

# HYMODELICA

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE PLANTA DE  
GENERACIÓN DE HIDRÓGENO VERDE A  
TRAVÉS DE ENERGÍA RENOVABLES

## TABLA DE CONTENIDO

1	Resumen ejecutivo .....	3
1.1	Objetivos del estudio de optimización técnica .....	3
1.2	Principales hallazgos y conclusiones.....	3
1.3	Recomendaciones clave .....	4
2	Introducción.....	4
2.1	Electrólisis alcalina – AWE .....	4
2.2	Electrólisis PEM .....	5
2.3	Comparativa de Tecnologías.....	5
3	Optimización del proceso de producción de hidrógeno .....	6
3.1	Suposición de descripción del proyecto .....	6
3.2	Análisis de la disponibilidad de recurso renovable .....	6
3.3	Condiciones de los casos de estudio de generación de hidrógeno .....	8
3.4	presentación de los casos de estudio de producción de hidrogeno verde.....	9
3.5	Comparativa de Producción hidrogeno verde .....	10
3.6	Análisis de los casos de estudio de producción de hidrogeno verde.....	12
3.6.1	Producción de Hidrógeno.....	12
3.6.2	Distribuciones Horarias .....	13
3.6.3	Distribuciones de Energía .....	15
4	Conclusiones.....	17

## 1 RESUMEN EJECUTIVO

---

HyModelica pretende establecer un modelo integral y replicable para la producción de hidrógeno electrolítico a través de la implementación de energías renovables. Este modelo busca cubrir toda la cadena de valor desde la producción inicial del hidrógeno pasando por su almacenamiento y posterior utilización para el estudio de vectores energéticos nuevos. Al ser implementado, se pretende acelerar los tiempos de estudios, así como el beneficio de cobertura de amplios panoramas para asegurar encontrar los mejores sistemas de viabilidad económica. Su comprensión abarca una amplia posibilidad de electrolizadores que ayudan a la toma de decisiones de mejores arreglos consiguiendo así una maximización de la producción de hidrógeno, así como indicadores económicos que complementan el estudio. Si bien la industria de producción de hidrógeno a nivel de la Unión Europea sigue contribuyendo significativamente a la reducción de emisiones de CO2 este proyecto encaja como una herramienta soporte al desarrollo de una economía más sostenible y respetuosa con el medio ambiente además de promover alternativas de mercado recortando los tiempos de justificación e implementación en diseño.

### 1.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO DE OPTIMIZACIÓN TÉCNICA

- Evaluar la disponibilidad de recursos renovables en la ubicación del proyecto.
- Presentar una comparativa entre diferentes tecnologías de electrolisis.
- Proponer casos de estudio con diversas capacidades de generación de electrólisis para establecer escenarios comparativos y evaluar los resultados en términos de producción de hidrógeno, consumo de recursos y eficiencia energética.
- Proveer los *inputs* necesarios para obtener indicadores de producción y viabilidad.

### 1.2 PRINCIPALES HALLAZGOS Y CONCLUSIONES

La tecnología de electrólisis alcalina presenta una mayor durabilidad en condiciones de operación normales, en comparación con la electrólisis PEM. Aunque los equipos PEM ofrecen ventajas como una menor huella espacial y mejor adaptación a la operación con energías renovables, su durabilidad y rendimiento pueden plantear riesgos para una planta del tamaño propuesto en el proyecto.

Se han identificado aquellas potencias de electrolizador que proporcionan la mayor producción de hidrógeno, para la tecnología alcalina se obtuvo un valor de 5214 kW asociado a un valor de 319.90 Toneladas de Hidrogeno por año, frente a los 5067 kW de la tecnología PEM con un valor 338 toneladas de hidrogeno por año, estas potencias de electrolizador pueden ser suplidas a través de los arreglos de equipos con potencias de 1000kW interconectados para alcanzar una

potencia lo más cercana al máximo identificado y por ende ofreciendo así de la producción de hidrógeno.

### 1.3 RECOMENDACIONES CLAVE

En cuanto a la selección de tecnología, debido al grado de definición actual del proyecto, se recomienda mantener una posición neutral y tomar la decisión una vez que se definan aspectos cruciales del proyecto y se contacten a los posibles proveedores tanto de tecnología PEM como alcalina.

Se aconseja llevar a cabo un estudio económico detallado para determinar cuál de los escenarios de capacidad de generación de electrólisis ofrece el mejor rendimiento económico, teniendo en cuenta ofertas reales de proveedores de equipos de producción de hidrógeno.

## 2 INTRODUCCIÓN

---

Dentro de las tecnologías de electrólisis a baja temperatura se encuentran la alcalina (AWE), la de membrana de intercambio de protones (PEM) y la de membrana de intercambio de aniones (AEM). Las primeras dos son las que poseen hoy en día mayor madurez tecnológica y están comercialmente disponible para potencias del orden de megavatios (MW) y las que se analizarán en este informe. Por otro lado, si bien la tecnología AEM se encuentra comercialmente disponible, solo existe un proveedor con módulos de potencia del orden de kW con una madurez tecnológica menor.

### 2.1 ELECTRÓLISIS ALCALINA – AWE

La electrólisis alcalina está establecida desde hace aproximadamente 100 años en la industria química para producir hidrógeno y otros gases como el cloro. Actualmente se generan aproximadamente 48 Mt de H<sub>2</sub> como subproducto de la producción de cloro y no todo este inventario se utiliza en aplicaciones de hidrógeno.

