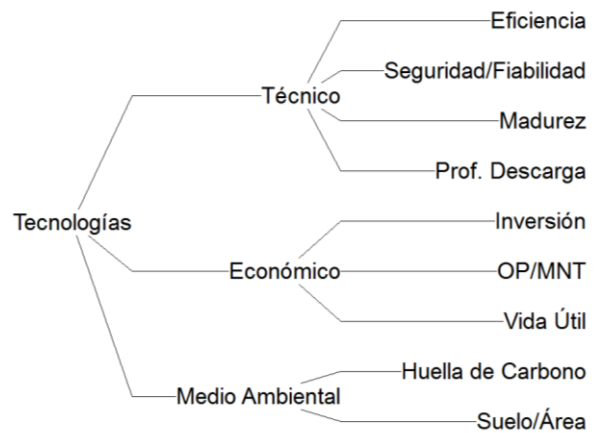


Imagen 1. Árbol de nodos y criterios

4.1 – Recolección de información

Tabla 3. Datos de cada sistema para cada criterio

CRITERIOS	SISTEMA DE BATERIAS SOLARES	SISTEMA DE ELECTROLISIS ALCALINA	SISTEMA DE ELECTROLISIS PEM	REFERENCIA
EFICIENCIA	90%	51%	54%	[64,65,67,68]
MADUREZ	Commercial (4)	Commercial (3,8)	Commercial (3)	[50]
SEGURIDAD / FIABILIDAD	IP20	IP65	IP67	[62,63,64,65]
INVERSIÓN	364 USD/KWh	750 USD/KWh	1050 USD/KWh	[65,67]
OP/MT	27,47 USD/Hora	45,64 USD/Hora	45,64 USD/Hora	[56]
VIDA UTIL	15 Años	14,69 Años	13,03 Años	[54,65,67,69]
HUELLA DE CARBONO	1270 g CO ₂ Eq/KWh	332 g de CO ₂ Eq/KWh	336 g CO ₂ Eq/kWh	[66,70]
SUELO/AREA	0,9282 m ²	1,3677 m ²	0,5177 m ²	[54,64,65,67]
PORFUNDIDAD DE DESCRAGA	95%	100%	100%	[63,65]

En la **tabla 3**, se presenta la síntesis de datos para los diferentes criterios dividido para cada sistema de almacenamiento de los 3 estudiados en el análisis multicritero. Estos datos fueron compilados de diferentes fuentes de información, tanto artículos científicos, reportes presentados por entidades como NREL (The National Renewable Energy Laboratory, por sus siglas en ingles) y IRENA (The International Renewable Energy Agency, también por sus siglas en ingles), además, de contactar con diferentes marcas locales e internacionales que proporcionaron las fichas técnicas de equipos de naturaleza similar a los sistemas evaluados.

La información descrita en la **tabla 3**, corresponde a una mezcla de datos basados en el tamaño de los sistemas que describieron para el análisis. El sistema de baterías y los sistemas de hidrogeno verde fueron pensados para suplir la necesidad de almacenamiento del caso de estudio, y de igual manera, los datos para cada criterio también fueron recolectados y compilados basados en esa escala de aplicabilidad de una escuela rural de una ZNI del pacifico colombiano.

4.2 – Análisis de sensibilidad

Después de construir el árbol de criterios, ingresar los datos de cada sistema de almacenamiento para cada criterio y de aplicar el sistema de pesos definido por el investigador en el software Hiview 3.0, se llevó a cabo el análisis multicriterio.

Para realizar el análisis de sensibilidad se empleó las diferentes herramientas del software. Una de estas fueron los gráficos de mapas de decisión que comparan los nodos en pares para observar la distribución de cada opción (en nuestro caso, sistemas de almacenamiento de energía) basado en la importancia dentro del análisis.

