

SIMULACIÓN DEL SISTEMA POWER TO GAS UBICADO EN LA UNIVERSIDAD DE LA GUAJIRA MEDIANTE EL SOFTWARE HOMER PRO

SIMULATION OF THE POWER-TO-GAS SYSTEM LOCATED AT THE UNIVERSITY OF LA GUAJIRA USING HOMER PRO SOFTWARE

Perpiñan, L. M.¹; Serrano, D. A.²; Bastidas, M. J.³

¹*M.eng. Liseth María Perpiñán D. Docente Catedrático,
Programa de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería,
Universidad de La Guajira, e-mail: lperpinan@uniguajira.edu.co.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2443-3527>*

²*M.eng. Dario Andrés Serrano F. Docente Catedrático,
Programa de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería,
Universidad de La Guajira, e-mail: dserrano@uniguajira.edu.co.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6241-4183>*

³*PhD. Marlon José Bastidas B. Docente de Planta, Programa de
Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de La
Guajira, e-mail: marlonjoseb@uniguajira.edu.co. ORCID ID:
<https://orcid.org/0000-0002-7782-5110>*

Entidad

Km 3 + 354 Vía Riohacha – Maicao, Universidad de La Guajira, La
Guajira, Colombia.

Tel: 57-5-7282729 Ext. 241.

E-mail: dserrano@uniguajira.edu.co

Recibido: 25/07/2022 / Aceptado: 16/12/2022

Resumen

Este artículo se enfoca en la simulación de un sistema Power to Gas (PtG) en la Universidad de La Guajira para producir hidrógeno verde a partir de fuentes renovables, como la energía solar y eólica. La simulación se realiza a través del software comercial Homer Pro, donde se incluye cada uno de los componentes del sistema PtG con sus especificaciones y, los datos de radiación solar y velocidad del viento de la zona de estudio descargados a través de la NASA. Los resultados destacan la capacidad del sistema solar y eólico para generar 16.105 kWh/año y 11.845 kWh/año de energía eléctrica, respectivamente. Esto permite producir 192 kg/año de hidrógeno verde con la energía de la microplanta. Estos hallazgos respaldan la viabilidad de utilizar fuentes renovables para la producción sostenible de hidrógeno a pequeña escala.

Palabras clave: Power to Gas (PtG), Hidrógeno verde, Energía solar fotovoltaica, Energía eólica, Simulación energética.

Abstract

This article focuses on simulating a Power to Gas (PtG) system at the University of La Guajira to produce green

hydrogen from renewable sources, such as solar and wind energy. The simulation is conducted using the commercial software Homer Pro, including each component of the PtG system with their specifications and data on solar radiation and wind speed from the study area, obtained from NASA. The results highlight the solar and wind systems' capacity to generate 16.105 kWh/year and 11.845 kWh/year of electrical energy, respectively. This enables the production of 192 kg/year of green hydrogen from the microplant's energy. These findings support the feasibility of using renewable sources for sustainable small-scale hydrogen production.

Keywords: Power to Gas (PtG), Green hydrogen, Photovoltaic solar energy, Wind energy, Energy simulation.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda energética mundial se acrecienta cada vez más con el paso de los años debido al aumento poblacional global y las necesidades propias de una sociedad moderna que demanda más energía. Solo en 2018 el consumo final total mundial de energía (TFC) fue de 9.938 megatoneladas equivalentes de petróleo (Mtoe), generando emisiones de CO₂ iguales a 33.513 Mt (IEA, 2020). Ante esta situación, urge encontrar fuentes de energías alternativas o tecnologías que permitan afrontar la demanda energética mundial y que sean amigables con el medio ambiente.

Las tecnologías del hidrógeno como los sistemas Power to Gas (PtG) constituyen una alternativa atractiva para el proceso de descarbonización profunda de los diversos sistemas energético-globales, sumado a las mejoras en su rendimiento y costos recientes que señalan hacia una viabilidad económica en este tipo de sistemas (Staffell & Scamman, 2019; Ortega *et al.*, 2020; Bermúdez *et al.*, 2020).

Los sistemas Power to Gas comúnmente abreviados como PtG o P2G, producen hidrógeno (H₂) mediante la electrólisis del agua; dicha producción de hidrógeno tiene como finalidad almacenar energía a largo plazo permitiendo reducir la carga de la red eléctrica y ser un vector energético para procesos químicos como la conversión a metano (CH₄), combustibles

líquidos, gas de síntesis, productos químicos diversos o producir electricidad. Los sistemas PtG para la producción de hidrógeno verde son energizados con electricidad de fuentes renovables o de sus excedentes, esto posibilita una mejor integración de la generación fluctuante de las energías renovables hacia las redes de sistemas energéticos nacionales y regionales, de hecho, este es un objetivo muy importante para los sistemas PtG (Wulf & Zapp, 2018).

El continente europeo ha trabajado proactivamente en el estudio y desarrollo de la tecnología Power to Gas con la participación de 16 países en los que destacan Alemania, España, Francia, Reino Unido, Países Bajos, los países nórdicos y escandinavos, entre otros. Siendo Alemania el país europeo líder en cuanto al mayor número de proyectos PtG presentados al año, con promedio de 56 proyectos anuales hasta 2018, estos proyectos han estado enfocados en sectores muy diversos como plantas y centrales híbridas, generación de calor y energía, producción de hidrógeno para la industria, procesos de refinación, transporte, usos de gas no especificado, entre otros (Linßen, Zapp, & Wulf, 2018; Terrero *et al.*, 2020; Alonso *et al.*, 2020).

En América del Norte, los proyectos PtG son muy reducidos y en su mayoría son pilotos para la producción de hidrógeno no pensados para inyección a la red, estos proyectos se concentran principalmente en Canadá y Estados Unidos con 6 y 8 proyectos

para cada país respectivamente con una antigüedad de más de una década en ambas naciones, en el caso de Asia hasta 2019 solo se tenía registro de esta tecnología, en Japón con 3 proyectos PtG instalados y funcionales para la producción de metano principalmente, sin embargo, los proyectos en dicho país son aún más antiguos que en el continente norteamericano, con fechas de finales del siglo XX y principios del siglo XXI. La situación en América Latina es significativamente menos representativa, ya que hasta donde se ha podido investigar; Argentina era el único país del continente con un proyecto PtG iniciado en 2008 para la producción de hidrógeno en la ciudad de Comodoro Rivadavia, provincia de Chubut (M. Thema, 2019; Peñaloza *et al.*, 2020).