Las unidades actuales están disponibles en tamaños de hasta aproximadamente 5 MWe, lo que corresponde a ~ 1175 Nm<sup>3</sup>/h de producción de H<sub>2</sub>, y se combinan modularmente con múltiples unidades para capacidades mayores. Una de las instalaciones integradas más grandes se encuentra en Asuán, Egipto, con una capacidad de producción de 40,000 Nm<sup>3</sup>/h y un consumo eléctrico de 200 MW. Típicamente tienen una disponibilidad superior al 98% y un consumo de energía en intervalos entre (45 kWh por kg-H<sub>2</sub> a 60 kWh/ kg-H<sub>2</sub>), operando cerca de la presión atmosférica (aunque también existen modelos presurizados de hasta 30 bar).

## 2.2 ELECTRÓLISIS PEM

El primer electrolizador experimental fue ideado por Grubb a principios de los años cincuenta, y General Electric Co. lo desarrolló en 1966 para superar las limitaciones de la electrólisis alcalina. La tecnología de electrólisis PEM es similar a la tecnología de celdas de combustible de PEM, donde se utilizan membranas sólidas de polisulfonato (Nafion®, fumapem®) como electrolito (conductor de protones).

Estas membranas de intercambio de protones tienen muchas ventajas, como una menor permeabilidad a los gases, alta conductividad de protones y operaciones a alta presión. En términos de sostenibilidad e impacto ambiental, la electrólisis de agua PEM es uno de los métodos favorables para la conversión de energía renovable en hidrógeno de alta pureza. La electrólisis de agua PEM tiene grandes ventajas, como un diseño compacto, alta densidad de corriente ( $2 \text{ A cm}^{-2}$ ), alta eficiencia, respuesta rápida, huella pequeña, operación a temperaturas más bajas ( $< 90 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y producción de hidrógeno ultrapuro, así como la producción de oxígeno como subproducto.

## 2.3 COMPARATIVA DE TECNOLOGÍAS

En esta sección se realiza una comparativa entre ambas tecnologías en las principales características tal y como se evidencia en la Tabla 1.

Tabla 1 - Parámetros técnicos característicos de electrolizadores PEM y AWE

Característica	PEM	AWE
Temperatura	70 – 90 °C	65 - 100 °C
Presión	20 - 35 bar	15- 30 bar
Eficiencia, HHV	67 – 84 %	62 – 82 %
Voltaje por celda	1.8 – 2.4 V	1.8 – 2.4 V
Densidad de corriente	0.6 – 2 A/cm <sup>2</sup>	0.2 – 0.4 A/cm <sup>2</sup>
Tiempo de arranque en frío	15 minutos	45 minutos
Tiempo de arranque en caliente	1-10 segundos	30 segundos
Tiempo de vida Stack	< 60,000 h	< 90,000 h
Consumo eléctrico	4.5 – 7.5 kWh/Nm <sup>3</sup>	7 kWh/Nm <sup>3</sup>

En conclusión, ambas tecnologías poseen ventajas y desventajas. La elección entre PEM y alcalina dependerá de las prioridades y requisitos específicos del proyecto, incluyendo la eficiencia, la flexibilidad operativa, los costos y la disponibilidad de espacio, etc. Además, es importante destacar que cada fabricante y modelo tienen características particulares, que independientemente de la tecnología, pueden llegar a cumplir con los requisitos necesarios del proyecto. Por lo tanto, es recomendable tomar una conducta agnóstica al momento de seleccionar la tecnología y tomar la decisión una vez que las condiciones de borde del proyecto se hayan definido (energía eléctrica proveniente de red o de renovables dedicadas, producción de H<sub>2</sub> objetivo, terrenos disponibles, etc.) y se hayan contactado con los potenciales proveedores.

### 3 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

---

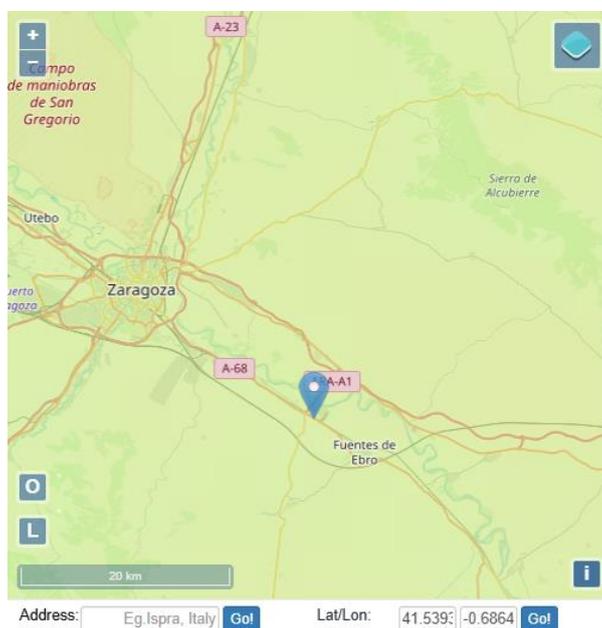
#### 3.1 SUPOSICIÓN DE DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Se propone un caso de estudio inspirado en un proyecto publicado en el Boletín Oficial de Aragón en 2021.

La planta de hidrógeno verde contará con una capacidad de 60 MW alimentada por energía 100% renovable de los parques eólicos y fotovoltaicos. Esta energía se destinará a varios fines: como materia prima para la producción industrial de hidrógeno, como combustible limpio para autobuses de hidrógeno, almacenamiento y vertido a la red eléctrica general.