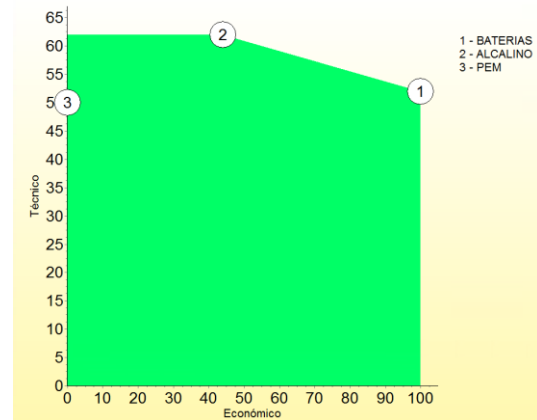


Gráfico 4. Mapa de decisiones de nodo económico vs técnico

En el **gráfico 4**, se encontró la comparación entre los nodos económicos en el eje X y el nodo técnico del eje Y. Cada posición de los sistemas evaluados esta ponderada basado en la interacción de todos los criterios pertenecientes a cada nodo y la interacción entre nodos. Es decir, la posición de cada opción está determinada por cómo afecta cada criterio específico de cada nodo a las opciones evaluadas. Para simplificarlo, el software pondera la importancia de cada criterio evaluado, que a su vez están concentrados en un nodo específico.

Esta ponderación, es la que posteriormente se compara con la ponderación del otro nodo (esto para cada tecnología), y así se ubica cada tecnología en el mapa de decisión.

En este caso, el **gráfico 4**, da evidencia que, evaluando desde los criterios técnicos vs los económicos, la opción que lleva más importancia son los sistemas de baterías, ya que su favorecimiento desde el aspecto técnico y su favorecimiento también desde el lado económico deja en evidencia que es la opción más determinante.

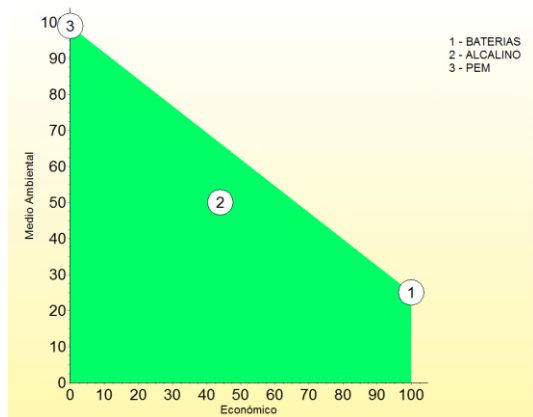


Gráfico 5. Mapa de decisiones de nodo económico vs medio ambiental

Cuando se examinó el **grafico 5**, el cual muestra la comparación entre el nodo económico vs el medio ambiental se observó

como la contribución de importancia del nodo medio ambiental a la opción de sistema de baterías disminuye, y favorece la opción de sistemas de electrolisis PEM. Esta grafica nos indica que, en criterios de impacto medioambiental, los sistemas PEM tienen una alta importancia mientras que comparas con los sistemas de electrolisis alcalino y los sistemas de baterías que su impacto es menor. Sin embargo, como era de evidenciarse, su contribución por el nodo económico es todo lo contrario, donde se evidencia como los sistemas de electrolisis son mucho más costosos que el sistema de baterías.

Los **gráficos 6, 7 y 8**, son gráficos de sensibilidad, donde describen como cambia el orden de importancia de los sistemas si el nodo graficado tuviera mayor peso dentro del análisis. Hay dos aspectos importantes de estos gráficos de sensibilidad que son: La línea vertical describe el peso originalmente otorgado dentro del análisis al nodo estudiado; en este caso en particular, se sitúa en el 33,3% para cada nodo, como se describió en la metodología anteriormente. El otro aspecto importante a tener en cuenta dentro de la gráfica es la zona sombreada la que esta se dibuja para resaltar la ponderación a la que cambia la opción recomendada.

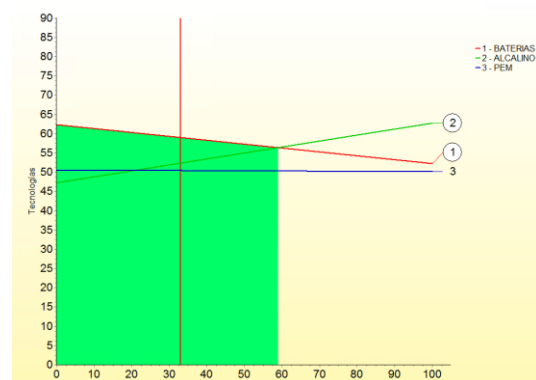


Gráfico 6. Análisis de sensibilidad de nodo Técnico

En el **gráfico 6**, se evidencia que, si ocurre un cambio de importancia aumentando el peso del nodo de tecnología dentro del análisis, después de su 33,3% de peso inicial (descrito por la línea vertical) las opciones cambiarán de preferencia y los sistemas de hidrógeno verde por electrolisis se convertirá en la opción preferida poco después del 60% de importancia (donde termina la zona sombreada). A pesar de que, si ocurre un cambio, la diferencia no sería grande al aumentar la importancia, esto quiere decir que el nodo de aspectos técnicos es muy compacto entre sí y las diferencias entre opciones no es tan marcada como ocurre en otros los otros nodos.

