

Evaluación técnica preliminar de un sistema de gestión de energía (EMS) basado en modelos de regresión polinómica en la optimización de la producción de hidrógeno verde en una microrred.

Elaborado por:

Cristhian Camilo Castañeda Gutiérrez

Universidad EAN

Seminario de Investigación de especialización en gerencia de proyectos

Bogotá

28/04/2024

Tabla de contenido

Planteamiento del Problema	7
Antecedentes del problema	7
Descripción del problema	8
Pregunta de investigación	9
Objetivos	9
Objetivo general	9
Objetivos específicos	9
Justificación	10
Marco Teórico	12
Conveniencia de la investigación	20
Metodología	21
Primer nivel	21
Enfoque	21
Alcance	22
Diseño de la investigación	22
Definición de variables	22
Población y muestra	24
Tipo de muestreo elegido	24
Tamaño de la muestra	24
Segundo nivel	25
Selección de métodos o instrumentos para recolección de información	25
Técnicas de análisis de datos	26
Entrevistas a expertos	26
Descripción del modelo de simulación micro red de hidrógeno verde	27
Vectores de propiedades del hidrógeno	27
Arreglo solar	28
Unidad de electrólisis	28
Almacenamiento de energía	29
Referencia de operación y parámetros del convertidor	29
Parámetros de control	30

Resultados	30
Guía de diseño y definición de variables	30
Escenario A	31
Escenario B	33
Escenario C	34
Guía modelo de regresión polinomial e implementación	35
Variables de configuración	36
Variables de resultados	36
Integración del modelo de regresión polinómica en simulación	39
Validez y confiabilidad	42
Validación con expertos	42
Discusión de resultados	45
Conclusiones	45
Recomendaciones para estudios futuros	47
Referencias	48

Índice de tablas

Tabla 1. Definición de variables. Elaboración propia	23
Tabla 2. Técnicas de análisis de datos. Elaboración propia	26
Tabla 3. Tres escenarios para micro red hidrógeno verde. Elaboración propia	31

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1. Pilares Hoja de ruta del Hidrógeno en Colombia. Fuente (Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2022).....	11
Ilustración 2. Electrólisis. Fuente: (iAgua, 2022b)	15
Ilustración 3. Tipos calidad del agua para Hidrógeno verde. Fuente (iAgua, 2022a)	16
Ilustración 4. Regresión polinomial (Gonzalez, 2019).....	18
Ilustración 5. Potencia en kW para escenario A	31
Ilustración 6. Producción de hidrógeno escenario A	32
Ilustración 7. Estado de carga de la batería escenario A	32
Ilustración 8. Potencia en kW para escenario B	33
Ilustración 9. Producción de hidrógeno escenario B	33
Ilustración 10. Estado de carga de la batería escenario B.....	34
Ilustración 11. Potencia en kW para escenario C	34
Ilustración 12. Producción de hidrógeno escenario C.....	35
Ilustración 13. Estado de carga de la batería escenario C.....	35

Anexos

Anexo A: Matlab simulink para la simulación de operación de una microrred	55
Anexo B: Ejemplo de regression polynomial con Scikit-Learn Example	55
Anexo C: Gráfico unificado del escenario A	56
Anexo D: Analizador lógico escenario A	56
Anexo E: Gráfico unificado del escenario B	56
Anexo F: Analizador lógico escenario B.....	57
Anexo G: Gráfico unificado del escenario.....	57
Anexo H: Analizador lógico escenario C	58
Anexo I: Modelo simulación micro red hidrógeno verde.....	58
Anexo J: Archivos base de simulación 3 configuraciones	59

Planteamiento del Problema

Antecedentes del problema

La energía eléctrica es esencial para que funcione una cantidad relevante de la economía y para el desarrollo de las actividades cotidianas, sin embargo, esta generación de energía depende de combustibles fósiles, siendo responsables directos de la generación de gases de efecto invernadero (GEI). Adicionalmente, implica que este tipo de recurso se agote por sobreexplotación, generando un riesgo a la economía global y al ecosistema. (Enel X, 2022), por lo que es importante el impulso de energías no convencionales para cumplir con las necesidades de consumo eléctrico a nivel mundial.

Desde la perspectiva nacional, Colombia es un país con una dinámica creciente respecto al desarrollo de proyectos de generación con energías no convencionales, siendo así, un referente regional en temas de transición energética, con una proyección de generación de renovables del 17% de la capacidad de generación hacia el 2027 (Planas & Cárdenas, 2023).

Con esa adopción progresiva de un cambio en el modelo energético mundial, Colombia se ha basado en el proyecto de ley 1715 del 2014 dónde busca promover el desarrollo y uso de fuentes de energía renovables en el sistema energético nacional, dándole prioridad a fuentes a fuentes renovables cambiando el balance energético nacional en dicha matriz. (Flechas, 2022).

Una de las tecnologías emergentes es el hidrógeno verde, que sirve como fuente de energía, que a diferencia de otras fuentes no emite gases de efecto invernadero, el hidrógeno es uno de los elementos más abundantes del planeta, sin embargo, encontrarlo de manera pura es poco común, en el caso contrario requiere un proceso de electrólisis. El hidrógeno verde ha comenzado a ser una fuente de energía relevante que aportará a la transición energética, ya que permite disminuir el uso de combustibles fósiles, a pesar de ser una

alternativa atractiva para la generación de energía, producirla implica altos costos, mayores al hidrógeno gris y azul, a diferencia del verde, estos sí producen GEI (santiagorodriguez6, 2023).

El gran reto al que se enfrenta esta tecnología es desarrollar soluciones que permitan disminuir el costo de producirla para ampliar un mercado atractivo en el sector energético y contribuir a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

Descripción del problema

La producción de hidrógeno verde para una microrred requiere de un sistema de gestión de energía (EMS por sus siglas en inglés) adaptable y eficiente que gestione la producción, teniendo en cuenta la forma en cómo varía la generación de energía y su costo de producción. Lograr la máxima eficiencia en una micro red es un gran reto tecnológico y operativo, por lo que modelos de regresión polinómica resultan ser una opción prometedora para el control de producción de hidrógeno verde, sin embargo, no se ha demostrado completamente la viabilidad técnica de una implementación de esta tecnología en este tipo de sistema.

Los costos de producción de hidrógeno verde son uno de los temas más retadores en la implementación de estas tecnologías en escalas menores, ya que en comparación al hidrógeno gris y azul, es el más costoso de producir ya que se ubica entre US\$4,5 y US\$12 por kilogramo (Salazar, 2023). Según el profesor Jiménez de la universidad de los Andes, el avance de diferentes tecnologías como el internet de las cosas (IoT), macrodatos y la inteligencia artificial permiten un monitoreo inteligente, generen datos para modelos tarifarios, también detecten fallas en los sistemas y permitan un portafolio más amplio, a pesar de los desafíos en cuanto a temas de regulación y comportamiento de mercados. Adicionalmente Mónica Gasca de Hidrógeno Colombia habla sobre la importancia de desarrollar tecnologías de hidrógeno que sean sostenibles, ya que su potencial puede reemplazar combustibles como la gasolina (Facultad de ingeniería, 2023).

Hay un reto evidente sobre cómo hacer más eficiente la producción de hidrógeno verde para que impacte en la disminución de costos, pero el punto de inflexión va a darse a medida que se den avances en la tecnología, y regulaciones y normativas que incentiven la aplicación, incluyendo sus diferentes etapas de este proceso tecnológico. Es importante el estudio del hidrógeno ya que hace parte de la transición energética como un elemento fundamental, se estima que para el 2050 podría llegar a cubrir hasta un 24% de toda la demanda energética, ayudar a la disminución total de 560 millones de toneladas métricas de CO₂ y generar 5,4 millones de puestos de trabajo (Enel, 2024).

Pregunta de investigación

¿Puede la implementación de un sistema de gestión de energía (EMS) basado en modelos de regresión polinómica optimizar la producción de hidrógeno verde en microrredes?

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un conjunto de instrucciones que permita la implementación de un sistema de gestión de energía (EMS) basado en modelos de regresión polinomial para la producción de hidrógeno verde en microrredes.

Objetivos específicos

- Caracterizar la producción de hidrogeno verde en micro redes.
- Identificar las variables y parámetros esenciales que influyen en la producción de hidrógeno verde en microrredes, considerando factores climáticos y técnicos específicos de cada configuración simulada.

- Desarrollar una guía para la simulación de un EMS utilizando regresión polinomial, que sirva como base para futuros desarrollos y simulaciones.
- Validar con expertos la guía propuesta

Justificación

La generación de energía eléctrica, basada en gran medida en la quema de combustibles fósiles, es un factor fundamental en la problemática del cambio climático, ya que produce una cantidad significativa de gases de efecto invernadero que se liberan a la atmósfera. El carbón, el petróleo y el gas son los mayores responsables de más del 75% del total de emisiones de gases de efecto invernadero y cerca del 90 % de todas las emisiones en dióxido de carbono. (Nations, 2024)

La apuesta actual es la transición energética, uno de los elementos clave son las políticas de gobierno en Colombia que le permitan al país avanzar en este sentido a través de la incorporación de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) y eficiencia energética, cuyo propósito es disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. Según DNP: “La diversificación energética a partir de la promoción del hidrógeno, el aprovechamiento energético de la biomasa, la geotermia, la energía mareomotriz, eólica y solar permitirá la transición gradual a una matriz energética con mayor participación de fuentes renovables no convencionales” (Departamento Nacional de Planeación, 2023) por lo que se busca esa diversificación energética de estas tecnologías para el desarrollo realista de la transición energética de Colombia.

La transición energética es clave para la reducción del impacto ambiental, amortización de la demanda energética y la disminución de gases de efecto invernadero, sin embargo, los recursos renovables, como las condiciones climáticas, viento, radiación solar son variables y difíciles de predecir, por lo que dicha gestión de energía es compleja. Cuando el sistema

multivariable (generación, demanda, almacenamiento) con gran dependencia de fuentes de energía limpias incrementa la dificultad de lograr una gestión eficiente por lo que tecnologías como inteligencia artificial y el aprendizaje automático pueden aportar mucho en esa gestión, facilitando la optimización de procesos de producción, almacenamiento y demanda con base a patrones y tareas repetitivas que permita la toma de decisiones más adecuadas en el sistema. (Cruz, 2023).

La ruta del hidrógeno verde en Colombia es un paso importante para contribuir al desarrollo e implementación de este recurso, reforzando el compromiso de la reducción de emisiones según los objetivos del *Acuerdo de París 2015*. Además se establecen 5 pilares clave en busca de desarrollo social, medioambiental y económico en Colombia (Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2022).



Ilustración 1. Pilares Hoja de ruta del Hidrógeno en Colombia. Fuente (Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2022)

En la cadena de valor del hidrógeno verde los retos más relevantes son la intermitencia de las energías renovables, la necesidad de mejorar la eficiencia en tecnología de electrólisis y la búsqueda de reducir esos costos energéticos a través de la optimización en los procesos de producción del hidrógeno. Por lo que tecnologías como internet de las cosas (IoT), Big Data, inteligencia artificial y modelos de aprendizaje automático pueden resolver problemas con una

mayor velocidad y a una mayor escala que la mente humana no es capaz de igualar (Castro, 2023). Combinar estas tecnologías en la generación de hidrógeno verde permiten ser relevantes en la generación de energía ya que representa una mejora en los procesos de producción y una potencial reducción de costos operativos y maximización en recursos energéticos renovables.

El recurso del hidrógeno verde no solo es abundante e innovador, sino que tiene un amplio abanico de aplicaciones, como lo es la electrificación en zonas rurales, un buen respaldo de energía y que contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, además, está utilizando en el transporte, siendo una alternativa de movilidad sostenible, por lo que contribuye a la descarbonización del sector y en la industria, algunos sectores lo usan para fabricar amoníaco y fertilizantes (Sostenibilidad, 2024).