#### 3.2 ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD DE RECURSO RENOVABLE

Para la cuantificación de indicadores de producción y viabilidad se optará por el análisis en una fase inicial del proyecto, identificando un 10% de la energía proveniente de fuentes eólica o su equivalente a 4 MW y un valor del 25% de la energía fotovoltaica total es decir 2.9MW. Si bien la instalación cuenta con una proyección de ampliación, la implementación de una construcción establecida por fases de instalación en función de la capacidad total ofrece una estructura organizada y fiable de la puesta en marcha.



Estos datos de partida dan paso al estudio del recurso renovable disponible para las instalaciones descritas para cada hora de un año la energía disponible a través los sistemas renovables registrados para el año 2019.

Para el análisis de recurso fotovoltaico disponible, se ha usado la base de datos de *PVGIS* ([https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)), donde se ha modelado el sistema de tipo fijo, con orientación e inclinación optimizadas en una estructura fija, una implementación de tecnología de carbono-silicio y con pérdida del 14% a efectos de producción. El análisis de recurso eólico se ha utilizado la base de datos de *Renewables Ninja* (<https://www.renewables.ninja/>), considerando turbinas de modelo Vestas V90 2000, altura de 80 metros para suplir la necesidad equivalente a la potencia estipulada anteriormente.

- Se modela la disponibilidad de energía según los recursos disponibles (sol y viento) hora por hora durante todo un año (2019).

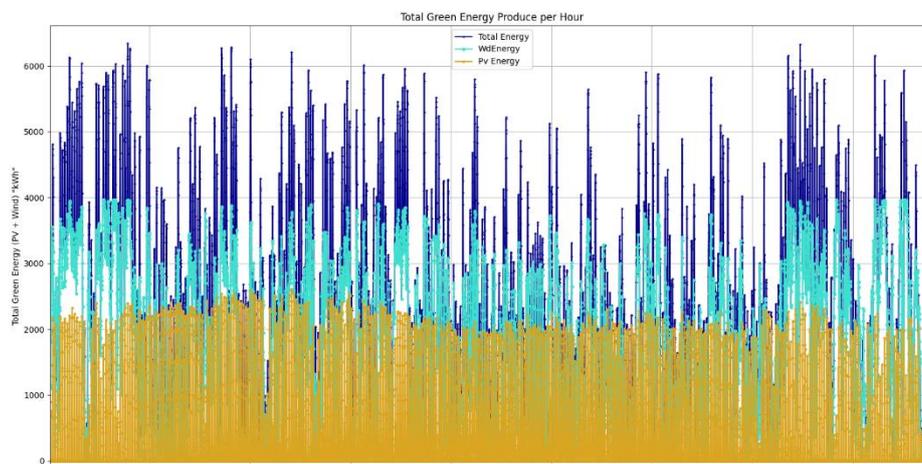


Gráfico 1: Producción de Energía Renovable total (Azul) a través de las tecnologías fotovoltaica (Amarillo) y eólica (Cian) para el periodo de un año proveniente de HyModelica

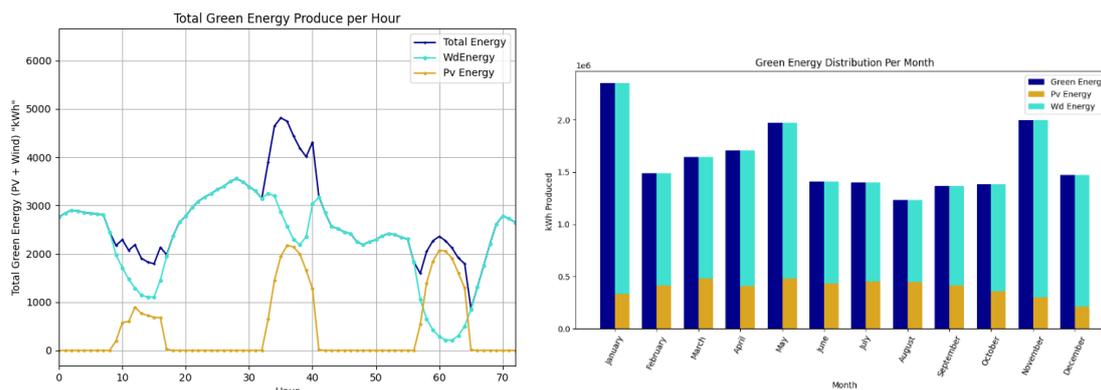


Gráfico 2: A. Distribución de primeras 72 horas de producción de EERR, B. Distribución mensual de EERR proveniente de HyModelica

### 3.3 CONDICIONES DE LOS CASOS DE ESTUDIO DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO

Finalmente, se proponen las siguientes hipótesis o condiciones para el modelado técnico de la generación de hidrógeno renovable:

- Carga parcial mínima del electrolizador: 1 MW. Como se ha expresado anteriormente, se parte de la suposición de que el sistema entrará a operar cuando pueda operar al menos un módulo a carga nominal.
- El campo fotovoltaico tiene un 14% de pérdidas en el sistema (pérdidas en cables, inversores de potencia, suciedad en los módulos, etc.).

- La electricidad renovable se destina únicamente a la generación de hidrógeno. No hay vertido a red. En el futuro, cuando se modele económicamente la operación, podría considerarse la venta de excedentes eléctricos para el modelo de negocio, si confirma que esta posibilidad puede producirse. De lo contrario, se modelará como *curtailment*, descrito como un escenario conservador actualmente. No obstante, la trazabilidad está disponible dentro de HyModelica para la cuantificación de flujos de energía en caso de ser necesario.
- El electrolizador es alimentado por un campo PV y eólico de manera directa. Existe la electrónica de potencia asociada para posibilitar técnicamente la operación y se ha considerado un banco de baterías para absorber los transitorios (10 minutos).