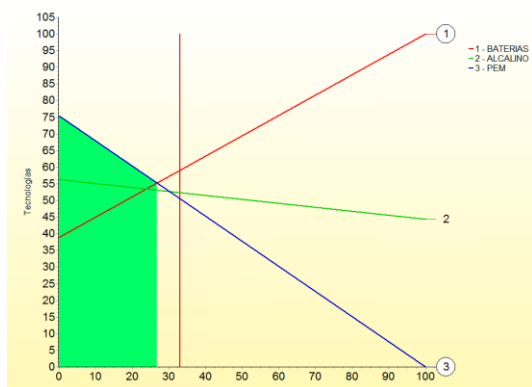


Gráfico 7. Análisis de sensibilidad de nodo Económico

Para el **gráfico 7**, se evidencia como, si la importancia del nodo de criterios económicos aumentara su peso dentro del análisis, la primera opción arrojada sería las baterías solares, esto debido a que, en la parte económica, los sistemas de baterías tienen menores coste de inversión que los demás, su coste de operación es menor y además su vida útil promedio del sistema es mayor que los otros almacenamientos basados en hidrógeno verde. En este caso, el nodo evidencia como el cambio de preferencia ocurre antes de la línea vertical, indicando que, si dentro de nuestro análisis le otorgáramos menos peso al nodo

económico, la opción de sistemas de hidrógeno verde sería la opción preferida. Por otro lado, donde se aumente más del 28% de importancia, se reafirma que las baterías, al menos en este nodo, son la opción preferida.

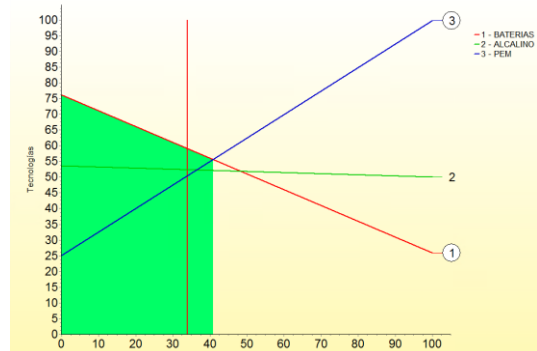


Gráfico 8. Análisis de sensibilidad de nodo Medio ambiental

Por otra parte, el **gráfico 8** muestra cómo, al aumentar el nivel de importancia más allá del 40% de importancia en el nodo medio ambiental, la decisión más favorable para aplicar en nuestro caso de estudio sería el sistema de almacenamiento de hidrógeno con electrolisis PEM. Esta decisión es respaldada por los datos de **tabla 3**, mostrando que este sistema es que menor huella de carbono posee. Esto deja en evidencia que, si se tomara la decisión pensando únicamente el impacto medio ambiental de la tecnología, los sistemas PEM serían la decisión correcta por su bajo impacto.

El análisis de sensibilidad de alguna forma nos ayuda a dimensionar en que nodos y criterios se debe mejorar los sistemas para poder ser la opción viable.