Existe una gran oportunidad en el uso de hidrógeno verde en zonas rurales, como una solución de almacenamiento energético flexible en comunidades rurales, siendo una gran alternativa para potenciar estas zonas que permita desarrollar nuevas actividades sostenibles y paralelamente disminuir el impacto ambiental que mejora la calidad de sus habitantes. (Fernández, 2024).

Marco Teórico

El concepto hidrógeno verde es una tecnología que se basa en la generación de hidrógeno, que es un combustible universal y reactivo, por medio de un proceso químico llamado electrólisis. La obtención de hidrógeno verde a través del proceso de electrólisis procede de la descomposición de moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno (Iberdrola, 2024), es una alternativa versátil y prometedora para el futuro energético, ya que facilita el almacenamiento de energía de fuentes no convencionales intermitentes, como la fuente eólica y solar donde busca proporcionar energía limpia en sectores industriales difíciles de descarbonizar, cuyo

propósito es reducir de forma progresiva la dependencia de combustibles fósiles y aportar en la mitigación del calentamiento global (Muñoz Fernández et al., 2022).

“Una microrred es una red local de producción y distribución de energía que puede operar de forma independiente cuando es desconectada de la red eléctrica principal en caso de crisis –como un apagón o tormenta– o, simplemente, para complementar los picos de demanda de los usuarios de las microrredes, evitando así mayores costes de energía.” (Enel X, 2024b). Las microrredes tienen una operatividad independiente de la red eléctrica principal y cuentan con equipamiento para poder distribuir la energía autogenerada.

Actualmente, microrredes de producción de hidrógeno verde utilizan sistemas de control avanzados para gestionar y optimizar sus operaciones, se denomina Sistema Gestión de Energía (EMS); es una herramienta que está vinculada a diferentes sensores que se conectan en la microrred por lo que permite medir el consumo de energía en diferentes niveles y correlaciona indicadores (KPIs) como la hora del día, la productividad, detectar pérdidas de energía y mantener la eficiencia energética (Dametis, 2022).

Se han desarrollado tecnologías de vanguardia que pueden mejorar y optimizar procesos en la industria energética. Aplicada a la producción de hidrógeno verde llevaría a una optimización en el proceso producción, por lo que implementar un modelo de regresión polinómica en el EMS de la microrred resulta ser el objeto de estudio.

La regresión polinomial es una herramienta poderosa que permite suavizar datos y ayudarlo a hacer predicciones e identificar tendencias. (Faster Capital, 2024). “Consigue añadir curvatura al modelo introduciendo nuevos predictores que se obtienen al elevar todos o algunos de los predictores originales a distintas potencias.” (Joaquín Amat, 2017). Por lo que a diferencia de la regresión lineal dónde busca encontrar patrones con base lineal, por ejemplo, predecir el costo de una vivienda en función de su tamaño, cuando se adicionan nuevas

variables como la ubicación, el estado de la casa y otros factores la regresión lineal ya no funciona, para ello, los modelos de regresión polinomial permiten capturar esta complejidad.

Una vez abordados los conceptos clave, hablar de hidrógeno verde es hacer referencia a un hidrógeno libre de emisiones contaminantes, un combustible que desde ya se postula como un vector energético, vital para la reducción de emisiones contaminantes y la apuesta por una lucha contra el cambio climático (Acciona, s/f). El proceso más eficiente para el proceso de producción de hidrógeno a partir de la energía eléctrica es el proceso denominado **electrólisis**. El proceso consiste en la separación del agua en sus elementos base, que son hidrógeno (H₂) y oxígeno (O), con la aplicación de una corriente eléctrica externa, la electricidad renovable se almacena de forma de hidrógeno. (AdminB, 2021).

La clave de la sostenibilidad radica en la forma en que se haya producido el hidrógeno, si es producido desde el carbón, gas natural o petróleo generan gases contaminantes se determina como hidrógeno azul y gris, pero sí se hace desde fuentes renovables como la solar, eólica o hidráulica su denominación es hidrógeno verde, sin embargo, la mayoría de hidrógeno es producido de combustibles fósiles porque hasta el momento es la forma más eficiente y barata de producirlo (Parrilla & Grau, 2022).

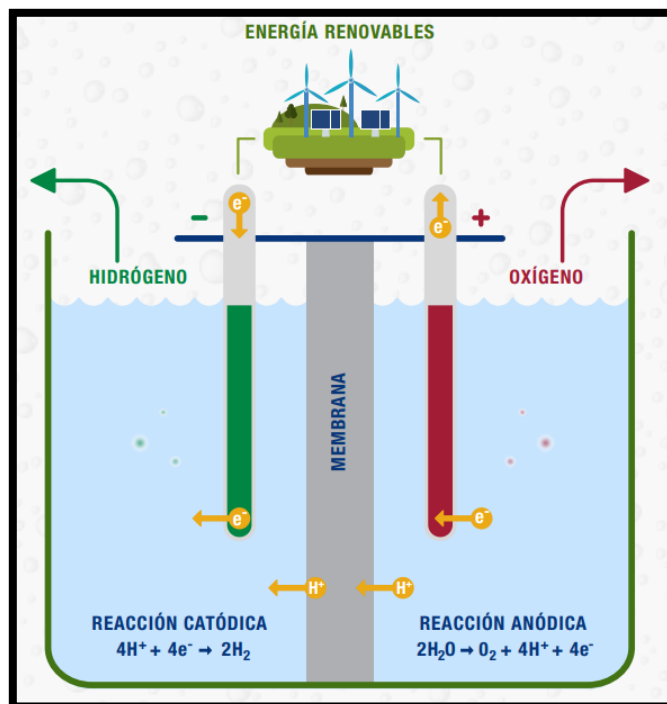


Ilustración 2. Electrólisis. Fuente: (iAgua, 2022b)

La producción de hidrógeno verde presenta retos y desafíos, el principal son los costos, pues crear hidrógeno verde no es propiamente económico, según BLK Media: “De acuerdo con la Administración de Información Energética de Estados Unidos (EIA), se necesita más energía para producir hidrógeno de la que éste proporciona cuando se convierte en energía útil” (BLK Media, s/f)

Para que esta tecnología sea prometedora se debe mencionar la disponibilidad del recurso hídrico como base al desarrollo del hidrógeno verde. El agua es un recurso limitado, tiene usos extendidos a nivel industrial y su aportación en la minimización de la emisión de gases de efecto invernadero es vital. Para que los procesos de electrólisis existan el recurso del agua es la fuente base, pero este elemento debe tener unas condiciones específicas para que ese proceso sea exitoso. El tipo de agua recomendado por la Normativa de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) para los electrolizadores debería ser el tipo 1:

Parámetro	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Conductividad eléctrica Max. ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25 °C)	0,056	1	4	5
Resistividad eléctrica Min ($\text{M}\Omega\text{-cm}$ a 25 °C)	18,2	1	0,25	0,2
pH a 25 °C	-	-	-	5,0 – 8,0
TOC máx. ($\mu\text{g}/\text{L}$)	10	50	200	Sin límite
Sodio máx. ($\mu\text{g}/\text{L}$)	1	5	10	50
Silice máx. ($\mu\text{g}/\text{L}$)	3	3	500	Sin límite
Cloro máx. ($\mu\text{g}/\text{L}$)	1	5	10	50

Ilustración 3. Tipos calidad del agua para Hidrógeno verde. Fuente (iAgua, 2022^a)

Para ello las PTA (Planta de tratamiento de aguas) deben ser la fuente recomendada para este proceso de producción, ya que el agua es de mayor calidad porque se hacen pretratamientos, ósmosis inversa y electrodesionización. (iAgua, 2022^a)

Respecto a su eficiencia el hidrógeno verde no destaca actualmente por ser la opción más llamativa porque las pérdidas de energía en el proceso de producción, iniciando por la electrólisis hasta su almacenamiento, transporte y distribución puede llegar hasta el 80%, además sus propiedades físicas como la baja densidad hacen que su transporte sea costos y complejo en relación con otros combustibles. (Ruíz de Gauna, 2023). Adicionalmente, es un gas que, por su poca densidad, es casi imposible prevenir fugas, por otra parte, es muy corrosivo e inflamable y para mantenerlo en estado líquido es necesario mantenerlo en temperaturas muy bajas. (BBVA, 2021).

La falta de demanda consolidada representa un desafío para el hidrógeno verde en Colombia, ya que existen barreras que limitan un desarrollo de infraestructura a una escala representativa, requiriendo así regulaciones y políticas que impulsen la demanda y promuevan inversión en el sector energético (AES el Salvador, 2024).

Respecto al uso de modelos de aprendizaje automático acelera el desarrollo de nuevas tecnologías, por ejemplo, el tema científico dónde utilizan modelos para acelerar el descubrimiento de materiales destinados a tecnologías de hidrógeno verde en materiales candidatos para pilas de combustible como el hidrógeno. (Química.es, 2023)

El aprendizaje automático contribuye en la energía fotovoltaica, la predicción de la radiación solar ofrece la posibilidad de optimizar el funcionamiento de sistemas solares que permiten optimizar los costos de producción y anticipar la cantidad de energía que puede entregar el sistema, incluyendo la mejora en la calidad. (Cano Perdomo & González Veloza, 2024)

Una de las aplicaciones más interesantes en el sector energético está en la optimización de la generación de energía, los algoritmos de la IA son capaces de analizar datos de fuentes como paneles solares y turbinas eólicas para predecir su producción en consecuencia optimizar el rendimiento del sistema. Al tener en cuenta factores como los cambios en el clima y datos históricos, la inteligencia artificial permite pronósticos con mayor exactitud, asegurando el uso de los recursos con mayor eficiencia. (Zamora, 2023)

El modelo de aprendizaje automático de regresión polinomial para desarrollar la propuesta inicial puede usarse para modelar la relación entre diferentes variables como la temperatura, la presión, la concentración de catalizador y la producción de hidrógeno y evaluar la viabilidad desde el punto de vista de implementación técnica, el algoritmo funciona de la siguiente manera:

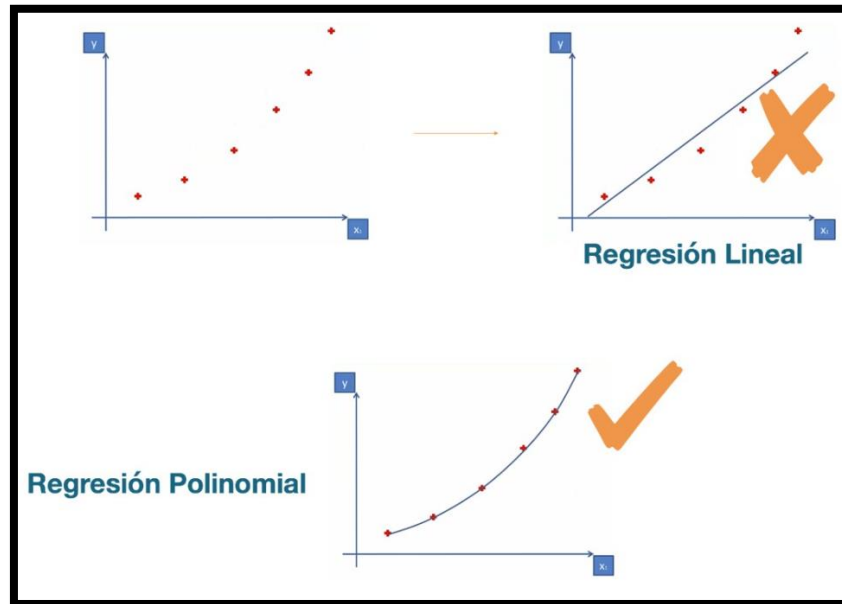


Ilustración 4. Regresión polinomial (Gonzalez, 2019)

El uso de modelos de regresión polinomial son una opción sólida para la producción de hidrógeno verde, ya que ofrece un buen equilibrio entre precisión, uso y entendimiento de las variables influyentes. Según Ligdi “Al considerar los ajustes lineales dentro de un espacio de mayor dimensión construido con estas funciones básicas, el modelo tiene la flexibilidad de adaptarse a una gama de datos mucho más amplia.” (Gonzalez, 2019).