### 3.4 PRESENTACIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO DE PRODUCCIÓN DE HIDROGENO VERDE

HyModelica incorpora diferentes módulos para el dimensionamiento de estaciones de producción de hidrógeno mediante el uso de Energías Renovables, este proceso está segmentado con el fin de cumplir diferentes objetivos, inicialmente el Módulo 01 busca encontrar la potencia máxima de electrolizador bajo el cual para el parque definido se identifica la máxima producción de hidrógeno, proceso que incorpora la evaluación de diferentes tecnologías de producción de hidrógeno como se muestra a continuación:

#### 3.3.1 ANALISIS CON ELECTROLIZADOR TIPO PEM

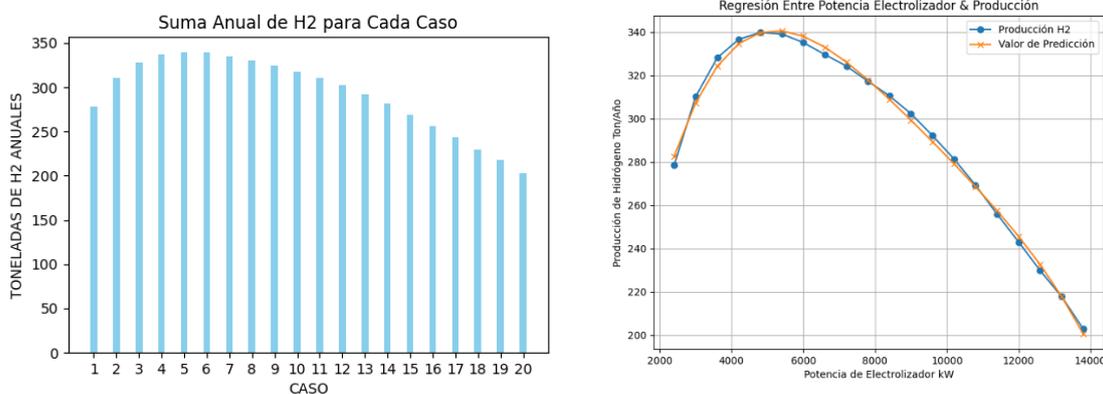


Gráfico 3: Producción de toneladas de hidrogeno anuales por número de casos de estudio B. Producción de toneladas de hidrogeno anuales por potencia nominal

Se observa en la Gráfico 5 obtenida a través del uso de la herramienta de HyModelica que el caso 4 correspondiente a una potencia nominal de electrolizador de 4800 kW genera una producción máxima de hidrogeno de 339.08 kg, al observar la predicción que se genera al graficar Potencia vs Producción de hidrogeno, es posible identificar el correspondiente valor máximo de hidrógeno a través de la derivada de dicha predicción, resultó que a una potencia nominal de 5067 kW genera una producción de hidrogeno de 338 toneladas/año lo que representa 926 Kg/día de hidrógeno verde.

### 3.3.1 ANALISIS CON ELECTROLIZADOR TIPO AWE

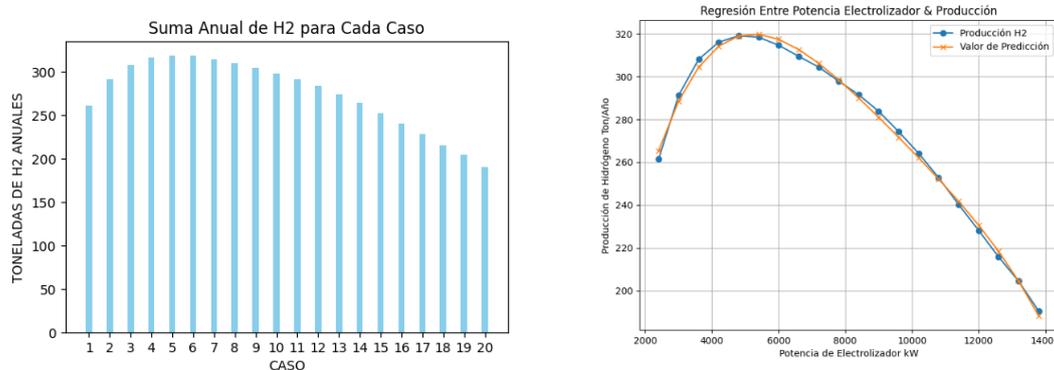


Gráfico 4: A. Producción de toneladas de hidrogeno anuales por número de casos de estudio B. Producción de toneladas de hidrogeno anuales por potencia nominal

Se observa en la Gráfico 8 obtenida a través del uso de la herramienta de HyModelica que el caso 4 el cual corresponde a una potencia nominal en el electrolizador de 5400 kW genera una producción máxima de hidrogeno de 318.04 Kg. En consecuencia, la predicción que se genera al graficar Potencia vs Producción de hidrogeno con la finalidad de identificar el valor máximo por medio de la derivada de dicha ecuación, resultó en una potencia nominal de 5214 kW y en relación con ello una producción de hidrogeno de 319.90 toneladas/año lo que representa 876.4275 kg/día de hidrogeno verde.