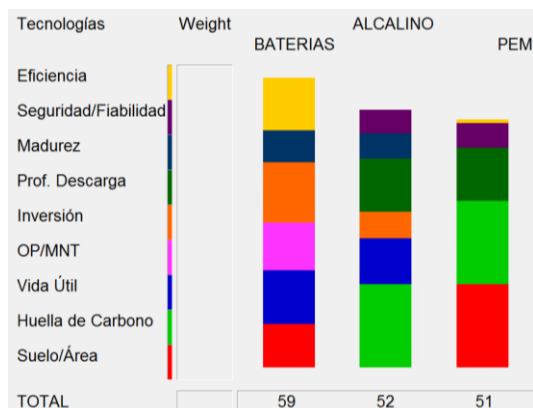


Gráfico 9. Diagrama de barras acumulados de cada criterio

La contribución de cada criterio se desglosa en el **gráfico 9**, donde se muestra la distribución de cada criterio para cada tecnología, esto basado en la interacción del peso se importancia de cada criterio y su respectivo dato que particular, además, muestra la contribución de esta interacción para cada tecnología lo que va aumentando o disminuyendo el tamaño de cada barra. En la parte inferior se puede evidenciar más claramente como cada aporte va aumentando el valor total de decisión para cada opción sometida a estudio, dejando claro que el sistema de baterías es la decisión que se debe aplicar.

No obstante, si se comparan las otras puntuaciones no existe una diferencia significativa entre las opciones estudiadas dejando la posibilidad de que los sistemas de hidrógeno verde compitan con las baterías solares como método de almacenamiento; sin embargo, hay que tomar en cuenta que esto solo se lograría si se modifica los enfoques en los cuales se basa el análisis (cambio de sistema de pesos, pensado desde un enfoque como el impacto medio ambiental como principal requerimiento) favoreciendo así a los sistemas de hidrógeno. Pero, también hay opciones que los estos sistemas tomen la ventaja sin

modificar el enfoque, solo que para ello se lograría si las tecnologías estuvieran un poco más desarrolladas, con mayor madurez, menos costos de inversión, entro otros aspectos a considerar.

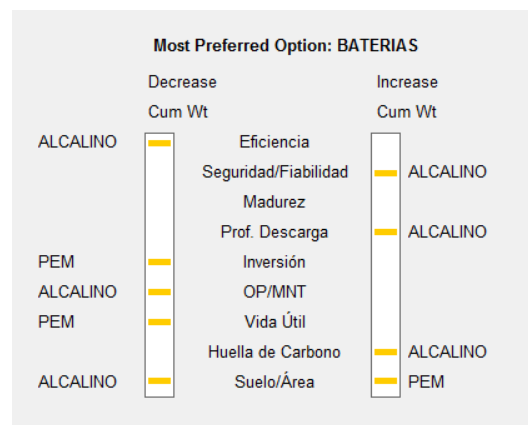


Gráfico 10. Análisis de sensibilidad del modelo estudiado

El **grafico 10**, es otro tipo de gráfico de análisis de sensibilidad, pero en este nos muestra como es la sensibilidad al cambio por criterio y que opción sería la preferida si ocurre ese cambio en el sistema de pesos (izquierda es disminución de importancia y derecha aumento de esta), además, la línea de colores nos indica la sensibilidad al cambio en cada criterio. En este caso, el amarillo nos indica que debe cambiar el peso acumulado entre 5 y 15 puntos para cambiar la opción preferida.

Del **grafico 10**, podemos observar cómo es de susceptible nuestro análisis a los cambios, y que tan cerca se encuentran los sistemas de hidrogeno verde, de competir con los sistemas de baterías solares. Esto concuerda mucho con diversos análisis hechos por organizaciones expertas como IRENA, NREL y organizaciones gubernamentales de energía de Estados Unido, donde mencionan que los proyectos energéticos con base en la producción de

hidrogeno verde están muy cerca de ser competencia y una superación de los sistemas de almacenamiento actuales en baterías. Teniendo en cuenta, que los cambios son en el futuro y depende mucho del desarrollo y la innovación de las tecnologías.

5 – Conclusión

De acuerdo con nuestro análisis multicriterio, el sistema de baterías solares aplicado a nuestro caso de estudio de una escuela rural en zonas no interconectadas resulta siendo la opción viable de almacenamiento energético para ser acoplada al sistema de paneles solares diseñado en la demanda teórica de esta.

Sin embargo, se proyecta con el análisis de sensibilidad que, los sistemas basados en producción de hidrógeno verde compiten de cerca con los sistemas de almacenamiento en baterías, dejando en evidencia que no se encuentran muy lejos de ser opciones aplicables a este tipo de zonas.

Hay que recalcar que son tecnologías muy modernas a pesar de ya tener un desarrollo importante en el mercado, son sistemas que, vistos para escenarios particulares como hogares o escuelas, no son factibles por sus costes, eficiencias y demás características. No obstante, esto permite pensar que los sistemas de producción de hidrógeno verde si pueden ser visto como una opción muy viable en los 10 años futuros.