Para los modelos económicos en el sector energético se contempla el costo de nivelado la energía, es un indicador para comparar diferentes alternativas energéticas, este provee del costo energético unitario sobre el tiempo de vida del proyecto, la suma de todos los gastos de la vida útil del proyecto dividido sobre la energía producida en este mismo horizonte de tiempo.

$$LCOE = \frac{NP V_{\text{costos}}}{NPE}$$

(Chaustre Celis, 2023).

En términos de costos producir un kilo de hidrógeno gris cuesta entre CO\$3881,07 y CO\$11603,62; producir la misma cantidad de hidrógeno azul cuesta CO\$7128,50 y CO\$18613,32 y de hidrógeno verde CO\$17821,26 y CO\$47523,36 por kilo. (Colorado, 2023). Por lo que a términos del 2030 puede llegar a costar CO\$15841 el kilo.

Las políticas y regulaciones son muy importantes para la transición energética en Colombia por lo que la ley 1715 del 2014, según Min. Energía “las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) como aquellos recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleados o son utilizados de manera marginal y no se comercializan ampliamente.” (Ministerio de Minas y Energía, 2024). De esta manera fuentes no convencionales ganan protagonismo con incentivos para el impulso del desarrollo energético en el país.

Hay que resaltar que la ley 2099 de 2021 “por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones.” (Función Pública, 2021) promueve el desarrollo y uso de las fuentes renovables en el sistema energético nacional. Impulsando de esta manera la transición energética del país.

Para el hidrógeno en Colombia hay un proyecto en marcha que busca fomentar la demanda de hidrógeno de bajas emisiones en la comercialización y distribución de gas natural como servicio público a través de la inyección de al menos 5% de Hidrógeno respecto al volumen total comercializado o distribuido para el año 2030 en la infraestructura existente de gas natural. (Suárez, 2024). Es una gran noticia que fomentará más su producción y abrirá nuevas oportunidades de negocio y abastecimiento en Colombia.

Para la evaluación de la viabilidad financiera y técnica se realizará una simulación del funcionamiento de una microrred con software especializado como MATLAB y bibliotecas open

source de simulación energética con Python. Para entrenar el modelo de aprendizaje automático se utilizará **Scikit-Learn** que permitan simular la toma de decisiones en el control de la producción de hidrógeno verde en una microrred.

El objetivo es simular las condiciones climáticas, el funcionamiento de una microrred de hidrógeno verde y una fuente principal para esa producción como un sistema fotovoltaico. De esta manera con el modelo entrenado tomar decisiones estratégicas que optimicen los procesos de producción.

Conveniencia de la investigación

Los beneficios que traerá la investigación son las siguientes:

- Mayor eficiencia en la producción de hidrógeno verde: El Sistema de Gestión de Energía basado en modelos de regresión polinómica permitirá optimizar la producción de hidrógeno verde en tiempo real.
- Reducción de costos: La eficiencia en el sistema para la producción de hidrógeno verde se representará en reducción de costos operativos (principalmente).
- Respaldo de energía: Servir como respaldo en caso de cortes de energía en la red principal.
- Sostenibilidad: Contribuir a una transición energética más sostenible y menor impacto ambiental contaminante.

El hidrógeno verde es una tecnología emergente y en fase de exploración a nivel industrial en muchos países, por lo que su costo actual es 2,5 veces más caro que el gris (Grupo Acideka, 2022), pero su potencial es prometedor y ayudará a contribuir con el objetivo de cero emisiones netas para el 2050, recortar las emisiones de gases de efecto invernadero, acercándose a un posible emisiones cero y la transición energética es la apuesta, reemplazando combustibles fósiles por fuentes renovables (Enel X, 2024a).

Finalmente, el valor teórico de este proyecto es desarrollar con base metodológica, evaluar la integración de dos tecnologías de vanguardia que permita ser una referencia para futuros proyectos que estudien esta temática.

Metodología

Primer nivel

Enfoque

Se considera el enfoque híbrido para el proyecto, ya que se enfoca en la definición de una guía base para evaluar técnicamente la viabilidad de implementar un sistema de gestión de energía basado en modelos de regresión polinómica, de esta manera permitirá cualificar las diferentes variables clave para simular y su impacto en la optimización y eficiencia de producción de hidrógeno verde, proporcionando resultados objetivos que faciliten evaluar los cambios en los costos y la eficiencia del sistema tras la implementación del modelo de aprendizaje automático. Y desde el punto de vista cuantitativo, se registran los resultados de las simulaciones realizadas, recopilando los datos que permitan determinar que variables influyen en la optimización de producción de hidrógeno verde.

Estos componentes cualitativos y cuantitativos son muy importantes, respecto a la variable eficiencia juega un papel vital porque para la producción de hidrógeno verde, requiere una alta inversión en energía (Editorial La República, 2024), por lo que optimizar el sistema en una microrred permite un ahorro en términos de costos operativos y esfuerzo de producción. En consecuencia, el rendimiento de la producción de hidrógeno verde será mayor.

Los costos en la producción de hidrógeno verde son altos y no permiten aún ser totalmente competitivos, principalmente con fuentes generados por gas natural o carbón. (García Bernal, 2021). Implementar tecnologías de vanguardia en la producción de hidrógeno verde,

principalmente para la optimización de procesos, acercará esta forma de generación de energía renovable a un mercado más competitivo y abrirá oportunidades para que zonas rurales puedan acceder a estas tecnologías.

Alcance

Se recolectarán datos y variables esenciales en un solo punto en el tiempo, por lo que se optará por un diseño transversal que permita describir las características tras la simulación inicial y el desarrollo de los algoritmos base del modelo de regresión polinomial para que un estudio posterior determine los impactos inmediatos en términos de eficiencia y costos operativos. Este diseño es adecuado para este proyecto porque su ejecución es más rápida e implica un menor coste económico (Morales, 2020).

Diseño de la investigación

Es un diseño correlacional y descriptivo que describirá las relaciones y correlaciones entre la implementación de modelo de regresión polinomial, y los cambios observados en la eficiencia y los costos del sistema. Y no experimental, ya que habrá manipulación directa de las variables más allá de la implementación del modelo de aprendizaje automático que dejen una definición preliminar de los estados pre-implementación.

Definición de variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones
Eficiencia de Producción	Relación entre la cantidad de energía utilizada y el hidrógeno producido.	Cantidad de hidrógeno producido por unidad de energía consumida, antes de la implementación del modelo regresión polinomial	Técnica
Tiempo de Producción	El tiempo necesario para producir una	Medido en horas de los periodos antes de la implementación del	Técnica

	cantidad determinada de hidrógeno.	modelo de regresión polinomial	
Potencias producidas	Potencia producida kW en un tiempo determinado	Parametrización de variables en condiciones específicas de la microrred, determinar la potencia producida kW	Técnica
Estado de carga de batería	Uso de batería % en el proceso de producción de hidrógeno	En un periodo aproximado de 167 determinar el estado de carga de la batería	

Tabla 1. Definición de variables. Elaboración propia

Los datos iniciales para el desarrollo de la simulación son los siguientes:

- Técnicos del sistema:
 - Capacidad de producción
 - Eficiencia de electrólisis
 - Datos de consumo energético
- Entrada de energía:
 - Fuente de energía: Tipo solar, disponibilidad del sol.
- Ambientales y geográficos:
 - Condiciones climáticas: Condiciones ambientales, datos del clima que afecten el rendimiento del sistema.
 - Ubicación geográfica
- Parámetros de simulación
 - Rendimientos esperados: Rendimientos teóricos basados en estudios o simulaciones previas

Y los instrumentos de recolección de información son:

- Simulaciones computacionales: Para simular tres escenarios con diferentes condiciones y recopilar datos iniciales
- Definición del modelo de aprendizaje automático para las simulaciones.

Población y muestra

La población para el proyecto son todas las operaciones simuladas del sistema de producción de hidrógeno verde en una microrred durante un periodo determinado, y cada una incluye la información sobre el consumo de energía, la producción de hidrógeno, los costos de operación y mantenimiento, y las tasas de fallo asociadas a cada uno, es decir, cualquier configuración operativa que el sistema pueda alcanzar bajo diferentes condiciones de entrada simuladas.

El número de individuos o unidades de observación serían 3 simulaciones con diferentes configuraciones.

Tipo de muestreo elegido

Se optará por un muestreo no probabilístico por conveniencia, esto implica que las muestras de la población se seleccionan solo porque están convenientemente disponibles y son fáciles de reclutar (Ortega, 2018). Se ajusta convenientemente al desarrollo de simulación delimitadas en 3 bajo diferentes recursos y con tiempos disponibles (Configuración A, B y C).

Tamaño de la muestra

Se definen 3 ciclos operativos del sistema, por lo que cada uno representa entre 167 y 180 horas de operación, por lo que permitirá obtener una visión general de los datos de potencia producida, masa de hidrógeno genera y estado de carga de batería.

Segundo nivel

Selección de métodos o instrumentos para recolección de información

a. *Simulación Computacional:*

- **Descripción:** Se utilizarán simulaciones computacionales para generar datos operativos del sistema de producción de hidrógeno, estas simulaciones se basarán en modelos matemáticos que representan el comportamiento físico y químico del sistema bajo distintas condiciones según los parámetros de configuración
- **Validación:** Uso de modelos probados en investigaciones relacionadas con la producción de hidrógeno verde para una mayor precisión relevancia de la simulación.
- **Elementos Funcionales:** El modelo incluirá componentes como la capacidad inicial de la batería, voltaje nominal de la batería, perfil solar, temperatura.

b. *Software modelos:*

- **Descripción:** Lenguaje de programación Python se utilizará para el desarrollo de modelos de aprendizaje automático como la regresión polinomial. Biblioteca *Scikit-learn* que proporciona implementaciones para la regresión polinomial.
- **Desarrollo:** Estructura preliminar de los componentes para el entrenamiento del modelo con tres escenarios, para el desarrollo futuro de entrenamiento con datos históricos representativos.
- **Elementos Funcionales:** Algoritmos de aprendizaje automático como regresión polinomial para modelar y predecir comportamientos del sistema bajo diferentes escenarios.

Estos instrumentos permitirán evaluar los diferentes escenarios simulados, obteniendo resultados mejor desarrollados que respondan a la pregunta de investigación y alcancen los objetivos definidos.

Técnicas de análisis de datos

Instrumento	Técnica de Análisis	Descripción
Simulaciones Computacionales	Estadísticas Descriptivas	Se utilizará para resumir y describir los datos generados por las simulaciones
Software de Análisis con Python	Aprendizaje automático (Regresión polinomial)	Se desarrollará una base para modelar y predecir los cambios en la eficiencia del sistema bajo diferentes condiciones operativas, así como para optimizar los parámetros del sistema a futuro

Tabla 2. Técnicas de análisis de datos. Elaboración propia

Entrevistas a expertos

Se definieron preguntas de validación con expertos. El perfil del experto consultado es el siguiente:

Ingeniero Rafael Ernesto Varón, docente de maestría en la universidad EAN, con gran trayectoria en el sector energético y experiencia como consultor, gestor de proyectos y asesor en el Ministerio de Minas y Energías.

De acuerdo con los objetivos propuestos y en la búsqueda de responder a la pregunta de investigación se definieron las siguientes preguntas de validación:

- ¿Considera que la optimización de la producción de hidrógeno verde en microrredes es una prioridad relevante en el campo de las energías renovables? ¿Por qué?

- ¿Qué opinión tiene sobre las variables de configuración seleccionadas (de configuración y resultados) para evaluar la producción de hidrógeno verde? ¿Hay alguna variable adicional que recomendaría incluir?
- ¿Cuáles considera que son los principales desafíos técnicos en la implementación de un sistema de gestión de energía (EMS) para la optimización de la producción de hidrógeno verde en microrredes?
- ¿Cree que la optimización de la producción de hidrógeno verde en una microrred puede resultar en ahorros significativos en costos operativos?