A nivel nacional, en el departamento de La Guajira solo se tiene conocimiento de un acercamiento de la tecnología PtG en un informe de 2021 donde se evaluó con un estudio tecno-económico la viabilidad para la instalación de una planta PtG híbrida para la producción de gas natural sintético (SNG) en el municipio de Manaure (Flórez *et al.*, 2019; Mahecha *et al.*, 2020; Uriana, 2021). Si bien la investigación y la generación de conocimiento sobre la tecnología PtG es poco relevante en la región, el departamento de La Guajira se perfila como una joya energética debido a su posicionamiento geográfico privilegiado para la captación de energía a través de fuentes renovables como la energía eólica y solar. Para 2019 todo el territorio correspondiente a el departamento de La Guajira tenía un potencial fotovoltaico cercano al triple de la demanda energética nacional para dicho período y un potencial eólico terrestre y marítimo en torno a 7 y 8 veces superior a la demanda nacional de energía respectivamente (Carvajal & Rodriguez, 2019; Villamizar *et al.*, 2020). Este panorama privilegiado podría permitir una mejor

integración, desarrollo y promoción de tecnologías de baja emisión como lo son la energía solar y eólica en conjunto con los sistemas de almacenamiento de energía a largo plazo como los sistemas PtG, a partir de la producción energética de estas tecnologías de fuentes renovables o del aprovechamiento de sus excedentes.

Una de las herramientas con mayor uso en el estudio y desarrollo de las tecnologías, sistemas de energía híbridos (HES), sistema híbrido de energía renovable (HRES) & HRES basado en hidrogeno (HRES-H2) de la cual Power to Gas forma parte es HOMER Pro usado en investigaciones con presencia en revistas y artículos reconocidos por la comunidad científica. La relevancia y uso de este software de simulación y análisis ha sido revisado, comparado y documentado por varias investigaciones enfocadas en la exploración de herramientas computacionales con un amplio uso en sistemas híbridos de energías renovables (Pervez, 2021; Kosmas, 2021; H.O.Guellehl, 2020; Gelvez *et al.*, 2020). El uso de HOMER Pro para el modelado y análisis de sistemas Power to Gas específicamente; tienen registro en diversos países del continente europeo, asiático y Oceanía donde las investigaciones y proyectos han estado enfocados en el desarrollo de proyectos públicos de energías renovables, optimización de los sistemas Power to Gas, análisis y viabilidad tecno-económica de los sistemas PtG, así como la selección de los sistemas híbridos más idóneos técnica y económicamente a partir de las variables propias de la región donde se ubica el sistema de interés, solo por mencionar algunos. Por otra parte, la revisión documental evidencia que no existe un registro del uso de HOMER Pro para sistemas PtG en el continente americano, solo ha habido ciertos acercamientos recientes hacia la tecnología de Power to Gas relacionados con su

viabilidad (Torrado *et al.*, 2020; Uriana, 2021; Cruz Soto, 2022), pero sin la incorporación o el uso de HOMER Pro en sus metodologías de estudio. Ante este panorama la región amerita un cambio hacia la adopción de herramientas computacionales líderes en el análisis y estudio de los sistemas híbridos de energía para poder ser partícipe del acontecer vanguardista global en este tipo de sistemas y tecnologías (López *et al.*, 2020).

En este trabajo se realiza la simulación del sistema Power To Gas instalado en la universidad de La Guajira, a través del software HOMER Pro, donde se analizará el recurso eólico del lugar de emplazamiento, la demanda poblacional y la producción de energía e hidrogeno.

2. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en esta investigación consiste en las siguientes partes. La primera parte, consiste en la descripción del sistema y la segunda parte, en los parámetros de entrada al software Homer PRO, para luego ser analizada en la simulación. A continuación, se describen los componentes metodológicos.

2.1. Zona de Estudio

La planta piloto power to gas se encuentra ubicado en el bloque de laboratorios en las instalaciones de la Universidad de La Guajira en la sede principal, como se observa en la figura 1. La adquisición de este sistema se realizó a través de un proyecto en conjunto con la Universidad de Antioquia; entre los grupos de investigación DESTACAR-GASURE, de la Alianza SÉNECA perteneciente al segundo Ecosistema Científico lanzado por el Ministerio de Ciencias, Tecnología e Innovación (Minciencias).

2.2. Descripción del Sistema

La planta piloto está dividida en varios subsistemas: captación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, electrolisis para la producción de hidrogeno y el uso del hidrogeno como vector energético.

La captación de energía eléctrica se realiza a partir de una microplanta eólico-solar de 15 kW. La microplanta está compuesta por un sistema eólico que consta de un aerogenerador de marca Aeolos-H con una potencia de 5 kWe. El aerogenerador se encuentra conectado a la red de la universidad a través de un inversor independiente (Araujo & Rivera, 2020; Bonilla *et al.*, 2021). Las características del aerogenerador se encuentran en la tabla 1 y en la figura 2 se puede observar una fotografía del equipo instalado.



Figura 1. Ubicación de la planta piloto power to gas.
Fuente: Google Earth, 2023

Tabla 1. Especificaciones técnicas del aerogenerador Aeolos-H 5 kW

ESPECIFICACIÓN	CONCEPTO
Potencia nominal	5 kW
Potencia máxima	6.5 kW

Eficiencia	95%
Velocidad de arranque	2.5 m/s
Velocidad de corte	11 m/s
Velocidad de supervivencia	59.5 m/s
Vida útil	20 años
Velocidad del rotor	240 RPM
Altura de la torre	18 m
Diámetro del rotor	5.6 m
Área de barrido	24.6 m ²

Fuente: Ficha técnica del proveedor Aeolos Wind Turbines (Aeolos, 2022)



Figura 2. Fotografía de la instalación de aerogenerador Aeolos-H 5 kW instalado en las cercanías de la planta piloto Power to Gas.