Referencias

- [1] Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica (Acolgen), (2021). www.acolgen.org.co
- [2] Instituto de planificación y Promoción de soluciones Energéticas para las Zonas No interconectadas (IPSE), (2020). Obtenido de Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas - IPSE: <http://www.ipse.gov.co>
- [3] Congreso de la República de Colombia (Diciembre 18, 2003). Ley 855. Definición de las zonas no interconectadas. DO. 45405. <http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=1669722#:~:text=DECRETA%3A.al%20Sistema%20Interconectado%20Nacional%2C%20SIN.>
- [4] Adhikary, P., & Kundu, S. (2014). Small hydropower project: Standard practices. *International Journal of Engineering Science & Advanced Technology*, 4(2), 241-247.
- [5] Gaona, E. E., Trujillo, C. A., & Guacaneme, J. A. (2015). Rural microgrids and its potential application in Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 125-137.
- [6] Avendaño, N., Ossa, D., Sarmiento, Á., & Sáenz, G. (2020). Informe sectorial de la prestación del servicio de energía eléctrica. Bogotá.
- [7] Gurung, A., & Qiao, Q. (2018). Solar charging batteries: advances, challenges, and opportunities. *Joule*, 2(7), 1217-1230.
- [8] Zeng, K., & Zhang, D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in energy and combustion science*, 36(3), 307-326.
- [9] Kakoulaki, G., Kougiyas, 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.
- [10] Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International journal of hydrogen energy*, 38(12), 4901-4934.
- [11] Ramadan, M. (2021). A review on coupling Green sources to Green storage (G2G): Case study on solar-hydrogen coupling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30547-30558.
- [12] Arce, M. E., Saavedra, Á., Míguez, J. L., & Granada, E. (2015). The use of grey-based methods in multi-criteria decision analysis for the evaluation of sustainable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 924-932.
- [13] Gómez, J. C. O., & Cabrera, J. P. O. (2008). El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia et Technica*, 14(39), 247-252.
- [14] Berumen, S. A., & Redondo, F. L. (2007). La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente. *Cuadernos de administración*, 20(34), 65-87.
- [15] Nicklin, D., & Darabkhani, H. G. (2021). Techniques to measure particulate matter emissions from stationary sources: A critical technology review using Multi Criteria Decision Analysis (MCDA). *Journal of Environmental Management*, 296, 113167.
- [16] Bernier, D. (2011). Energización de escuelas rurales dotadas con computadores que se encuentran fuera de servicio por su ubicación en zonas no interconectadas (ZNI) en los Municipios de Ataco, Chaparral, Ortega y Rioblanco del departamento del Tolima. Tolima: Universidad del Tolima.
- [17] Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas – IPSE, & C.N.M. (2012). Electrificación de escuelas rurales. Minenergía y Mineducación. Obtenido de: https://www.mineducacion.gov.co/1621/articulos-300444_archivo_pdf_ipse.pdf
- [18] Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. C. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 596-609.
- [19] Mardani, A., Zavadskas, E. K., Khalifah, Z., Zakuan, N., Jusoh, A., Nor, K. M., & Khoshnoudi, M. (2017). A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 216-256.
- [20] Vlachokostas, C., Michailidou, A. V., & Achillas, C. (2020). Multi-criteria decision analysis towards promoting waste-to-energy management strategies: a critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110563.
- [21] Chi, J., & Yu, H. (2018). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Chinese Journal of Catalysis*, 39(3), 390-394.
- [22] Lee, J., Alam, A., & Ju, H. (2021). Multidimensional and transient modeling of an alkaline water electrolysis cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(26), 13678-13690.
- [23] Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., & Zhao, J. H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(9), 2263-2278.
- [24] Shah, S. A. A. (2020). Feasibility study of renewable energy sources for developing the hydrogen economy in Pakistan. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(32), 15841-15854.
- [25] d'Amore-Domenech, R., Santiago, Ó., & Leo, T. J. (2020). Multicriteria analysis of seawater electrolysis technologies for green hydrogen production at sea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110166.
- [26] Arce, M. E., Saavedra, Á., Míguez, J. L., & Granada, E. (2015). The use of grey-based methods in multi-criteria decision analysis for the evaluation of sustainable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 924-932.
- [27] Doukas, H. C., Andreas, B. M., & Psarras, J. E. (2007). Multi-criteria decision aid for the formulation of sustainable technological energy priorities using linguistic variables. *European journal of operational research*, 182(2), 844-855.
- [28] Jovanović, M., Afgan, N., Radovanović, P., & Stevanović, V. (2009). Sustainable development of the Belgrade energy system. *Energy*, 34(5), 532-539.
- [29] Afgan, N. H., & Carvalho, M. G. (2004). Sustainability assessment of hydrogen energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(13), 1327-1342.
- [30] Mohsen, M. S., & Akash, B. A. (1997). Evaluation of domestic solar water heating system in Jordan using analytic hierarchy process. *Energy Conversion and Management*, 38(18), 1815-1822.