Descripción del modelo de simulación micro red de hidrógeno verde

Para la simulación de la micro red en **Simulink** se requieren los siguientes datos parametrizables:

Vectores de propiedades del hidrógeno

- **Temperatura:** Vector de temperaturas en Kelvin.
- **Entalpía:** Vector de entalpía en kJ/kg, crucial para el análisis energético del hidrógeno en procesos como la electroquímica y la termodinámica de la producción de hidrógeno verde.
- **Viscosidad:** Viscosidad en s* μ Pa, afectando cómo se comporta el hidrógeno en tuberías, electrolizadores y otros componentes.
- **Conductividad térmica:** Conductividad en mW/kg/K, determina la eficiencia de transferencia de calor en procesos de almacenamiento y generación de hidrógeno.
- **Capacidad calorífica:** Capacidad calorífica en kJ/kg/, calcula los cambios de energía térmica en el hidrógeno durante los procesos de calentamiento o enfriamiento.

Arreglo solar

- **Vector de tiempo:** Tiempos en segundos a lo largo del día
- **Perfil solar:** Producción de energía solar correspondiente a cada tiempo en W/m^2 .
- **Temperatura de simulación:** En grados centígrados.

Unidad de electrólisis

- **Parámetros del electrolizador:**
 - **Dimensiones de la placa:** Dimensiones en cm, representan el tamaño físico de las placas del electrolizador.
 - **Número de pares de electrodos:** Indica el número de pares de electrodos en el electrolizador (por par ánodo y cátodo).
 - **Número de celdas:** número total de celdas en el electrolizado, dónde se da la reacción de electrólisis.
 - **Vector de temperaturas:** temperaturas de operación en Kelvin (K) para el electrolizador.
 - **Vector de eficiencias:** Eficiencias correspondientes a las temperaturas de operación en unidades pu (por unidad).
 - **Área de membrana:** Área total de la membrana del electrolizador en cm^2
 - **Espesor de membrana:** Espesor en cm, puede afectar la resistencia interna del electrolizador y su eficiencia.
 - **Resistencia:** Resistencia eléctrica interna del electrolizador en ohmios.
 - **Resistencia de calefacción:** Resistencia del sistema de calefacción que mantiene la temperatura operativa adecuada en Ohm.
- **Tanque de hidrógeno**
 - **Área del tanque de agua:** Área del tanque de agua en cm^2 .

- **Volumen del tanque de hidrógeno:** Volumen en cm^3 .
- **Temperatura de almacenamiento:** Temperatura a la cual se almacena el hidrógeno en el tanque en Kelvin.

Almacenamiento de energía

- **Parámetros de la batería:**
 - **Capacidad nominal:** Capacidad total de la batería, es decir, la cantidad máxima de carga eléctrica que puede almacenar (miliamperios-hora, mAh).
 - **Capacidad inicial:** Capacidad inicial de la batería al inicio de la simulación, para este contexto, se establece igual a la capacidad nominal, indicando que la batería está completamente cargada al comenzar.
 - **Capacidad Q1:** Es la mitad de la capacidad nominal de la batería, representa un punto de referencia, posiblemente utilizado en la lógica de control para gestionar la carga y descarga de la batería.
 - **Resistencia serie:** Resistencia interna de la batería, esta afecta la caída de voltaje dentro de la batería cuando se extrae o se suministra corriente Ohm.
 - **Voltaje nominal:** voltaje al cual la batería está diseñada para operar nominalmente.
 - **Voltaje U1:** Valor de referencia de voltaje, que puede representar un umbral mínimo operativo o una condición específica dentro del modelo de control.

Referencia de operación y parámetros del convertidor

- **Referencias de operación:** Corrientes de referencia en amperios, indica la corriente esperada o deseada que el electrolizador debe recibir para su funcionamiento óptimo.
- **Corrientes de salida del convertidor:** Corrientes de salida esperadas del convertidor, que convierte la energía de corriente continua generada por los paneles solares o

almacenada en las baterías a niveles adecuados para ser utilizadas por el electrolizador y otros componentes de la microrred.

- **Eficiencia del convertidor:** Indica qué tan eficazmente el convertidor puede convertir la energía de una forma a otra.

Parámetros de control

- **Tiempo de muestra:** Intervalo de tiempo en el que el sistema de control toma muestras de las variables de entrada en segundos.

En el **anexo I** se puede observar el modelo de la simulación.

Resultados

Guía de diseño y definición de variables

Se configuran tres escenarios **A, B y C** para obtener diferentes registros en condiciones diferentes:

Configuración	A	B	C
Perfil solar en tiempo	24 H	24 H	24 H
Irradiancia solar (W/m ²) (watts por metro cuadrado)	Min 500 Max 900	Min 300 Max 800	Min 600 Max 1040
Temperatura paneles (°C)	18	22	14
Número de celdas en el electrolizador	120	110	130
Resistencia eléctrica del electrolizador (Ohm)	0,3	0,28	0,32
Espesor de la membrana del electrolizador (cm)	2	2	2
Capacidad nominal de la batería en amperios-hora (Ah)	50000	52000	54000
Capacidad inicial de la batería (Ah)	50000	52000	54000
Resistencia serie interna de la batería (Ohm)	0,25	0,22	0,3

Voltaje nominal de la batería (V)	220	230	210
voltaje específico de operación (V)	210	220	200

Tabla 3. Tres escenarios para micro red hidrógeno verde. Elaboración propia

Escenario A

Eje X: Representa el transcurso del tiempo durante la simulación, cubriendo un período de aproximadamente 7 días y medio.

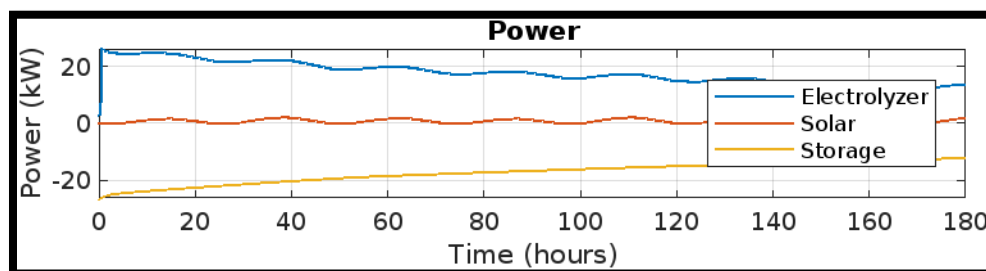


Ilustración 5. Potencia en kW para escenario A

Eje Y: El rango está entre -25 kW a 25 kW indicando la potencia generada o consumida por los diferentes componentes del sistema.

Se puede observar que la potencia del electrolizador (línea azul) se mantiene aproximadamente constante en torno a 20 kW con ligeras fluctuaciones indicando que el electrolizador está funcionando de manera continua, consumiendo una cantidad constante de energía para producir hidrógeno.

Respecto a la potencia generada (línea roja) por los paneles solares se mantiene en un nivel bajo, cercano a 0 kW con pequeñas fluctuaciones, esto se debe a la parametrización del escenario.

En la parte del almacenamiento (línea amarilla) está indicando que el sistema de almacenamiento está cargando continuamente, esa potencia inicial es cercana a los 0 kW y

aumenta progresivamente, esto sugiere que el almacenamiento está recogiendo el exceso de energía generada para uso futuro.

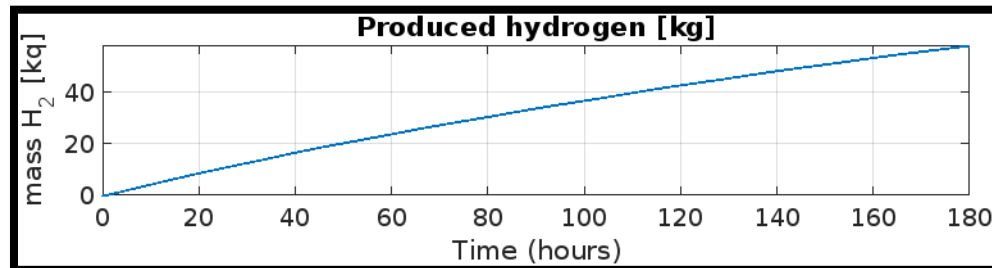


Ilustración 6. Producción de hidrógeno escenario A

Eje Y: Masa de hidrógeno producido e indica la cantidad total de hidrógeno producido por el sistema a lo largo del tiempo, por lo que después de las 180 horas se ha producido aproximadamente 50kg de hidrógeno.

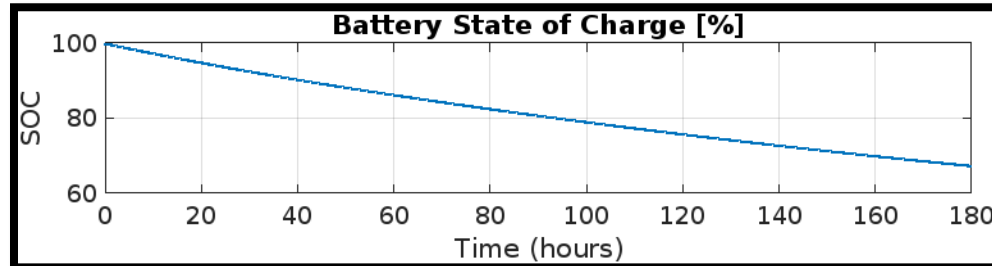


Ilustración 7. Estado de carga de la batería escenario A

Eje Y: Estado de carga de la batería con un rango desde 60% a 100%.

La batería comienza con un SOC del 100%, indicando que está completamente cargada al inicio de la simulación, a medida que el tiempo avanza se observa una reducción aproximadamente el 65%. Indica que la batería se está descargando de manera constante a lo largo del tiempo, lo que quiere decir es que la energía almacenada en la batería se está utilizando para alimentar el electrolizador u otras cargas en el sistema.

Teniendo en cuenta lo anterior, que la generación solar no es suficiente para recargar la batería durante el período de simulación, por lo que la optimización del sistema es muy importante para mejorar la producción de hidrógeno.

En el **anexo C** se puede observar la combinación de cada variable simulada con la configuración del escenario A. Respecto al analizador lógico en el **anexo D** se toman dos variables, la cantidad de hidrógeno producido (en kg) y el estado de carga de la batería (en %) a lo largo del tiempo, medido en segundos, se delimita a aproximadamente 167 horas (equivalente a 600000 segundos) con los siguientes valores de cada variable:

- Cantidad de Hidrógeno Producido: **55,35 kg**
- Estado de Carga de la Batería: **69,1%**.

Escenario B

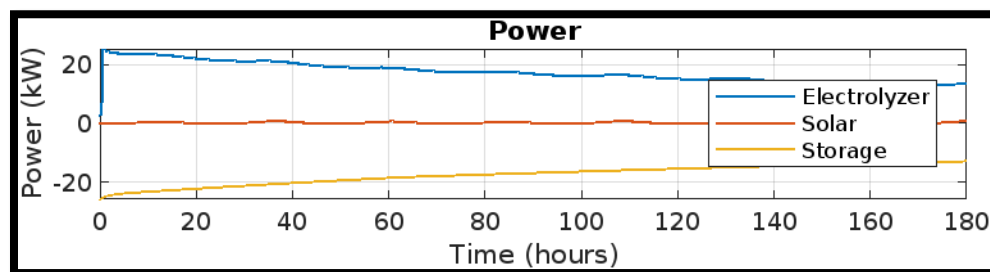


Ilustración 8. Potencia en kW para escenario B

Eje Y: Las características son similares que el escenario A

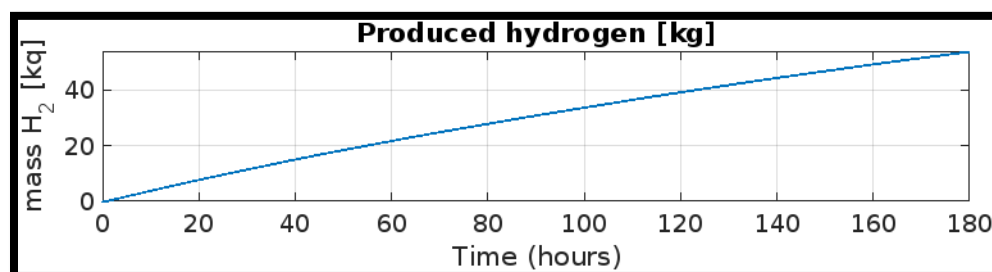


Ilustración 9. Producción de hidrógeno escenario B

Se puede observar las mismas características del escenario A por lo que la parametrización de este escenario no tiene un impacto significativo en la producción de hidrógeno verde.