### 3.5 COMPARATIVA DE PRODUCCIÓN HIDROGENO VERDE

En el análisis comparativo entre los diferentes casos de estudio, se han observado notables diferencias en la capacidad de generación de electrólisis con los dos tipos de membrana y, en consecuencia, en la producción de hidrógeno.

La diferencia entre el caso de estudio 1 y el caso de estudio 3 representa una variación 2400kW de potencia instalada del sistema de electrólisis, lo que se traduce en una diferencia de

producción entre 28.92 y 27.83 toneladas al año para la membrana de PEM y AWE respectivamente, que es una diferencia equivalente al 1.09 toneladas en ambos casos de la producción total. Por otro lado, entre el caso de estudio y el caso de estudio 4, la variación es aún más significativa, con una diferencia de **3000 kW** de potencia instalada del sistema de electrólisis y una diferencia de entre 24.95 y 23.45 toneladas de producción, lo que representa una diferencia del 1.5 toneladas de la producción en ambos casos. Por último, entre el caso de estudio 3 y el caso de estudio 5, representa una variación de 1800 KW de potencia instalada del sistema de electrólisis y una diferencia de entre 14.83 y 14.58 toneladas de producción, dependiendo de la tecnología, equivalente a una diferencia de producción del 0.25.

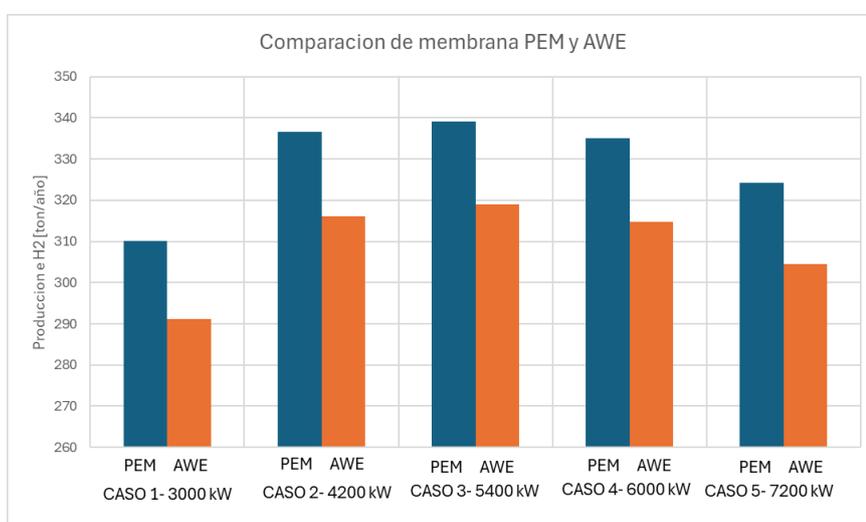


Gráfico 5: Comparación de producción de hidrogeno por medio de diferentes casos de estudio contiguo a al valor máximo de producción de hidrogeno para los dos tipos de membrana.

Al identificado el escenario de producción máxima, próximo al caso 3, se puede apreciar que a potencias nominales mayores la producción de hidrogeno va bajado debido a que no se contara con la energía suficiente para suplir este rango, y por el contrario en potenciales nominales menores al caso 3, se puede apreciar que la producción de hidrogeno verde va en aumento progresivo.

Si bien se ha identificado el escenario de producción máxima, es esencial llevar a cabo el estudio económico correspondiente para determinar cuál de los escenarios presenta el mayor rendimiento económico, asegurando así una toma de decisiones informada y optimizada en el proyecto de generación de hidrógeno.

### 3.6 ANÁLISIS DE LOS CASOS DE ESTUDIO DE PRODUCCIÓN DE HIDROGENO VERDE

Tras la culminación del primer módulo de dimensionamiento de Producción de Hidrogeno, se encuentran los valores de máxima producción de hidrógeno tanto para las tecnologías AWE como PEM, dicho esto, al implementar el Módulo 02 de HyModelica es posible comprender en mayor medida distribuciones adicionales a la producción de Hidrogeno, valores económicos como distribuciones de energía otorgan un panorama de visualización adecuado para la toma de decisiones dentro de la ejecución del proyecto.

#### 3.6.1 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

La producción de hidrógeno en el módulo 02 de HyModelica, comprende la inclusión de variables de degradación a lo largo de la cadena de producción de hidrógeno, lo que proporciona una versión realista para cada uno de los años del proyecto, este proceso ha de considerar que a medida que una instalación está en operación el desgaste intrínseco conlleva a la necesidad de actuaciones como el cambio del electrolizador representado por los cambios de pendientes del Gráfico 5, este apartado incluye la identificación del año de reemplazo de electrolizador tras un periodo de horas de operación estipulado, así como el costo en Valor Presente necesario para dicha operación. Este proceso se puede observar en las Tabla 2 y Tabla 3

Tabla 2: Producción de hidrógeno Ton/Año para diferentes potencias de electrolizador.