- [31] Chatzimouratidis, A. I., & Pilavachi, P. A. (2008). Multicriteria evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process. *Energy policy*, 36(3), 1074-1089.
- [32] Dinca, C., Badea, A., Rousseaux, P., & Apostol, T. (2007). A multi-criteria approach to evaluate the natural gas energy systems. *Energy Policy*, 35(11), 5754-5765.
- [33] Chatzimouratidis, A. I., & Pilavachi, P. A. (2009). Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process. *Energy policy*, 37(3), 778-787.
- [34] Chatzimouratidis, A. I., & Pilavachi, P. A. (2007). Objective and subjective evaluation of power plants and their non-radioactive emissions using the analytic hierarchy process. *Energy policy*, 35(8), 4027-4038.
- [35] Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., Shi, G. H., & Zhang, X. T. (2008). A fuzzy multi-criteria decision-making model for trigeneration system. *Energy Policy*, 36(10), 3823-3832.
- [36] Beccali, M., Cellura, M., & Mistretta, M. (2003). Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renewable energy*, 28(13), 2063-2087.
- [37] Cavallaro F, Ciralo L. Amulticriteria approach to evaluate wind energy plants on an Italian island. *Energy Policy* 2005;33:235–44.
- [38] Diakoulaki, D., & Karangelis, F. (2007). Multi-criteria decision analysis and cost-benefit analysis of alternative scenarios for the power generation sector in Greece. *Renewable and sustainable energy reviews*, 11(4), 716-727.
- [39] Burton, J., & Hubacek, K. (2007). Is small beautiful? A multicriteria assessment of small-scale energy technology applications in local governments. *Energy policy*, 35(12), 6402-6412.
- [40] Pilavachi, P. A., Stephanidis, S. D., Pappas, V. A., & Afgan, N. H. (2009). Multi-criteria evaluation of hydrogen and natural gas fuelled power plant technologies. *Applied Thermal Engineering*, 29(11-12), 2228-2234.
- [41] Afgan, N. H., & Carvalho, M. G. (2002). Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants. *Energy*, 27(8), 739-755.
- [42] Løken, E., Botterud, A., & Holen, A. T. (2009). Use of the equivalent attribute technique in multi-criteria planning of local energy systems. *European Journal of Operational Research*, 197(3), 1075-1083.
- [43] Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., Zhang, X. T., & Shi, G. H. (2008). Integrated evaluation of distributed triple-generation systems using improved grey incidence approach. *Energy*, 33(9), 1427-1437.
- [44] Pilavachi, P. A., Roumpeas, C. P., Minett, S., & Afgan, N. H. (2006). Multi-criteria evaluation for CHP system options. *Energy Conversion and Management*, 47(20), 3519-3529.
- [45] Wang, J. J., Jing, Y. Y., & Zhang, C. F. (2009). Weighting methodologies in multi-criteria evaluations of combined heat and power systems. *International Journal of Energy Research*, 33(12), 1023-1039.
- [46] Ramanathan, R., & Ganesh, L. S. (1994). A multi-objective analysis of cooking-energy alternatives. *Energy*, 19(4), 469-478.
- [47] Akash, B. A., Mamlook, R., & Mohsen, M. S. (1999). Multi-criteria selection of electric power plants using analytical hierarchy process. *Electric power systems research*, 52(1), 29-35.
- [48] Begić, F., & Afgan, N. H. (2007). Sustainability assessment tool for the decision making in selection of energy system—Bosnian case. *Energy*, 32(10), 1979-1985.
- [49] Afgan, N. H., & Carvalho, M. G. (2008). Sustainability assessment of a hybrid energy system. *Energy Policy*, 36(8), 2903-2910.
- [50] Holladay, J. D., Hu, J., King, D. L., & Wang, Y. (2009). An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis today*, 139(4), 244-260.
- [51] Saenz, Carlos. (2020) Análisis técnico económico de tecnología de electrolisis tipo PEM para producción de hidrógeno en Colombia. Universidad de los Andes. Bogota
- [52] Hlal, M. I., Ramachandaramurthy, V. K., Sarhan, A., Pouryekta, A., & Subramaniam, U. (2019). Optimum battery depth of discharge for off-grid solar PV/battery system. *Journal of Energy Storage*, 26, 100999.
- [53] Guena, T., & Leblanc, P. (2006, September). How depth of discharge affects the cycle life of lithium-metal-polymer batteries. In INTELEC 06-Twenty-Eighth International Telecommunications Energy Conference (pp. 1-8). IEEE.
- [54] Quantum Fuel Systems. (June de 2019). Hydrogen Cylinder General Specifications. Obtenido de H2 Tank specifications: <https://www.qtw.com/wp-content/uploads/2019/06/H2-Tank-Specifications-June-2019-All-Tanks-1.pdf>
- [55] Kurtz, J., Ainscough, C., Simpson, L., & Caton, M. (November de 2012). Hydrogen Storage Needs for Early Motive Fuel Cell Markets. Obtenido de National Renewable Energy Laboratory: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/52783.pdf>
- [56] Feldman, David, Vignesh Ramasamy, Ran Fu, Ashwin Ramdas, Jal Desai, and Robert Margolis. (2021). U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2020. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A20-77324. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/77324.pdf>.
- [57] IRENA (2019), Hydrogen: A renewable energy perspective, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
- [58] IRENA (2017), Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [59] De Vivero, G., & Kempener, R. (June de 2015). Renewables and Electricity Storage: A technology roadmap for REmap 2030. Obtenido de International Renewable Energy Agency: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_REmap_Electricity_Storage_2015.pdf
- [60] Ramsden, T. (April de 2013). An Evaluation of the Total Cost of Ownership of Fuel Cell-Powered Material Handling Equipment. Obtenido de National Renewable Energy Laboratory: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56408.pdf>
- [61] Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective. (January de 2020). Obtenido de Hydrogen Council: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf
- [62] Ivy, J. (September de 2004). Summary of Electrolytic Hydrogen Production. Obtenido de National Renewable Energy Laboratory: <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/36734.pdf>
- [63] Energy, U. D. (October de 2016). Manufacturing Cost Analysis of PEM Fuel Cell Systems for 5- and 10-kW Backup Power Applications. Obtenido de