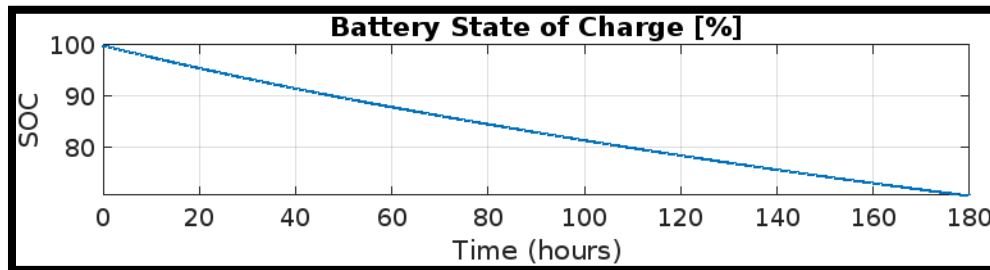


Ilustración 10. Estado de carga de la batería escenario B

En comparación al escenario A, la generación solar parece ser más estable y suficiente para mantener una menor tasa de descarga de la batería.

En el **anexo E** se encuentra la combinación de estas variables.

Para el **anexo F** los valores de cada variable son:

- Cantidad de Hidrógeno Producido: **51,06 kg**
- Estado de Carga de la Batería: **72,2%**.

Escenario C

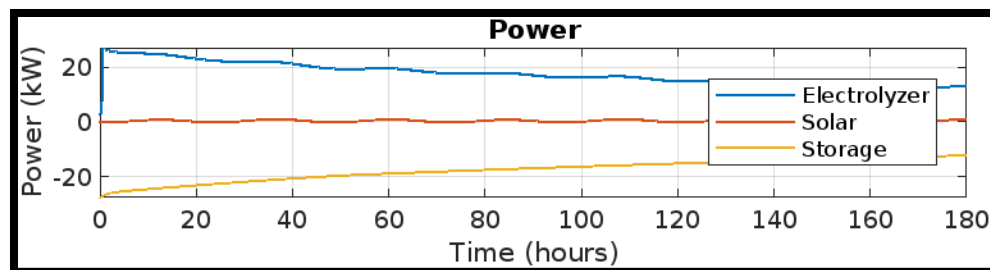


Ilustración 11. Potencia en kW para escenario C

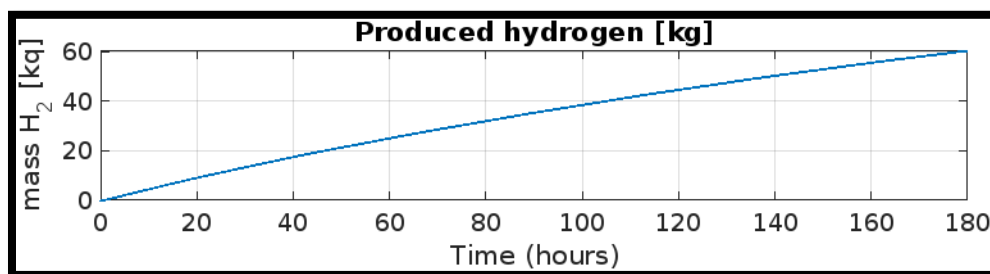


Ilustración 12. Producción de hidrógeno escenario C

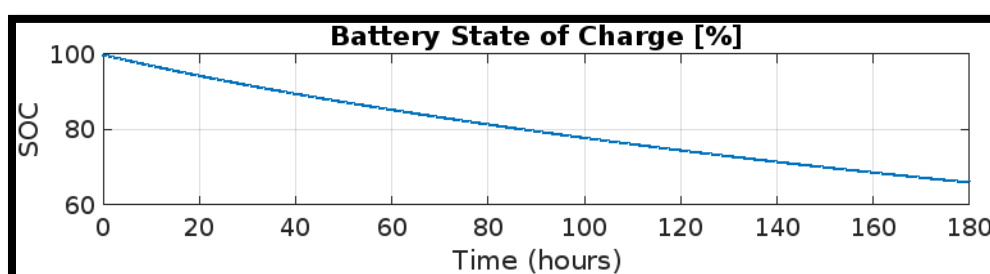


Ilustración 13. Estado de carga de la batería escenario C

En el **anexo G** se encuentra la combinación de estas variables.

Para el **anexo H** los valores de cada variable son:

- Cantidad de Hidrógeno Producido: **57,47 kg**
- Estado de Carga de la Batería: **67,88%**.

En el **anexo J** se encuentra el enlace de los archivos base de simulación para los tres escenarios propuestos.

Guía modelo de regresión polinomial e implementación

Para el entrenamiento y evaluación del modelo de regresión polinómica (Ver ejemplo en **anexo B**), se establecen las siguientes variables:

Variables de configuración

- Irradiancia solar mínima y máxima (W/m^2)
- Temperatura de los paneles ($^{\circ}C$)
- Número de celdas en el electrolizador
- Resistencia eléctrica del electrolizador (Ohm)
- Espesor de la membrana del electrolizador (cm)
- Capacidad nominal de la batería (Ah)
- Capacidad inicial de la batería (Ah)
- Resistencia serie interna de la batería (Ohm)
- Voltaje nominal de la batería (V)
- Voltaje específico de operación (V)

Variables de resultados

- Potencia generada (kW)
- Masa de hidrógeno producido (kg)
- Estado de carga de la batería (%)

Paso 1: Importar librerías

```
# Importa todos los módulos necesarios
import numpy as np
import pandas as pd
from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures, StandardScaler
from sklearn.linear_model import Ridge
from sklearn.metrics import mean_squared_error
from sklearn.model_selection import train_test_split, cross_val_score
```

Paso 2: Preparar los Datos.

Datos estructurados en un DataFrame de los datos de tres simulaciones.

```
data = pd.DataFrame({
    'irrad_solar_min': [500, 300, 600],
    'irrad_solar_max': [900, 800, 1040],
    'temp_paneles': [18, 22, 14],
    'num_celdas': [120, 110, 130],
    'resist_electrolizador': [0.3, 0.28, 0.32],
    'espesor_membrana': [2, 2, 2],
    'capacidad_nominal_bateria': [50000, 52000, 54000],
    'capacidad_inicial_bateria': [50000, 52000, 54000],
    'resist_serie_bateria': [0.25, 0.22, 0.3],
    'voltaje_nominal_bateria': [220, 230, 210],
    'voltaje_operacion': [210, 220, 200],
    # Potencia generada en kW
    'potencia_generada': [120, 110, 115],
    # Masa de hidrógeno producido en kg
    'masa_hidrogeno': [500, 480, 490],
    # Estado de carga de la batería en %
    'estado_carga_bateria': [90, 85, 88]
})
```

Se definen las variables de entrada (x) y las variables de salida (y)

```
X = data[['irrad_solar_min', 'irrad_solar_max', 'temp_paneles', 'num_celdas',
    'resist_electrolizador', 'espesor_membrana', 'capacidad_nominal_bateria',
    'capacidad_inicial_bateria', 'resist_serie_bateria', 'voltaje_nominal_bateria',
    'voltaje_operacion']]
Y_potencia = data['potencia_generada']
Y_masa = data['masa_hidrogeno']
Y_estado_carga = data['estado_carga_bateria']
```

Estandarización de los datos, crea un objeto *StandardScaler* para estandarizar los datos.

```
scaler = StandardScaler()
X_scaled = scaler.fit_transform(X)
```

Se dividen los datos en conjuntos de entrenamiento y prueba, se dividen en conjuntos de entrenamiento (80%) y prueba (20%) para cada variable objetivo.

```
X_train, X_test, Y_potencia_train, Y_potencia_test = train_test_split(X_scaled, Y_potencia,
test_size=0.2, random_state=42)
X_train, X_test, Y_masa_train, Y_masa_test = train_test_split(X_scaled, Y_masa,
test_size=0.2, random_state=42)
X_train, X_test, Y_estado_carga_train, Y_estado_carga_test = train_test_split(X_scaled,
Y_estado_carga, test_size=0.2, random_state=42)
```

Paso 3: Crear y Entrenar el Modelo de Regresión Polinómica.

La función devuelve el modelo entrenado, el transformador polinómico y el error cuadrático medio (MSE).

```
def entrenar_modelo_polinomico(X_train, Y_train, X_test, Y_test, grado=2, alpha=1.0):
    poly = PolynomialFeatures(degree=grado)
    X_train_poly = poly.fit_transform(X_train)
    X_test_poly = poly.transform(X_test)
    modelo = Ridge(alpha=alpha)
    modelo.fit(X_train_poly, Y_train)
    Y_pred_train = modelo.predict(X_train_poly)
    Y_pred_test = modelo.predict(X_test_poly)
    mse_train = mean_squared_error(Y_train, Y_pred_train)
    mse_test = mean_squared_error(Y_test, Y_pred_test)
    return modelo, poly, mse_train, mse_test
```

Entrena modelos de regresión polinómica para cada variable de salida usando la función definida anteriormente.

```
modelo_potencia, poly_potencia, mse_potencia_train, mse_potencia_test =
entrenar_modelo_polinomico(X_train, Y_potencia_train, X_test, Y_potencia_test)
modelo_masa, poly_masa, mse_masa_train, mse_masa_test =
entrenar_modelo_polinomico(X_train, Y_masa_train, X_test, Y_masa_test)
modelo_estado_carga, poly_estado_carga, mse_estado_carga_train, mse_estado_carga_test
= entrenar_modelo_polinomico(X_train, Y_estado_carga_train, X_test, Y_estado_carga_test)
```

Imprime los errores cuadráticos medios para los conjuntos de entrenamiento y prueba de cada variable de salida.

```
print("MSE Potencia Generada (Train):", mse_potencia_train, "Test:", mse_potencia_test)
print("MSE Masa de Hidrógeno (Train):", mse_masa_train, "Test:", mse_masa_test)
print("MSE Estado de Carga de la Batería (Train):", mse_estado_carga_train, "Test:",
mse_estado_carga_test)
```

Paso 4: Evaluar el Modelo

Se define una nueva configuración de entrada

```
nueva_configuracion = np.array([[500, 900, 18, 120, 0.3, 2, 50000, 50000, 0.25, 220, 210]])
nueva_configuracion_scaled = scaler.transform(nueva_configuracion)
nueva_configuracion_poly = poly_potencia.transform(nueva_configuracion_scaled)

pred_potencia = modelo_potencia.predict(nueva_configuracion_poly)
pred_masa = modelo_masa.predict(nueva_configuracion_poly)
pred_estado_carga = modelo_estado_carga.predict(nueva_configuracion_poly)

print("Predicción Potencia Generada (kW):", pred_potencia)
print("Predicción Masa de Hidrógeno (kg):", pred_masa)
print("Predicción Estado de Carga de la Batería (%):", pred_estado_carga)
```

Integración del modelo de regresión polinómica en simulación

Paso 1: Realizar el entrenamiento del modelo cómo se estableció en el anterior apartado.

Posteriormente se debe guardar el modelo entrenado y el transformador polinómico para ser implementados en **Simulink**.