Año	Ely-01	Ely-02	Ely-03	Ely-04	Ely-05	Ely-06	Ely-07	Ely-08	Ely-09	Ely-10	Ely-11
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.0	142.79	189.72	230.8	264.97	291.5	310.94	324.24	332.75	337.45	339.96	340.88
2.0	142.58	189.41	230.36	264.42	290.82	310.15	323.29	331.72	336.29	338.81	339.65
3.0	142.14	188.77	229.48	263.31	289.43	308.54	321.4	329.68	334.12	336.56	337.2
4.0	141.47	187.79	228.2	261.63	287.37	306.12	318.62	326.53	330.86	333.06	333.68
5.0	140.56	186.48	226.5	259.35	284.57	302.86	314.88	322.48	326.53	328.57	329.13
6.0	139.45	184.89	224.37	256.61	281.16	298.79	310.32	317.37	321.23	323.05	323.39
7.0	138.15	182.95	221.83	253.33	277.13	293.96	304.85	311.42	314.83	316.46	316.68
8.0	136.55	180.72	218.86	249.52	272.4	288.25	298.42	304.48	307.53	309.83	308.64
9.0	139.81	184.83	223.47	254.28	276.93	291.28	291.28	296.66	299.28	300.47	299.81
10.0	137.77	181.91	219.53	249.22	270.65	288.09	296.96	301.85	304.23	305.04	303.86
11.0	137.33	181.06	218.03	246.75	267.25	283.61	291.66	295.91	298.0	298.4	296.63
12.0	136.69	179.85	216.08	243.73	263.07	278.18	285.36	289.15	290.78	290.41	288.47
13.0	135.74	178.28	213.57	240.0	258.01	271.84	278.1	282.37	281.17	281.86	279.23
14.0	134.61	176.35	210.6	235.77	252.21	264.75	270.11	272.63	273.41	272.14	269.06
15.0	133.19	174.09	207.11	230.65	245.73	256.83	261.38	263.46	263.34	261.46	258.18

Tabla 3: Producción de hidrógeno Acumulada Ton/Año para diferentes potencias de electrolizador.

Año	Ely-01	Ely-02	Ely-03	Ely-04	Ely-05	Ely-06	Ely-07	Ely-08	Ely-09	Ely-10	Ely-11
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.0	142.79	189.72	230.8	264.97	291.5	310.94	324.24	332.75	337.45	339.96	340.88
2.0	285.37	379.13	461.16	529.39	582.32	621.09	647.53	664.47	673.74	678.77	680.53
3.0	427.51	567.9	690.64	792.7	871.75	929.63	968.93	994.15	1007.86	1015.33	1017.73
4.0	569.98	755.69	918.84	1054.33	1159.12	1235.75	1287.55	1320.68	1338.72	1348.39	1351.41
5.0	709.54	942.17	1145.34	1313.68	1443.69	1538.61	1602.43	1643.16	1665.25	1678.96	1680.54
6.0	848.99	1127.06	1369.71	1570.29	1724.85	1837.4	1912.75	1960.53	1986.48	2000.01	2003.93
7.0	987.14	1310.01	1591.54	1823.62	2001.98	2131.36	2217.6	2271.95	2301.31	2316.47	2320.61
8.0	1123.69	1490.73	1810.4	2073.14	2274.38	2419.61	2516.02	2576.43	2600.04	2620.25	2620.25
9.0	1263.5	1675.56	2033.87	2327.42	2551.31	2701.54	2807.3	2872.09	2900.12	2925.97	2929.06
10.0	1401.27	1857.47	2253.4	2576.64	2821.96	2989.63	3104.26	3174.94	3212.35	3231.01	3232.92
11.0	1538.6	2038.53	2471.43	2823.39	3089.21	3273.24	3395.92	3470.85	3510.35	3529.41	3529.55
12.0	1675.29	2218.38	2687.51	3067.12	3352.28	3551.42	3681.28	3760.0	3801.13	3819.02	3818.02
13.0	1811.03	2396.66	2901.08	3307.12	3610.29	3823.26	3959.38	4041.17	4083.5	4101.68	4097.25
14.0	1945.64	2573.01	3111.68	3542.82	3862.5	4088.01	4229.49	4313.8	4356.91	4373.82	4366.31
15.0	2078.83	2747.1	3318.79	3773.47	4108.23	4344.84	4490.87	4577.26	4620.25	4635.28	4624.49

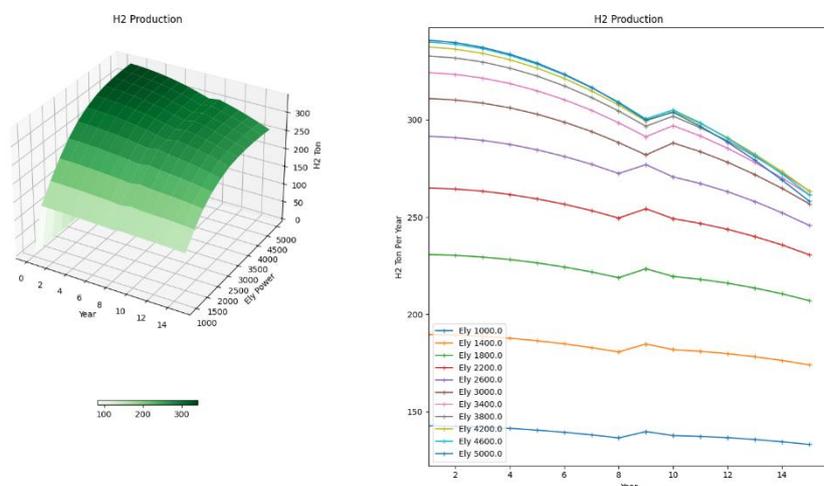


Gráfico 5 Perfiles de producción de hidrógeno para diferentes potencias de electrolizador.