La microplanta también está compuesta también por un sistema solar fotovoltaico (FV) que consta de 34 paneles FV tipo policristalinos. De eso 34 paneles FV, 26 se encuentran conectados a la red por medio de microinversores y los 8 restantes se encuentran conectados a dos baterías a través de un inversor-cargador. Las especificaciones técnicas de los paneles FV se encuentran en la tabla 2 y en la figura 3 se puede observar

una vista aérea donde se encuentran instalados.

Tabla 2. Especificaciones técnicas del panel solar fotovoltaico ZXP6-LD72-330/p

ESPECIFICACIÓN	CONCEPTO
Potencia nominal	330 Wp
Eficiencia	16.82 %
Voltaje de alimentación	37.6 V
Corriente de potencia máxima	8.91 A
Temperatura de operación	~40°C~+85°C
Dimensiones del módulo (Altura x ancho x profundidad)	1978 mm x 992 mm x 30 mm
Peso	25.5 kg

Fuente: Ficha técnica del proveedor ZNShine Solar (ZNShine Solar, 2022)



Figura 3. Vista aérea de los paneles FV instalados en la cubierta de la planta piloto Power to Gas

La microplanta está compuesta por estos sistemas, debido a que, combinar energía solar y eólica permite una mayor fiabilidad en la generación eléctrica, superando los problemas de confiabilidad de la energía eólica y la imprevisibilidad de la energía solar debido a eventos climáticos. La integración de ambas fuentes reduce significativamente los desafíos de satisfacer las demandas energéticas en comparación

con el uso de una sola fuente de energía renovable (Castellanos & Baldovino, 2021; Khalil L, 2021).

En la producción de hidrogeno verde se utilizan dos electrolizadores tipo AEM de la marca ENAPTER de Italia, que emplean la actividad de electrolisis para la producción in-situ de hidrogeno a partir de los remanentes de energía eléctrica de la microplanta y agua suministrada por el espacio que se encuentra en la planta. El agua tiene un proceso de purificación para que sea apta para los electrolizadores y no afectar las membranas. Este proceso de purificación se realiza a través de un sistema auxiliar que viene con los equipos. Las especificaciones técnicas de los electrolizadores se encuentran en la tabla 3 y en la figura 4 se muestra la instalación de los electrolizadores y su sistema auxiliares.

Tabla 3. Especificaciones técnicas del electrolizador Enapter EL 2.1.

ESPECIFICACIÓN	CONCEPTO
Capacidad de producción de hidrogeno	0.5 Nm ³ /h (500 NL/h) cada electrolizador
Pureza del hidrogeno	A 35 bar: ~99.90% (impurezas: ~ 1000 ppm H ₂ O) A 8 bar: > 1500 ppm H ₂ O
Presion de salida	Hasta un máximo de 35 barg
Potencia nominal	2400 W
Potencia eléctrica de consumo en “stand-By”	15 W
Fuente de alimentación	200-240 Vac, 50/60 Hz
Rango de temperatura ambiente operativo	5°C a 45°C

Rango de humedad ambiente operativo	Hasta 95% de humedad, sin condensación
Consumo de agua	~400 ml/h
Rango de presión de entrada del agua	1 – 4 barg
Dimensiones del módulo (WxDxH)	482 mm x 634 mm x 307 mm
Peso	55 kg

Fuente: Ficha técnica del proveedor ENAPTER (ENAPTER, 2022)



Figura 4. Fotografía de los electrolizadores EL 2.1 y sistemas auxiliares de la marca Enapter ubicado en la planta piloto Power to Gas.

El ultimo subsistema está relacionado con el uso del hidrogeno verde como vector energético, una vez producido a través de los electrolizadores (Villamizar *et al.*, 2019). En esta parte, el hidrogeno es utilizado para la combustión pura, producir metano verde y realizar blending. Como no es el objetivo de este trabajo, no se dan mayores detalles.

La microplanta tiene unos componentes auxiliares importantes como lo

son inversores y banco de baterías. La inyección a la red de la energía eléctrica suministrada por el aerogenerador, se realiza a través de un inversor de la marca Aeolos, el mismo fabricante del aerogenerador. Las especificaciones técnicas del inversor se encuentran en la tabla 4.

Tabla 4. Especificaciones técnicas del inversor Aeolos CTW-5KS.

ESPECIFICACIÓN	CONCEPTO
Rango de voltaje	80 – 600 Vdc
Potencia máxima del aerogenerador	5500 W
Rango de voltaje en la red eléctrica	196 – 253 Vac
Frecuencia de red	Opcional 50 Hz o 60 Hz
Eficiencia máxima	94%
Consumo eléctrico en “stand-by”	<11 W
Temperatura ambiente de funcionamiento	-20°C ~ + 40°C
Dimensiones (LxWxH)	480 mm x 235 mm x 680 mm
Peso	67 kg
Modo de refrigeración	Convección y ventilador

Fuente: Ficha técnica del proveedor Aeolos-H (Aeolos-H, 2022)

El sistema solar utiliza de la microplanta también utiliza inversores para convertir la corriente continua en alterna y se sincronice con la red de la universidad. Para el caso de los paneles FV conectados a la red se utilizan microinversores monofásicos Modelo YC600 de la empresa norteamericana APsystems. Mientras que, para los paneles FV aislados, se utiliza un inversor-cargador modelo Multiplus Compact del fabricante Holandes Victron Energy (Mora *et al.*, 2018;

Niño Rondón *et al.*, 2021). Las especificaciones técnicas de estos equipos se encuentran en las tablas 5 y 6, respectivamente.