Paso 2: Guardar el modelo y el transformador en archivos utilizando la librería **joblib**

```
import joblib

# Guarda el modelo y el transformador para potencia generada
joblib.dump(modelo_potencia, 'modelo_potencia.pkl')
joblib.dump(poly_potencia, 'poly_potencia.pkl')

# Guarda el modelo y el transformador para masa de hidrógeno
```

```
joblib.dump(modelo_masa, 'modelo_masa.pkl')
joblib.dump(poly_masa, 'poly_masa.pkl')

# Guarda el modelo y el transformador para estado de carga de la batería
joblib.dump(modelo_estado_carga, 'modelo_estado_carga.pkl')
joblib.dump(poly_estado_carga, 'poly_estado_carga.pkl')
```

Paso 3: Integración del modelo de Python en Simulink con el uso de S-Function

Función Principal de la S-Function, maneja diferentes *flags* para inicialización, cálculo de derivadas y generación de salidas.

```
function [sys, x0, str, ts] = poly_regression_s_function(t, x, u, flag)
    switch flag
        case 0
            [sys, x0, str, ts] = mdlInitializeSizes;
        case 1
            sys = mdlDerivatives(t, x, u);
        case 3
            sys = mdlOutputs(t, x, u);
        case {2, 4, 9}
            sys = [];
        otherwise
            error(['Unhandled flag = ', num2str(flag)]);
    end
end
```

Se define los tamaños de los vectores de estados, entradas y salidas. Aquí, se especifican 11 entradas y 3 salidas.

```
function [sys, x0, str, ts] = mdlInitializeSizes
    sizes = simsizes;
    sizes.NumContStates = 0;
    sizes.NumDiscStates = 0;
    sizes.NumOutputs = 3; % Número de salidas: potencia, masa, estado de carga
    sizes.NumInputs = 11; % Número de entradas: las variables de configuración
    sizes.DirFeedthrough = 1;
    sizes.NumSampleTimes = 1;
    sys = simsizes(sizes);
    x0 = [];
```

```
str = [];  
ts = [0 0];  
end
```

Generación de las salidas

```
function sys = mdlOutputs(t, x, u)  
    % Cargar los modelos de Python  
    persistent model_potencia model_masa model_estado_carga poly_potencia  
    poly_masa poly_estado_carga;  
    if isempty(model_potencia)  
        model_potencia = py.joblib.load('modelo_potencia.pkl');  
        poly_potencia = py.joblib.load('poly_potencia.pkl');  
        model_masa = py.joblib.load('modelo_masa.pkl');  
        poly_masa = py.joblib.load('poly_masa.pkl');  
        model_estado_carga = py.joblib.load('modelo_estado_carga.pkl');  
        poly_estado_carga = py.joblib.load('poly_estado_carga.pkl');  
    end  
  
    % Convertir las entradas a una lista de Python  
    inputs = num2cell(u);  
    inputs = py.list(inputs);  
  
    % Transformar las entradas  
    inputs_poly_potencia = poly_potencia.transform(inputs);  
    inputs_poly_masa = poly_masa.transform(inputs);  
    inputs_poly_estado_carga = poly_estado_carga.transform(inputs);  
  
    % Predecir las salidas usando los modelos  
    pred_potencia = model_potencia.predict(inputs_poly_potencia);  
    pred_masa = model_masa.predict(inputs_poly_masa);  
    pred_estado_carga = model_estado_carga.predict(inputs_poly_estado_carga);  
  
    % Convertir las predicciones a formato MATLAB  
    potencia_generada = double(pred_potencia{1});  
    masa_hidrogeno = double(pred_masa{1});  
    estado_carga_bateria = double(pred_estado_carga{1});  
  
    sys = [potencia_generada; masa_hidrogeno; estado_carga_bateria];  
end
```

Paso 4: Configuración de la simulación.

- Adicionar bloque *S-Function* al modelo de microred de hidrógeno verde.
- Configurar el bloque *S-Function* para utilizar el archivo MATLAB que has creado.
- Conecta las entradas del bloque *S-Function* a las variables de configuración de la simulación.
- Conectar las salidas del bloque *S-Function* a los componentes que representan la potencia generada, la masa de hidrógeno producida y el estado de carga de la batería.

Validez y confiabilidad

Validación con expertos

Validación cualitativa de la guía a proponer: Entrevista virtual realizada el 31 de mayo del 2024, 8:30 p.m. Respuestas del ingeniero Rafael Varón:

¿Considera que la optimización de la producción de hidrógeno verde en microrredes es una prioridad relevante en el campo de las energías renovables? ¿Por qué?

Respuesta: Es de suma relevancia, es el energético que va a revolucionar el mercado de la energía, el hidrógeno va a tomar el espacio que en este momento tienen los hidrocarburos. Cómo es un energético de gran impacto, todo lo que se esté haciendo a nivel de investigación en procura de ver su desarrollo es vital, a pesar de que no existe aún un mercado maduro actualmente, pero se dará con más plantas, iniciativas, más investigación, más información.

Cómo todo inicio sus costos son muy altos y la inversión de estos proyectos, no están viendo la parte de rentabilidad porque en principio no se ha creado el mercado, pero una vez se crea ahí se va a empezar a evaluar el costo, entonces sí es un energético relevante porque es revolucionario.

¿Qué opinión tiene sobre las variables de configuración seleccionadas (de configuración y resultados) para evaluar la producción de hidrógeno verde? ¿Hay alguna variable adicional que recomendaría incluir?

Respuesta: El costo de operación, el color del hidrógeno (gris, azul y verde), pero el elemento base es el recurso agua, es decir, el costo de generación del hidrógeno dependiendo de la fuente. Es importante analizar el costo nivelado del hidrógeno, así como existe el LCOE (Coste normalizado de la energía), así va a suceder con el hidrógeno, teniendo en cuenta aspectos ambientales, normativos, de transporte, almacenamiento. Los proyectos piloto a nivel latinoamericano pueden dar más información de esas variables a nivel general.

(Se nombran las variables de configuración y resultados propuestos en el documento)

La producción de hidrógeno va a ser por hidrólisis alimentado por un sistema fotovoltaico, pueden salir infinidad de sistemas, ya que puede ser alimentado con otros sistemas de generación. Lo primero es entender cada proceso de sus elementos constitutivos, por ejemplo, para este sistema, irradiancia, una corriente, una tensión, potencia de los paneles y el número de estos según sus especificaciones técnicas, eficiencia de los paneles porque eso es lo que va a alimentar el sistema de la electrólisis, estas variables son elementales para la parte de la energía eléctrica, para la alimentación del sistema de producción del hidrógeno.

Ahora la parte del electrolizador, ¿Cuál es la fuente de abastecimiento del recurso? Mar, calidad del agua, de dónde viene ese recurso. Es importante el aseguramiento hídrico y los costos implícitos de llevar esa agua al electrolizador (El mismo proceso del electrolizador tiene un costo dependiendo de la escala y la cantidad producida), además tener en cuenta cómo lo voy a almacenar, por eso es clave validar con proyectos en marcha para entender mejor las variables. Las variables mencionadas, unas están ligadas al sistema fotovoltaico y otras al electrolizador, tener en cuenta el agua, es clave.

¿Cuáles considera que son los principales desafíos técnicos en la implementación de un sistema de gestión de energía (EMS) para la optimización de la producción de hidrógeno verde en microrredes?

Respuesta: Hay barreras tecnológicas, no hay suficientes proyectos para entender con detalle, importamos todos los equipos, es lo que pasaba hace algunos años con los equipos fotovoltaicos, ahora sucede con los electrolizadores. Otra barrera es la regulatoria, es decir no hay una regulación del hidrógeno, al momento solo hay una ruta del hidrógeno, pero hasta ahora es un paso para seguir, planes de acción para buscar desarrollar un mercado, pero aún es incipiente. La barrera del mercado es otro desafío que está muy ligado a la parte financiera, ya que está una fase inicial, las inversiones son mínimas, y la apuesta por invertir en este tipo de proyectos es altamente riesgosa, al momento su enfoque viene siendo más investigativo.

Ver lo que están haciendo otros países como Chile para evidenciar cómo están contrarrestando las barreras principalmente del mercado.

¿Cree que la optimización de la producción de hidrógeno verde en una microrred puede resultar en ahorros significativos en costos operativos?

Respuesta: Es evidente que cuando se analiza el hidrógeno con el potencial de mercado, va a estar ligado a su estructura de costos, es decir, quién oferta un hidrógeno más económico y sostenible, dos elementos clave. Un modelo de optimización es fundamental porque va a poder estructurar cómo se puede optimizar la producción del hidrógeno y cómo involucrar el proyecto de producción con la red eléctrica, por eso es clave entender los usos del hidrógeno, su propósito para entender al usuario final. Es importante entender para qué se va a utilizar el hidrógeno y a qué comunidad energética se está enfocando, se debe crear la necesidad del hidrógeno, como desplazar el uso de hidrocarburos, disminuir las emisiones de efecto

invernadero, la ruta del hidrógeno sirve como guía para entender con mayor detalle el propósito de su uso.

Discusión de resultados

- Se realizó una caracterización sobre la producción de hidrógeno verde en microrredes, definiendo su importancia e impacto en la disminución de GEI y transición energética, se definió el funcionamiento del proceso de electrólisis como proceso clave en la producción de hidrógeno verde y se establecieron los usos relevantes como propósito de su producción.
- Se identificaron las variables y parámetros clave que influyen en la producción de hidrógeno verde en microrredes con base a la literatura, simulación y verificación de expertos. Además, se consideraron factores climáticos y técnicos detallados para cada escenario (Configuración A, B y C).
- Se desarrolló una guía del proceso de simulación implementada, definiendo 3 parametrizaciones y simulándolas en *Simulink*, registrando los datos de cada uno. Adicionalmente se generó una guía base con un algoritmo preliminar del modelo de regresión polinomial para ser entrenado e implementado en cada simulación.
- Finalmente se validó con el experto sobre la evaluación técnica preliminar y así determinar su viabilidad y mejoras para una futura implementación.

Conclusiones

De los 4 objetivos específicos propuestos se concluye lo siguiente:

- *Caracterización sobre la producción de hidrógeno verde en microrredes:* Este proceso es una solución viable y sostenible para la generación de energía. por ejemplo, la integración de tecnologías renovables, como la energía solar, con la producción de

hidrógeno verde permite no solo el aprovechamiento eficiente de los recursos disponibles, sino también el almacenamiento y utilización de energía limpia de manera continua, además, contribuye significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y promueve la autosuficiencia energética.

- *Identificación de las variables y parámetros clave que influyen en la producción de hidrógeno verde en microrredes con base a la literatura, simulación y verificación de expertos:* La identificación de variables y parámetros clave, como la irradiancia solar, la temperatura de los paneles, la resistencia del electrolizador y las características de la batería, ha sido fundamental para comprender y optimizar la producción de hidrógeno verde en microrredes, adicionalmente, se ha determinado que estos factores tienen un impacto significativo en la eficiencia y la estabilidad del sistema.
- *Desarrollo de una guía del proceso de simulación implementada, definiendo 3 parametrizaciones y simulándolas en Simulink.:* Las simulaciones realizadas han permitido explorar diferentes escenarios operativos y evaluar el rendimiento del sistema bajo diversas condiciones, por lo que ha proporcionado valiosos insights sobre cómo ajustar los parámetros del EMS para optimizar la producción de hidrógeno verde.
- *Validación con el experto sobre la evaluación técnica preliminar:* El experto ha destacado la relevancia de las variables seleccionadas y ha corroborado los beneficios potenciales en términos de eficiencia y reducción de costos operativos

La evaluación técnica preliminar de un sistema de gestión de energía (EMS) basado en modelos de regresión polinómica para la optimización de la producción de hidrógeno verde en una microrred ha proporcionado varias conclusiones importantes, el estudio inicial ha permitido identificar la viabilidad técnica y el potencial impacto de su implementación:

- El modelo de regresión polinómica es una solución prometedora para la optimización de variables clave de la producción de hidrógeno verde, aunque esta evaluación técnica preliminar no ha incluido un análisis exhaustivo en términos de costos operativos, los análisis previos indican que el EMS tiene el potencial de reducir costos operativos a través de una gestión más eficiente de la energía.
- La implementación del EMS basado en modelos de regresión polinómica requiere una inversión inicial en tecnología y capacitación, sin embargo, los beneficios potenciales en términos de eficiencia y ahorro de costos pueden justificar esta inversión.
- La producción de hidrógeno verde utilizando energía solar contribuye significativamente a la descarbonización del suministro energético de la microrred apoyando los objetivos de sostenibilidad y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Recomendaciones para estudios futuros

Se recomienda realizar la continuación de esta evaluación técnica preliminar, siguiendo la guía desarrollada a lo largo del proyecto, con el entrenamiento del modelo incluyendo datos históricos de las variables estudiadas anteriormente y la implementación en los escenarios simulados para análisis técnicos y económicos completos, adicionalmente, se sugiere explorar la integración de tecnologías adicionales, como sistemas de almacenamiento de energía en baterías, para complementar el uso del hidrógeno verde.