### 3.6.2 DISTRIBUCIONES HORARIAS

A lo largo de la producción de hidrógeno es posible cuantificar las horas equivalentes de estaco activo de operación, horas acumuladas tras la finalización de año calendario, así como el desgaste acumulado del electrolizador tras la finalización de un año calendario este desgaste se ve directamente relacionado con la eficiencia del equipo y como el consumo eléctrico va aumentando con el paso del tiempo para suplir dicha demanda de producción, este proceso de cuantificación de operación permite la predicción del periodo indicado para el cambio de electrolizador y su impacto en los Costos de precio de hidrógeno (LCOH) al aportar en mayor medida los costos de operación.

Tabla 4: Porcentaje de Horas Acumuladas equivalente obtenida a través del uso de HyModelica

% Horas Acumuladas Equivalentes											
AÑO	Ely-01	Ely-02	Ely-03	Ely-04	Ely-05	Ely-06	Ely-07	Ely-08	Ely-09	Ely-10	Ely-11
0.0	39.561	52.564	63.944	73.411	80.762	86.148	89.832	92.19	93.493	94.187	94.444
1.0	39.561	52.564	63.944	73.411	80.762	86.148	89.832	92.19	93.493	94.187	94.444
2.0	39.638	52.657	64.043	73.513	80.853	86.229	89.881	92.225	93.497	94.196	94.432
3.0	39.79	52.847	64.247	73.718	81.03	86.393	89.983	92.301	93.544	94.226	94.487
4.0	40.019	53.128	64.561	74.021	81.303	86.684	90.142	92.381	93.686	94.220	94.484
5.0	40.325	53.582	64.98	74.488	81.645	86.89	90.339	92.517	93.681	94.265	94.427
6.0	40.714	53.974	65.507	74.918	82.089	87.234	90.596	92.659	93.785	94.315	94.414
7.0	41.184	54.542	66.133	75.533	82.628	87.645	90.889	92.85	93.866	94.351	94.415
8.0	41.728	55.215	66.87	76.241	83.226	88.072	91.181	93.031	93.961	94.42	94.381
9.0	42.355	55.994	67.781	77.04	83.896	88.59	91.527	93.217	94.04	94.414	94.287
10.0	43.078	56.874	68.643	77.921	84.621	89.136	91.881	93.395	94.13	94.382	94.016
11.0	43.894	57.866	69.689	78.863	85.415	89.782	92.247	93.592	94.252	94.379	93.82
12.0	44.811	58.972	70.846	79.908	86.247	90.254	92.586	93.815	94.345	94.224	93.595
13.0	45.812	60.168	72.077	81.007	87.081	90.794	92.884	93.909	94.389	94.139	93.262
14.0	46.93	61.484	73.426	82.176	87.935	91.345	93.195	94.065	94.335	93.895	92.835
15.0	48.136	62.921	74.859	83.368	88.813	91.864	93.491	94.236	94.193	93.518	92.347

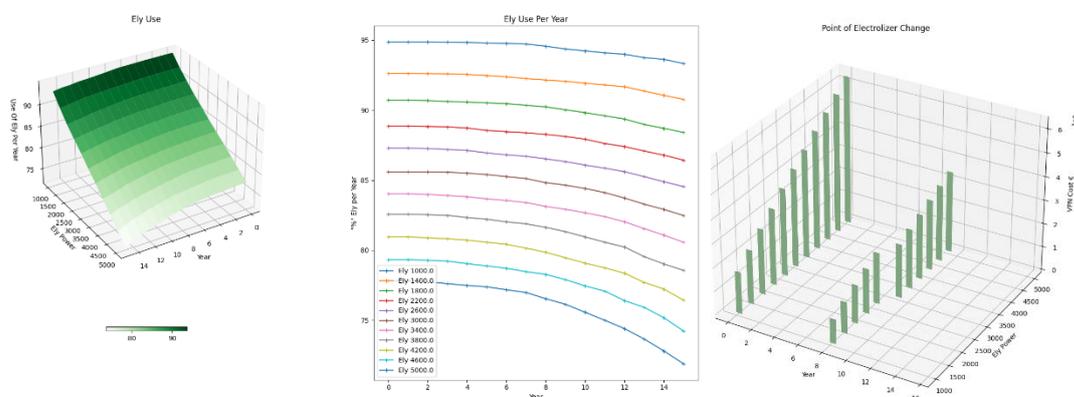


Gráfico 6: Porcentaje de Uso y línea temporal de cambio de banco de electrolizador por desgaste intrínseco

Tras la cuantificación de los flujos de producción de hidrógeno, es posible cuantificar calores nivelados tanto para las energías como para la producción de hidrógeno, estos valores calculados para diferentes valores de electrolizador proporcionan un impacto decisivo durante la selección del electrolizador.

Tabla 5: Indicadores económicos obtenidos a través del módulo O2 de HyModelica.

Potencia Electrolizador kW	€ Energía Fotovoltaica	€ Energía Eólica	€ Producción		Indicadores de Venta		
	LCO-E-Pv	LCO-E-Wd	LCO-E-Ope	LCO-H €/kgH2	Precio Venta €	Beneficio €	Margen de Venta
1000	0,436	1,427	2,199	4,062	5,5	1,438	26%
1400	0,37	1,328	2,153	3,851	5,5	1,649	30%
1800	0,325	1,307	2,164	3,796	5,5	1,704	31%
2200	0,288	1,328	2,225	3,841	5,5	1,659	30%
2600	0,262	1,312	2,33	3,904	5,5	1,596	29%
3000	0,244	1,281	2,409	3,934	5,5	1,566	28%
3400	0,233	1,252	2,574	4,059	5,5	1,441	26%
3800	0,225	1,228	2,762	4,215	5,5	1,285	23%
4200	0,219	1,206	2,967	4,392	5,5	1,108	20%
4600	0,215	1,185	3,185	4,585	5,5	0,915	17%
5000	0,212	1,166	3,417	4,795	5,5	0,705	13%