Tabla 5. Especificaciones técnicas del inversor Victron Energy Multiplus Compact

ESPECIFICACIÓN	CONCEPTO
Rango de tensión de entrada	9.6 -17 Vdc
Tensión de salida	120 Vac ± 2% a 60 Hz
Potencia continua de salida a 25°C	2000 W
Potencia continua de salida a 40°C y 65°C	1450 y 1100 W
Pico de potencia	4000 W
Eficiencia máxima	92 / 94 %
Consumo sin carga	9 / 11 W
Consumo sin carga en modo ahorro	7 / 8 W
Temperaturas de funcionamiento	-40°C ~ + 65°C (refrigerado por aire)
Humedad máxima sin condensación	95 %
Dimensiones (HxWxD)	520 mm x 255 mm x 125 mm
Peso	13 kg

Fuente: Ficha técnica del proveedor Victron Energy Multiplus Compact (Victron Energy, 2022).

Tabla 6. Especificaciones técnicas del microinversor APsystems YC600

ESPECIFICACIÓN	CONCEPTO
Potencia de módulo PV recomendada	200 – 365 W
Rango de voltaje MPPT	22 – 48 V
Voltaje de entrada máximo	55 V

Rango de voltaje de operación	16 – 55 V
Corriente de entrada máxima	12 A x 2
Voltaje de salida nominal	240 V a 60 Hz
Potencia máxima de salida continua	548 W
Unidades máximas por sucursal	7 (14 módulos PV)
Rango de voltaje de salida ajustable	160 – 278 V
Eficiencia máxima	96.5 %
Consumo de energía nocturno	60 mW
Rango de temperatura ambiente de funcionamiento	-40°C a 65°C

Fuente: Ficha técnica del proveedor APsystems YC600 (APsystems, 2022)

2.3. Caracterización energética de la zona de estudio y planta piloto

La caracterización de los recursos eólico y solar en la zona de estudio se realiza utilizando el Visor de Acceso a Datos (Data Access Viewer) de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) (NASA POWER Data), con las coordenadas donde se encuentra ubicada la planta piloto

Power to Gas (Latitud: 11.51 °N y Longitud: -72.87 °E). La recolección de datos se realizó para los años 2019, 2020 y 2021, permitiendo una visión más ajustada a la realidad de acuerdo al comportamiento de estas variables en particular.

2.3.1. Recurso Solar

Los datos del recurso solar muestran la cantidad de radiación solar que incide sobre la superficie terrestre en los tres años de estudio. Este es un parámetro de entrada para el recurso solar GHI y se introducen en el Homer Pro. En la tabla 7 y la figura 5 se proporcionan los datos de radiación solar en la zona de estudio para una visión más completa.

Figura 5. Datos de radiación solar promedio para los tres años seleccionados en la zona de estudio

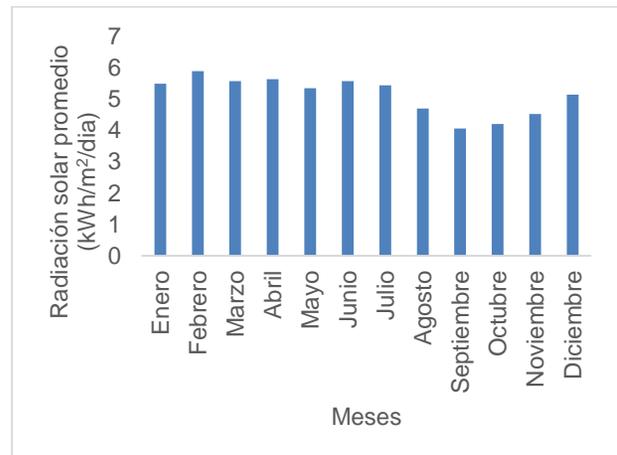


Tabla 7. Datos de radiación solar en la zona de estudio.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	Radiación Promedio Mensual (kWh/m2/dia)											
2019	5.57	6.11	5.97	5.74	5.24	5.79	6.45	6.25	5.69	5.43	5.34	5.11
2020	5.36	6.23	6.72	6.11	5.68	5.89	6.15	5.64	5.72	5.30	4.40	5.33
2021	5.48	6.12	5.91	5.25	5.66	5.35	6.02	5.69	5.66	5.24	5.31	4.24
Promedio Mes	5.47	6.15	6.20	5.70	5.53	5.68	6.21	5.86	5.69	5.32	5.02	4.89

Fuente: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA), 2022

2.3.2. Recurso eólico

Los datos del recurso eólico muestran

la velocidad media mensual del viento en la zona de estudio. En la figura 6, se observa los

datos de velocidad del viento en forma de grafico entre la velocidad media mensual del viento de los años seleccionados en m/s y los meses de enero a diciembre (Trujillo *et al.*, 2019). En la tabla 8 proporciona en detalles estos datos de velocidad del viento.

2.3.3. Perfil de carga de la planta PtG

Se ha desarrollado un perfil de carga eléctrica que representa la proporción de energía renovable requerida para alimentar el laboratorio donde se ubica el sistema PtG durante las actividades académicas e investigativas. Esta fracción del consumo eléctrico puede ser satisfecha por la generación de energía renovable dentro de la microrred del sistema PtG, aprovechando la producción óptima de electricidad a partir de fuentes eólicas y solares. El perfil de carga propuesto se adapta al calendario académico típico de la Universidad de La Guajira,

teniendo en cuenta los periodos académicos activos y los periodos de receso en los que la demanda de energía disminuye significativamente o es nula. En la tabla 9 se puede apreciar el perfil de carga definido para ingresar la información al software Homer Pro.

Figura 6. Datos de velocidad del viento promedio para los tres años seleccionados en la zona de estudio.

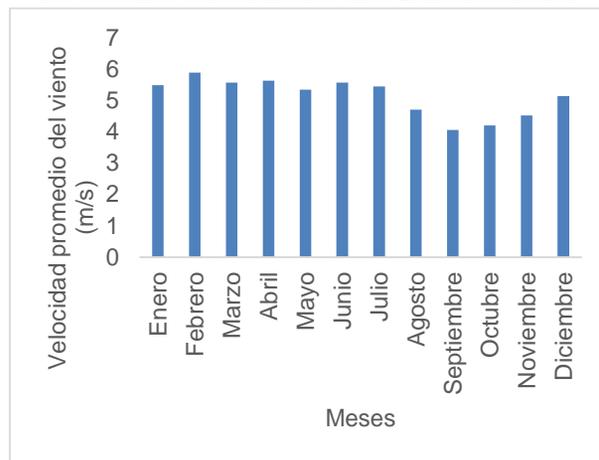


Tabla 8. Datos de velocidad del viento en la zona de estudio.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	Velocidad de Viento Promedio mensual (m/s)											
2019	5.52	5.93	5.24	5.71	4.70	5.14	5.14	4.39	3.62	3.86	4.34	4.77
2020	5.41	5.85	5.72	5.71	5.34	5.84	5.41	4.58	3.93	3.98	4.16	5.16
2021	5.53	5.89	5.75	5.48	5.99	5.73	5.77	5.13	4.64	4.77	5.07	5.49
Promedio Mes	5.49	5.89	5.57	5.63	5.34	5.57	5.44	4.70	4.06	4.20	4.52	5.14

Fuente: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA), 2022.