Referencias

- Acciona. (s/f). *El hidrógeno verde: La energía del futuro clave en la descarbonización* | ACCIONA. Recuperado el 28 de abril de 2024, de <https://www.acciona.com/es/hidrogeno-verde/>
- AdminB. (2021, enero 26). ¿Que és la electrólisis? | Hidrógeno Verde la energía sostenible del futuro. IDEAGREEN. <https://ideagreen.es/hidrogeno-verde/que-es-la-electrolisis/>
- AES el Salvador. (2024). *Los desafíos del hidrógeno verde en Colombia: Hacia una transición energética sostenible* | AES Colombia. <https://www.aescol.com/es/blog/los-desafios-del-hidrogeno-verde-en-colombia-hacia-una-transicion-energetica-sostenible>
- BBVA. (2021, abril 13). *Descubre qué es el hidrógeno verde: Solución y desafío*. BBVA NOTICIAS. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/descubre-que-es-el-hidrogeno-verde-solucion-y-desafio/>
- BLK Media. (s/f). *Retos y desafíos del hidrógeno verde*. Recuperado el 28 de abril de 2024, de <https://www.blk.global/blog/retos-y-desafios-del-hidrogeno-verde>
- Cano Perdomo, P. M., & González Veloza, J. J. F. (2024). *Modelo Machine Learning para la estimación de valores de radiación solar en superficie, basado en registros satelitales y estaciones actinométricas en el departamento de vichada zona rural del municipio de Puerto Carreño*. Fundación Universitaria Los Libertadores. <https://repository.libertadores.edu.co/server/api/core/bitstreams/835c70ac-9d1f-41a7-a828-d287da5850ac/content>
- Castro, J. R. (2023, julio 25). Transformación digital para el escalado de la cadena de valor del hidrógeno verde—Conferencia para Plataforma enerTIC.org. *Plataforma enerTIC.org*. <https://enertic.org/transformacion-digital-para-el-escalado-de-la-cadena-de-valor-del-hidrogeno-verde/>

Chaustre Celis, J. A. (2023). *Modelo de negocios, viabilidad financiera y análisis de riesgo en proyectos de Hidrógeno Verde en el marco de la transición energética en Colombia* [Universidad de los Andes].

<https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/e00399cb-e05e-4e72-a3c7-ffed9f2306cf/content>

Colorado, E. L. R. (2023, octubre 13). *Estos son costos para la producción del hidrógeno verde, azul y gris fijados en 2023*. Diario La República.

<https://www.larepublica.co/especiales/hidrogeno-en-la-transicion/estos-son-los-costos-para-la-produccion-del-hidrogeno-verde-azul-y-gris-para-este-ano-segun-lo-estimado-por-bloombergnef-3727202>

Cruz, I. (2023). *GUÍA ESPECÍFICA DE TRABAJO SOBRE “Por qué la transición energética necesita a la inteligencia artificial?”* <https://www.programainvestiga.org/pdf/guias2023-2024/GuiaintroductorialaitemaPorquelatransicionenergeticaneceaalainteligenciaartificial.pdf>

Dametis. (2022). *¿Qué es un EMS (Sistema de Gestión de Energía)?* *Dametis*.

<https://www.dametis.com/es/mydametis/sistema-de-gestion-energetica-sge-todo-lo-que-necesitas-saber/>

Departamento Nacional de Planeación. (2023, julio 7). *El Plan Nacional de Desarrollo marca la ruta de la transición energética del país*.

https://www.dnp.gov.co:443/Prensa_/Noticias/Paginas/el-plan-nacional-de-desarrollo-marca-la-ruta-de-la-transicion-energetica-del-pais.aspx

Editorial La República. (2024, febrero 28). *Conozca las ventajas y desventajas en la producción de hidrógeno de bajas emisiones*. Diario La República.

<https://www.larepublica.co/especiales/hidrogeno-en-el-radar-de-colombia/ventajas-y-desventajas-en-la-produccion-de-hidrogeno-verde-3809794>

Enel. (2024). *El hidrógeno verde, un nuevo aliado para la descarbonización.*

<https://www.enel.com/es/nuestra-compania/historias/oportunidades-hidrogeno-verde>

Enel X. (2022, julio 22). *Así avanza la transición energética en Colombia.* Enel X.

<https://www.enelx.com/co/es/historias/avances-transicion-energetica-en-colombia>

Enel X. (2024a). *¿Qué es el objetivo Cero Emisiones Netas y cómo lograrlo?*

<https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/net-zero-meaning#:~:text=Alcanzar%20las%20cero%20emisiones%20netas%20para%20el%202050%20significar%20mantener,de%201%20C5%20B0C>

Enel X. (2024b). *¿Qué es una microrred?* [https://corporate.enelx.com/es/question-and-](https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/what-is-a-microgrid-and-how-does-it-work#:~:text=Una%20microrred%20es%20una%20red,de%20las%20microrredes%2020evitando%20as%20AD)

[answers/what-is-a-microgrid-and-how-does-it-](https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/what-is-a-microgrid-and-how-does-it-work#:~:text=Una%20microrred%20es%20una%20red,de%20las%20microrredes%2020evitando%20as%20AD)

[work#:~:text=Una%20microrred%20es%20una%20red,de%20las%20microrredes%2020evitando%20as%20AD](https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/what-is-a-microgrid-and-how-does-it-work#:~:text=Una%20microrred%20es%20una%20red,de%20las%20microrredes%2020evitando%20as%20AD)

Facultad de ingeniería. (2023). *Colombia puede liderar la transición energética que exige el planeta.* Universidad de los Andes.

<https://uniandes.edu.co/es/noticias/ingenieria/colombia-puede-liderar-la-transicion-energetica-que-exige-el-planeta>

Faster Capital. (2024, abril 20). *Regresión polinomial una herramienta poderosa para suavizar los datos.* FasterCapital. <https://fastercapital.com/es/contenido/Regresion-polinomial-una-herramienta-poderosa-para-suavizar-los-datos.html>

Fernández, J. (2024, febrero 29). *Bembibre se suma a un proyecto internacional para potenciar el hidrógeno verde en las zonas rurales.* La Nueva Crónica.

https://www.lanuevacronica.com/el-bierzo/bembibre-se-suma-proyecto-internacional-potenciar-hidrogeno-verde-en-zonas-rurales_152548_102.html

Flechas, J. (2022, marzo 17). *Conozca la importancia de la energía renovable en el país | LAUD*. <https://laud.udistrital.edu.co/medio-ambienteentrevista/conozca-la-importancia-de-la-energia-renovable-en-el-pais>

Función Pública. (2021). *Ley 2099 de 2021—Gestor Normativo—Función Pública*.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>

García Bernal, N. (2021). *Industria del hidrógeno verde: Costos de producción*.
https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32538/1/BCN___Hidrogeno_verde_Costos_de_produccion_Sept21.pdf

Gonzalez, L. (2019, enero 11). Regresión Polinomial—Teoría. *Aprende IA*.
<https://aprendeia.com/algoritmo-regresion-polinomial-machine-learning/>

Grupo Acideka. (2022). *Hidrógeno verde, ¿La solución para dejar de emitir CO2?*
<https://www.grupoacideka.com/2022/06/08/hidrogeno-verde-la-solucion-para-dejar-de-emitir-co2/>

iAgua, redaccion. (2022a, julio 20). *Necesidades de agua asociadas a la producción de hidrógeno* [Text]. iAgua; iAgua. <https://www.iagua.es/noticias/j-huesa-water-technology/necesidades-agua-asociadas-produccion-hidrogeno>

iAgua, redaccion. (2022b, octubre 5). *¿Qué es el hidrógeno verde?* [Text]. iAgua; iAgua.
<https://www.iagua.es/respuestas/que-es-hidrogeno-verde>

Iberdrola. (2024). *El hidrógeno verde: Una alternativa para reducir las emisiones y cuidar nuestro planeta*. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/hidrogeno-verde>

Joaquín Amat, R. (2017, febrero). *Métodos de regresión no lineal: Regresión polinómica, regression splines, smooth splines y GAMs*.

https://cienciadedatos.net/documentos/32_metodos_de_regresion_no_lineal_polinomica_splines_gams

Luo, L. (2023). *Polynomial Regression in Scikit-Learn*.

<https://kaggle.com/code/lxlz1986/polynomial-regression-in-scikit-learn>

Mathlab. (2024). *Simulación y diseño basado en modelos con Simulink*.

<https://la.mathworks.com/products/simulink.html>

Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (2022). *Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia*.

<https://www.mincit.gov.co/getattachment/minindustria/reindustrializacion-basada-en-energias-renovables/ruta-de-hidrogeno-de-colombia/hoja-de-ruta-del-hidrogeno-en-colombia/hoja-ruta-hidrogeno-colombia-2810.pdf.aspx>

Ministerio de Minas y Energía. (2024). *Fuentes No Convencionales de Energía Renovable—*

FNCER. <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/fuentes-no-convencionales-de-energ%C3%ADa-renovable-fncer/>

Morales, F. C. (2020, octubre 13). *Estudio transversal*. Economipedia.

<https://economipedia.com/definiciones/estudio-transversal.html>

Muñoz Fernández, J. A., Beleño Mendoza, W. A., & Díaz Consuegra, H. (2022). Análisis del potencial del uso de hidrógeno verde para reducción de emisiones de carbono en Colombia. *El Reventón Energético*, 57.

Nations, U. (2024). *Energías renovables: Energías para un futuro más seguro | Naciones*

Unidas. United Nations; United Nations. <https://www.un.org/es/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>

Ortega, C. (2018, junio 14). Muestreo no probabilístico: Definición, tipos y ejemplos.

QuestionPro. <https://www.questionpro.com/blog/es/muestreo-no-probabilistico/>

Parrilla, A., & Grau, A. (2022, mayo 27). *El hidrógeno verde, un acumulador energético para catapultar las renovables* | Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

<https://www.csic.es/es/actualidad-del-csic/el-hidrogeno-verde-un-acumulador-energetico-para-catapultar-las-renovables>

Planas, M. A., & Cárdenas, J. (2023). *Colombia estrena el Programa de Integración de Energías Renovables de los Climate Investment Funds en América Latina.*

<https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/colombia-estrena-el-programa-de-integracion-de-energias-renovables-de-los-climate-investment-funds-en-america-latina/>

Química.es. (2023, marzo 23). *Un método de aprendizaje automático acelera el descubrimiento de materiales energéticos verdes.* <https://www.quimica.es/noticias/1182531/un-metodo-de-aprendizaje-automatico-acelera-el-descubrimiento-de-materiales-energeticos-verdes.html>

Ruíz de Gauna, C. (2023, septiembre 25). Los desafíos del hidrógeno verde. *El Periódico de la Energía.* <https://elperiodicodelaenergia.com/los-desafios-del-hidrogeno-verde/>

Salazar, D. (2023). *Hidrógeno verde: ¿qué tan caro es producirlo y por qué esto podría cambiar al 2030?* Bloomberg Línea.