https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/12/f34/fcto_cost_analysi_s_pem_fc_5-10kw_backup_power_0.pdf

[64] Proton Motor Fuel Cell. (January de 2021). PM 400 Stack Module. Obtenido de Fuel Cell Stacks and Systems: <https://www.proton-motor.de/wp-content/uploads/2021/01/PM400-Datasheet.pdf>

[65] PYLONTECH. (January de 2021). UP5000 Operation Manual. Obtenido de Ficha Tecnica Rechargeable Li-ion Battery.

[66] Liang, Y., Su, J., Xi, B., Yu, Y., Ji, D., Sun, Y., ... & Zhu, J. (2017). Life cycle assessment of lithium-ion batteries for greenhouse gas emissions. Resources, conservation and recycling, 117, 285-293.

[67] IRENA (2020), Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

[68] Kurtz, J., Ainscough, C., Simpson, L., & Caton, M. (November de 2012). Hydrogen Storage Needs for Early Motive Fuel Cell Markets. Obtenido de National Renewable Energy Laboratory: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/52783.pdf>

[69] Ji, M., & Wang, J. (2021). Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators. International Journal of Hydrogen Energy.

[70] Mann, M., & Spath, P. (2004). Life Cycle Assessment of Renewable Hydrogen Production via Wind/Electrolysis: Milestone Completion Report (No. NREL/MP-560-35404). National Renewable Energy Lab., Golden, CO.(US).