2.3.4. Perfil de carga del Electrolizador

Se establece el calendario operativo que guía el funcionamiento del electrolizador durante la simulación, abarcando las 24 horas del día, los 7 días de la semana y los 12 meses del año. Este calendario, ilustrado en la figura 7, está estrechamente vinculado al calendario diseñado para la carga de hidrógeno en el proceso de simulación.

Figura 7. Perfil de carga del electrolizador ingresado directamente en el software Homer Pro

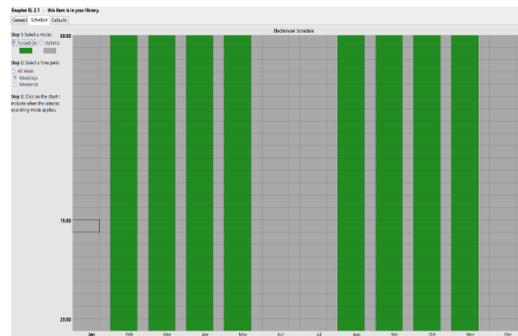


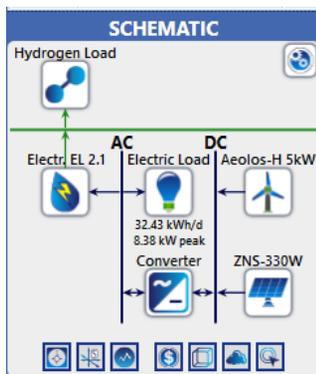
Tabla 9. Perfil de carga de la planta PtG

Fanja del Día	Hora	Vacaciones		Periodo Académico I			Vacaciones		Periodo Académico II			Vacaciones	
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Madrugada	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mañana	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	3.3	3.6	3.8	4.2	0	0	4.2	3.95	4.1	4.2	0
	7	0	3.4	4.0	4.2	3.5	0	0	3.6	3.65	4.3	4.28	0
	8	0	4.0	4.2	4.067	4.2	0	0	4.267	4.2	4.2	4.09	0
	9	0	4.3	4.34	4.5	4.46	0	0	4.05	3.9	4.03	4.3	0
	10	0	4.8	4.3	4.0	4.3	0	0	4.1	4.32	4.07	3.99	0
	11	0	4.5	4.2	4.15	4.0	0	0	4.06	4.286	4.3	4.099	0
Tarde	12	0	0.85	0.9	0.65	0.79	0	0	1.5	1.35	2.75	1.2	0
	13	0	0.12	0.13	0.11	0.13	0	0	0.15	0.13	0.11	0.12	0
	14	0	0.11	0.08	0.09	0.115	0	0	0.05	0.08	0.06	0.1	0
	15	0	4.5	4.57	4.52	4.654	0	0	4.66	4.56	4.88	5.0	0
	16	0	4.5	4.32	4.6	4.9	0	0	4.9	4.5	4.30	5.12	0
	17	0	4.15	4.54	4.6	4.18	0	0	4.64	4.3	4.19	4.41	0
Noche	18	0	4.2	4.14	4.32	4.9	0	0	4.66	4.67	4.89	4.11	0
	19	0	3.5	4.4	4.7	4.1	0	0	4.5	4.6	4.137	4.6	0
	20	0	0.15	0.13	0.13	0.13	0	0	0.12	0.1	0.12	0.1	0
	21	0	0.12	0.15	0.13	0.8	0	0	0.12	0.1	0.11	0.08	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 8 presenta el esquema de simulación para la planta piloto PtG. Este esquema abarca todos los componentes del sistema que serán simulados, y la información utilizada para configurar cada componente se detalló en la sección 2.

Figura 8. Esquema propuesto para la simulación del sistema de la planta piloto PtG en el software Homer Pro



Los resultados obtenidos en la producción y consumo eléctrico; El valor en porcentaje correspondiente a la fracción renovable, es igual al 100% porque el sistema PtG simulado no cuenta con componentes de

generación eléctrica convencional como podrían ser un generador diésel o una caldera por mencionar algunos, en su lugar la generación eléctrica del sistema simulado se produce por el componente solar y eólico mediante el conjunto de paneles solares y el aerogenerador que se encargan de suplir las demandas de la carga eléctrica definida en el diseño de simulación y la demanda del electrolizador (Guerrero *et al.*, 2021). En la tabla 10 se observan la producción eléctrica estimada del sistema PtG simulado en HOMER Pro.

En la tabla 11 se estima el consumo de carga eléctrica y del electrolizador del sistema PtG. La carga eléctrica (carga primaria AC) corresponde al perfil eléctrico propuesto para la simulación (Tabla 9), recreando el consumo eléctrico del laboratorio donde se encuentra instalado el sistema PtG, mientras la segunda carga mostrada en la tabla corresponde a la demanda eléctrica del electrolizador relacionada con el perfil de carga del hidrogeno definido en la simulación (Figura 7).

Tabla 10. Producción eléctrica estimada para el componente eólico y solar del sistema PtG.

Componente del sistema	Producción (kWh/año)	%	Fracción renovable
ZNShine			
330W (ZXP6-LD72-330/P)	16.105	57.6	
Aeolos-H 5kW Aerogenerador	11.845	42.4	100%
Total	27.950	100	

Tabla 11. Consumo eléctrico estimado para el perfil de carga eléctrica y del electrolizador en el sistema PtG.