<https://www.bloomberglinea.com/latinoamerica/colombia/precios-del-hidrogeno-verde-hacen-prever-un-mejor-futuro-en-el-mercado-energetico/#:~:text=Por%20su%20parte%2C%20la%20producci%C3%B3n,contribuyan%20para%20generar%20esas%20eficiencias.>

santiagorodriguez6. (2023, mayo 1). *Financiación de proyectos de hidrógeno verde en Colombia.* Derecho del Medio Ambiente.

<https://medioambiente.uexternado.edu.co/financiacion-de-proyectos-de-hidrogeno-verde-en-colombia/>

Sostenibilidad. (2024). *¿Para qué sirve el hidrógeno verde?*

<https://www.sostenibilidad.com/desarrollo-sostenible/hidrogeno-verde-para-que-sirve/>

Suárez, H. (2024, marzo 16). *Ley del Hidrógeno en Colombia.*

<https://www.asuntoslegales.com.co/analisis/hemberth-suarez-lozano-2596363/ley-del-hidrogeno-en-colombia-3822357>

Zamora, M. (2023, noviembre 30). *¿Cómo está revolucionando la IA a las energías renovables?*

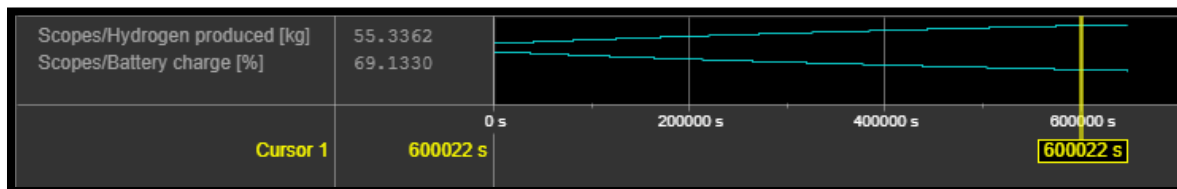
<https://oilchannel.tv/noticias/como-esta-revolucionando-la-ia-a-las-energias-renovables>

Anexo C: Gráfico unificado del escenario A



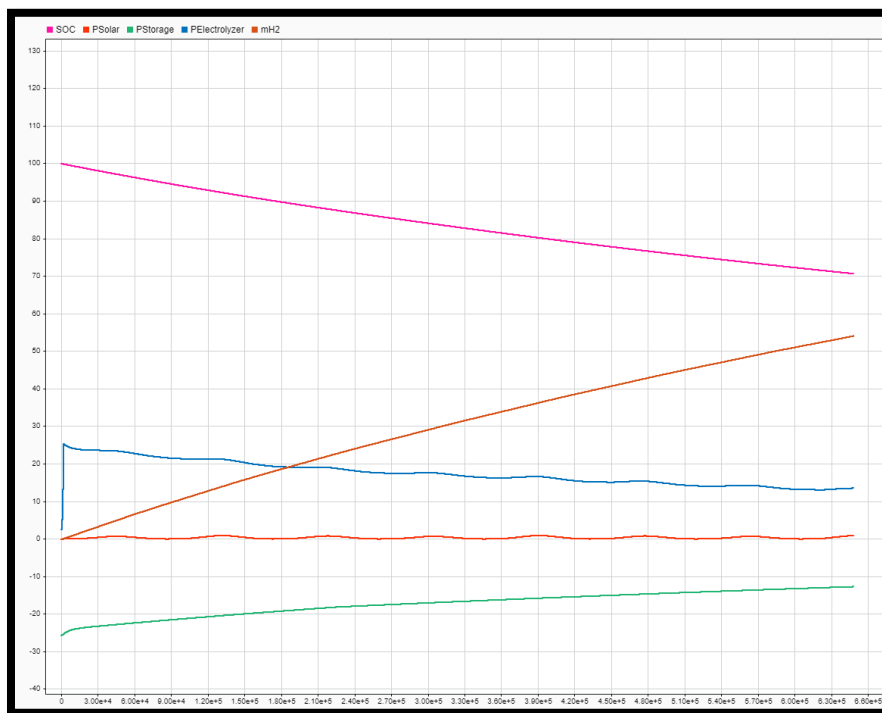
Elaboración propia en simulación

Anexo D: Analizador lógico escenario A



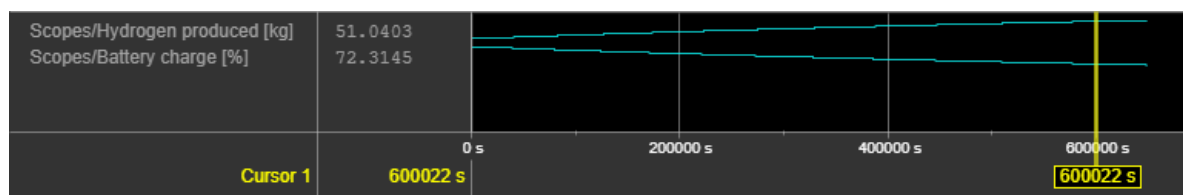
Elaboración propia en simulación

Anexo E: Gráfico unificado del escenario B



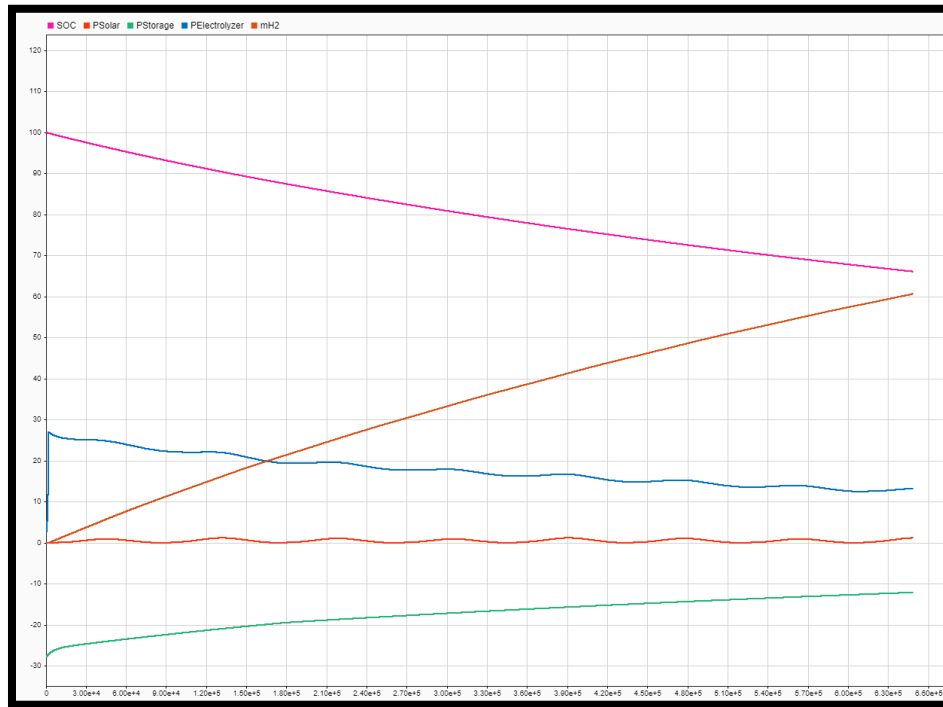
Elaboración propia en simulación

Anexo F: Analizador lógico escenario B



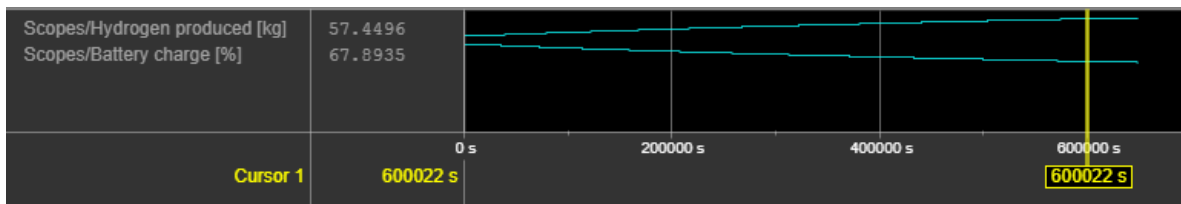
Elaboración propia en simulación

Anexo G: Gráfico unificado del escenario

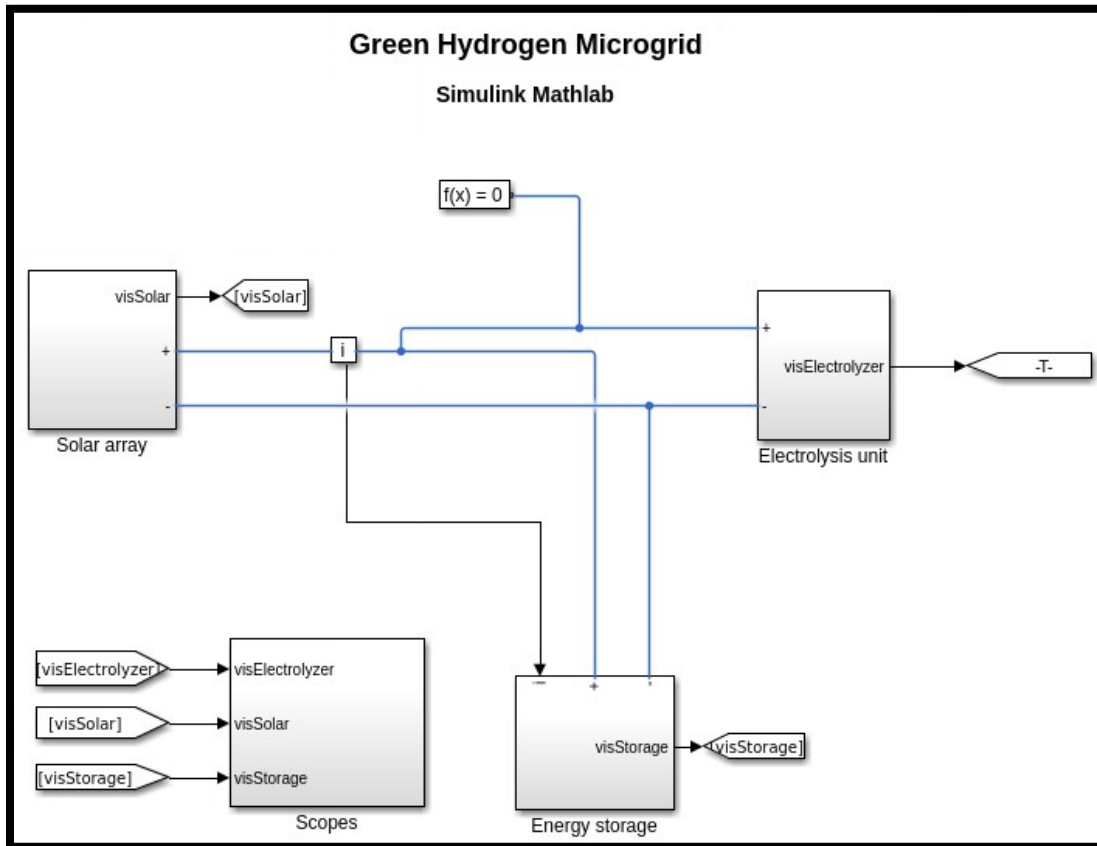


Elaboración propia en simulación

Anexo H: Analizador lógico escenario C

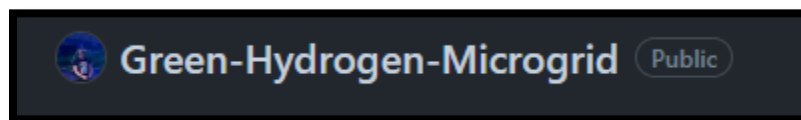


Anexo I: Modelo simulación micro red hidrógeno verde



Modelo simulación en Simulink

Anexo J: Archivos base de simulación 3 configuraciones



<https://github.com/codenotfound/Green-Hydrogen-Microgrid>