Carga del Sistema	Consumo (kWh/año)	%
Carga Eléctrica (Carga primaria AC)	7,761	41.2
Carga Eléctrica Electrolizador (AC)	11,061	58.8
Total	18,822	100

Obtenida la producción eléctrica del sistema, HOMER Pro arroja resultados para 3 variables como: el exceso de electricidad,

hace referencia al excedente de energía ya sea para una fuente renovable o convencional cuando su producción mínima exceda la carga, y las baterías no puedan almacenar la totalidad de la producción. Carga eléctrica insatisfecha, es la electricidad que el sistema no puede suministrar cuando la demanda eléctrica excede la oferta, y la escasez de como el déficit que se produce entre la capacidad operativa requerida y la cantidad real de capacidad operativa que el sistema puede proporcionar. Los resultados para estas variables se observan en la tabla 12 y figura 9.

Variable	kWh/año	%
Exceso de Electricidad	7,926	28.4
Carga Eléctrica Insatisfecha	4,076	34.4
Escasez de Capacidad	13,021	100

Tabla 12. Exceso de electricidad, la carga eléctrica insatisfecha y la escasez de capacidad en el sistema PtG

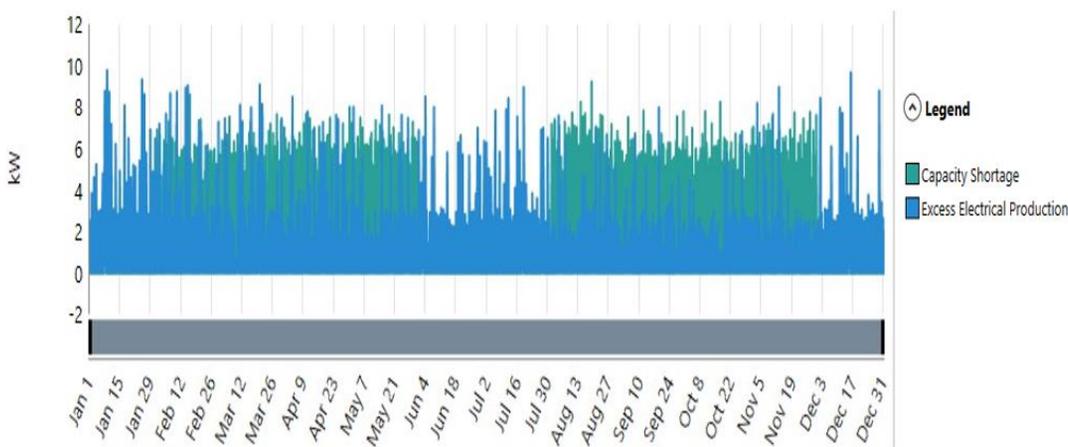


Figura 9. Perfil anual para el exceso de electricidad y la escasez de capacidad en el sistema PtG

3.1. Producción de hidrogeno del sistema PtG

La producción de 192 kg/año del electrolizador hace referencia a la generación

estimada para un periodo de 12 meses considerando el funcionamiento durante ese periodo de tiempo. Pero la simulación contempla una carga de hidrogeno para los

periodos académicos y vacacionales de la universidad, así como el calendario de funcionamiento del electrolizador a partir de dicha carga HOMER Pro simula la producción de hidrógeno para todo el año indiferentemente del perfil de carga y el calendario de funcionamiento del electrolizador establecidos, donde la producción correspondiente a los periodos vacacionales (diciembre, enero, junio y julio) es considerado como un excedente de producción de hidrógeno por el software al momento de arrojar los resultados. Por lo tanto, el valor que correspondería a la producción de hidrógeno en los 2 periodos académicos del año (de febrero hasta mayo y desde agosto hasta noviembre) sería el valor del consumo por parte de la carga de hidrógeno igual a 92.3 kg/año y 48.1% de la producción total, mientras que en los periodos vacacionales se estima una producción de 99.5 kg/año y 51.9% de la producción total si

se decide hacer funcionar el electrolizador en esos periodos de tiempo. Sumados ambos valores dan como resultado el 100% de la producción estimada anual total del electrolizador con un valor de 192 kg/año. En la tabla 13 se proporcionan detalles de la producción y consumo de hidrogeno del sistema PtG.

Tabla 13. Producción y consumo de hidrogeno para el sistema PtG.

Producción	kg/año	%
Electrolizador	192	100
Exceso de hidrogeno	99.5	51.9%
Consumo	kg/año	%
Carga de hidrogeno	92.3	48.1

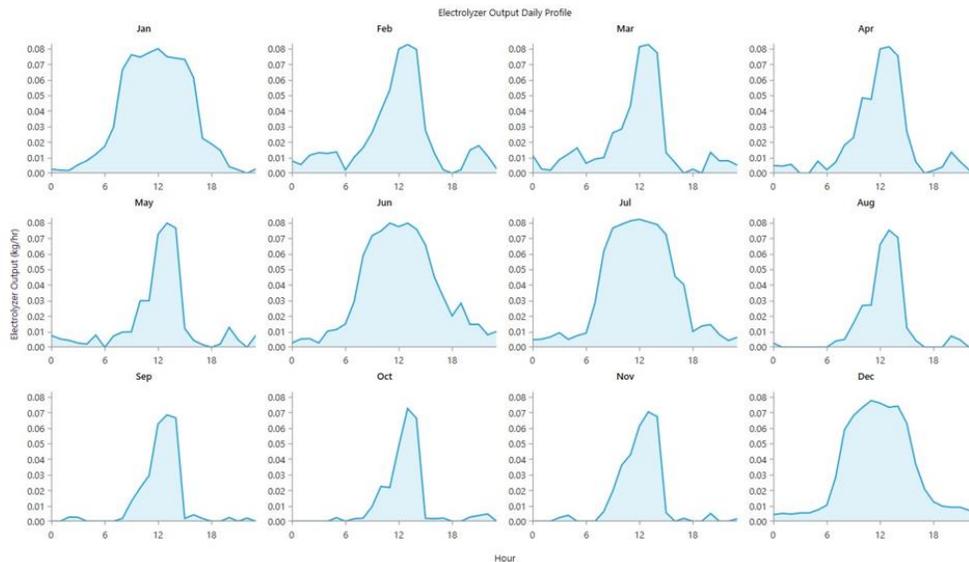


Figura 10. Perfil diario estimado de producción de hidrógeno para el electrolizador del sistema PtG.

En la figura 10 se evidencia los periodos de tiempo donde se presenta una producción de exceso de hidrógeno corresponde a los periodos vacacionales conformados por los meses de diciembre,

enero, junio y julio donde no existiría una carga eléctrica significativa a satisfacer para el laboratorio donde se ubica el sistema PtG, esto provoca que se garantice de manera considerable la disponibilidad

energética para la demanda del electrolizador al momento de producir hidrógeno, es por ello que esos serían los periodos donde aumentan las posibilidades de obtener una producción cercana a los 0.8988 kg/h de hidrógeno como valor deseado.

4. CONCLUSIONES

En los resultados de producción y consumo, el componente solar aporta al sistema 16.105 kWh/año, lo que representa el 57.6% de la energía generada. El 42.4% restante es del sistema eólico, con un valor de 11.845 kWh/año, en consecuencia, la fracción renovable en la generación de energía para el sistema sería del 100%.

En el consumo del sistema, se puede evidenciar que el electrolizador demanda la mayor parte de energía, lo que equivale a 11.061 kWh/año contra los 7.761 kWh/año correspondiente a la carga eléctrica del laboratorio donde se encuentra el sistema PtG, considerando un calendario de funcionamiento del electrolizador acorde al calendario del perfil de carga de hidrógeno. Ahora bien, los datos arrojados por la simulación consideran un funcionamiento en los periodos vacacionales donde a priori no debería funcionar el electrolizador, lo que aumenta considerablemente el consumo anual, este comportamiento sería totalmente opuesto al real, ya que el electrolizador solo funcionaría cuando se produzca un excedente de energía, arrojando consumo de 16.2 kWh.

El exceso de electricidad, carga eléctrica insatisfecha y escasez de capacidad arrojan valores estimados de 7,926 kWh/año, 4,076 kWh/año y 13,021 kWh/año respectivamente. El valor para el exceso de electricidad correspondería al escenario en el que la producción mínima del sistema PtG

supera las demandas de las cargas eléctricas, este valor es cuantitativamente significativo para el modelo de simulación, porque el mismo no incluyó un conjunto de baterías que pertenecen al componente de metanización del sistema PtG real instalado en la universidad o la inclusión de conexión a red, que sería hacia donde se dirigiría dicho exceso de electricidad. Mientras que la carga eléctrica estimada que el sistema no podría cubrir y el déficit entre la capacidad operativa demandada y la cantidad real de capacidad de operación se representa con los valores mencionados anteriormente para la carga eléctrica insatisfecha y la escasez de capacidad respectivamente.

En lo concerniente a los resultados para la generación de hidrógeno del sistema PtG, se estima una producción de 92.3 kg/año lo que equivale al 48.1% de la producción anual total del electrolizador, cabe resaltar que teniendo en cuenta los dos periodos con actividades académicas de la universidad para los lapsos de tiempo entre los meses de febrero a mayo y de agosto a noviembre donde funcionaría el electrolizador ajustado al perfil de carga de hidrógeno evidenciando una producción de 192 kg/año y un excedente de 99.5 kg/año igual al 51.9% de la producción total anual como exceso de hidrógeno producido principalmente en los 2 periodos vacacionales comprendidos por los meses de diciembre y enero así como también de junio y julio según el calendario académico usual de la universidad.

Estos resultados claramente indican que es conveniente considerar establecer estrategias que permitan el funcionamiento del electrolizador en los periodos vacacionales ya que son los periodos de tiempo donde se generaría la mayor producción de hidrógeno, superando la producción total estimada a partir de los periodos con actividades académicas

en un lapso de tiempo considerablemente menor, es otras palabras, la producción de 8 meses a partir de los 2 periodos académicos podría ser superada por tan solo 4 meses de producción en los periodos vacacionales.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Programa Colombia científica como fuente de financiación, en el marco de las convocatorias Ecosistema científico, contrato No. FP44842-218-2018."

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alonso, L., Castellanos, L. y Meseguer, O. (2020). Efectos alelopáticos de residuos de Sorghum Halepense (L.) sobre dos arvenses dicotiledóneas en condiciones de laboratorio. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 11(1). DOI: <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i1.354>

Araujo, T. C. y Rivera, M. E. (2020). Índices de sequía para la cuenca del Rio Cesar – Colombia. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 11(2). DOI: <https://doi.org/10.24054/19009178.v2.n2.2020.4671>

Bermúdez, N., Gallegos, D. S. y Botello-Suárez W. A. (2020). Desarrollo de un dispositivo autónomo para el mejoramiento de la calidad del agua en el humedal córdoba (Bogotá, Colombia). *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 11(1). DOI: <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i1.355>

Bonilla, C. A., Rubio, Y. M. y Bonilla, S. A. (2021). Afectación por derrames de crudo ocasionados por acciones subversivas al oleoducto Caño Limón Coveñas. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 12(2).

<https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/article/view/2572>

Carvajal, G., & Rodriguez, D. (2019). Assessment of solar and wind energy potential in La Guajira, Colombia: Sustainable Energy Technologies and Assessments, 14. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100531>

Castellanos, L. y Baldovino, A. L. (2021). Enfermedades foliares más importantes del cultivo de la fresa en la zona de Pamplona. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 12(1). DOI: <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/article/view/2569/3133>

Cruz Soto, J. (2022, Agosto 15). A techno-economic study for a hydrogen storage system in a microgrid located in Baja California, Mexico. Levelized cost of energy for power to gas to power scenarios. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 30050-30061. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.026>.

Cruz-Soto, J. d., IratiAzkona-Bedia, Velazquez-Limon, N., & Romero-Castanona, T. (2022). A techno-economic study for a hydrogen storage system in a microgrid located in Baja California, Mexico. Levelized cost of energy for power to gas to power scenarios. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 30050-30061. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.026>.

Flórez, M. A., Mosquera, J., Ramón, J. D. y Caballero, J. E. (2019). Análisis de la contaminación de ruido generada por el flujo vehicular en el casco urbano del municipio de Chinácota, Norte de Santander. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 10(2). DOI:

- <https://doi.org/10.24054/19009178.v2.n2.2019.3964>
- Gelvez, S. D., Rivera, M. E. y Solano, O. F. (2020). Análisis estadístico de parámetros hidrometeorológicos, físicoquímicos y microbiológicos incidentes en la calidad de la quebrada Monte dentro. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 11(2). DOI: <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i2.872>
- Guerrero, J., Hernández, B. y Castellanos, L. (2021). Calidad del agua para sistemas de riego en Colombia. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 12(2). <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/article/view/2573/3137>
- H.O.Guellehl, M. R. (2020, mayo 24-27). Computational Tools used in Hybrid Renewable Energy Systems Optimization - An overview. *Computer Aided Chemical Engineering*, 48, 1477-1482. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823377-1.50247-0>.
- IEA, I. E. (2020). Key World Energy Statistics 2020. IEA. Retrieved Agosto 23, 2022, from https://www.energiafed.be/sites/default/files/editor/Key_World_Energy_Statistics_2020.pdf.
- Khalil, L., Kamran, L., Arslan, M., Mughess, R., Khalil K. & Alwaz, nashitah. (2021). Optimization and designing of hybrid power system using HOMER pro. *Materials Today: Proceedings*, S110-S115, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.054>.
- Kosmas, A. P. (2021). Hybrid Renewable Energy Systems' Optimisation. A Review and Extended Comparison of the Most-Used Software Tools. *Energies*, 14(8268), 1-28. doi: <https://doi.org/10.3390/en14248268>.
- Linßen, J., Zapp, P., & Wulf, C. (2018). Review of Power-to-Gas Projects in Europe. *Energy Procedia*, 367-378. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.041>.
- López, R., Ortiz, O. y Ramón, J. D. (2020). Evaluación de los gases de efecto invernadero aplicando la metodología análisis de ciclo de vida (ACV) en el relleno sanitario regional la cortada, Pamplona, Norte de Santander. *Infometric@ - Serie Ingeniería, Básicas y Agrícolas. Volumen 3(2)*. <http://infometrica.org/index.php/syh/article/view/145/171>
- Mahecha, J. G., Castellanos, L. y Céspedes, N. (2020). Alternativas para Suplir la Carencia de Fósforo en Fresa y Disminuir la Contaminación Ambiental en Pamplona Norte de Santander. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 10(1). DOI: <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i1.384>
- Mora, E. A., Martínez, E. y Velasco, J. A. (2018). Simulación y validación del prototipo de un colector térmico solar hecho con neumáticos reciclados. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 9(2). DOI: <https://doi.org/10.24054/aaas.v9i2.404>
- M. Thema, F. B. (2019, septiembre). Power-to-Gas: Electrolysis and methanation status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 775-787. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.030>.
- National Aeronautics and Space Administration-NASA. POWER Data Access Viewer. Available online: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (accessed on 24 November 2022)].
- Niño Rondón, C. V., Castro Casadiego, S. A. y Ortiz Fonseca, D. M. (2021). Análisis de

- herramientas para desarrollar un sistema de apoyo ambiental para identificar residuos sólidos. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 12(2). <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/article/view/2572/3136>
- Ortega, A., Cáceres, L. y Castiblanca, L. (2020). Introducción al Uso de Coagulantes Naturales en los Procesos de Potabilización del Agua. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 11(2). DOI: <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i2.873>
- Peñaloza, L. K., Carvajal, F. A. y Hernández, N. J. (2020). Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal de la microcuenca El Volcán a partir de la compra de áreas estratégicas. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 11(1). DOI: <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i1.381>
- Pervez, S. A. (2021, Marzo 26). Microgrids: A review on optimal hybrid technologies, configurations, and applications. *International Journal of Energy Research*, 45, 12564-12597. doi: <https://doi.org/10.1002/er.6666>.
- Staffell, & Scamman, D. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global. *Energy & Environmental Science*, 463-491. doi: <https://doi.org/10.1039/C8EE01157E>.
- Terrero, W., Castellanos, L. y Vicet, L. (2020). Potencialidades alelopáticas del residual paja de la caña de azúcar (SACCHARUM SPP., HYBRID) para el manejo de arvenses. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 11(1) DOI: <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i1.357>
- Torrado, J. M., Castellanos, L. y Céspedes, N. (2020). Evaluación de alternativas biológicas para el control de *Ascochyta* Spp. en el cultivo de arveja, Pamplona, Norte de Santander. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 11(1). DOI: <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i1.353>
- Trujillo, J. E., Caballero, J. E. y Ramón, J. D. (2019). Determinación de las concentraciones de metales pesados presentes en el material particulado PM10 del municipio de San José de Cúcuta, Norte de Santander. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 10(1). DOI: <https://doi.org/10.24054/19009178.v1.n1.2019.3957>
- Uriana, R. R. (2021). Proyecto de viabilidad de Power-to-Gas: Producción de gas natural sintético en Manaure, La Guajira – Colombia. Universitat de Barcelona, Máster en Energías Renovables y Sostenibilidad Energetica. Retrieved agosto 27, 2022 from http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/180180/1/TFM_MERSE_Rodolfo_Iguaran_Uriana.pdf
- Villamizar, J., Rivera, M. E. y Delgado, J. R. (2019). Mapa de amenaza por crecientes súbitas en la microcuenca La Viuda, Chitagá, Colombia. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 10(2). DOI: <https://doi.org/10.24054/aaas.v10i2.388>
- Villamizar, Y., Ramón, J. D. y López, L. A. (2020). Análisis de las condiciones del recurso hídrico en la quebrada escorial, Pamplona Norte de Santander. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo (RAAAS)*, 11(1). DOI: <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i1.382>
- Wulf, C., & Zapp, J. L. (2018). Power-to-Gas — Concepts, Demonstration, and Prospects. *Hydrogen Supply Chains*, 309-345. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811197-0.00009-9>.