Obteniendo valores nivelados, vemos como el valor de LCO-H para este caso oscila entre los 3,841 €/kgH2 a 4,795 €/kgH2 estos valores se distribuyen en tres grupos principales, el costo de energía proveniente de energía fotovoltaica como eólica, el costo de operación que cuantifica el valor de cambio de Stack, proceso de compresión, costos de insumos entre otras variables. No obstante, referenciado un

precio de venta de 5.5 €/kgH<sub>2</sub> es posible obtener beneficio en la totalidad de los casos siendo el electrolizador de 1800 kW de potencia el de mayor margen de beneficios con un 31%. No obstante, es importante recalcar que para este electrolizador representa una menor producción de hidrógeno a lo largo de los 15 años de estudio.

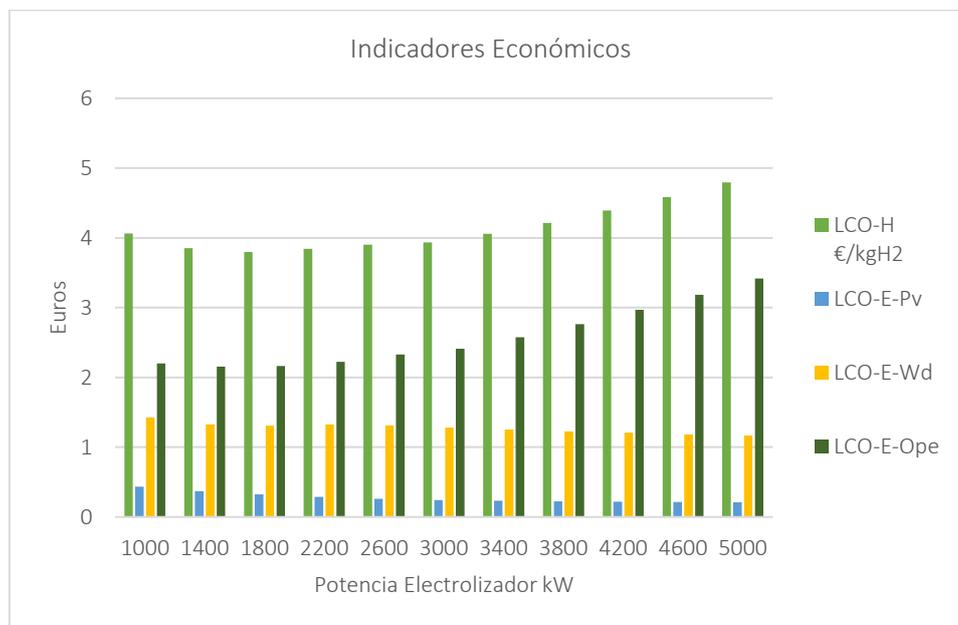


Gráfico 7: Desglose de LCO-H a través de las energías de fotovoltaicas, eólica y costos operaciones

### 3.6.3 DISTRIBUCIONES DE ENERGÍA

La trazabilidad de la energía es vital durante el desarrollo del proceso, cuantificar la dirección y el uso de las energías renovables otorga la posibilidad de cuantificar ventas de energía a red, e incluso la posibilidad de priorización de fuentes de energía de acuerdo con sus costos, en **Gráfico 8** se representa tan solo la distribución general del uso y gestión de la energía, no obstante, dentro de HyModelica es posible cuantificar los valores de uso, energía libre, indicadores de medias de uso, picos de producción entre un sinnúmero de variables que describen el uso de la energía, factores decisivos frente al uso de tecnologías y distribuciones dentro de las instalaciones de energías renovables.

AÑO	PV-Anual	WD-Anual
0.0	0.0	0.0
1.0	4730.195	14675.027
2.0	4723.1	14639.807
3.0	4708.931	14569.536
4.0	4687.741	14464.635
5.0	4659.614	14325.775
6.0	4624.667	14153.866
7.0	4583.045	13950.05
8.0	4534.923	13715.689
9.0	4480.504	13452.348
10.0	4420.017	13161.777
11.0	4353.717	12845.894
12.0	4281.881	12506.763
13.0	4204.807	12146.568
14.0	4122.813	11767.595
15.0	4036.234	11372.204

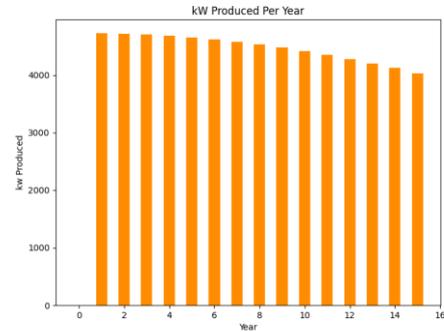
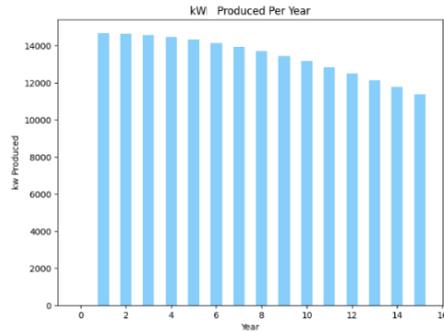


Gráfico 8: producción de Energía para A. Eólica B. Fotovoltaica durante la vida del proyecto

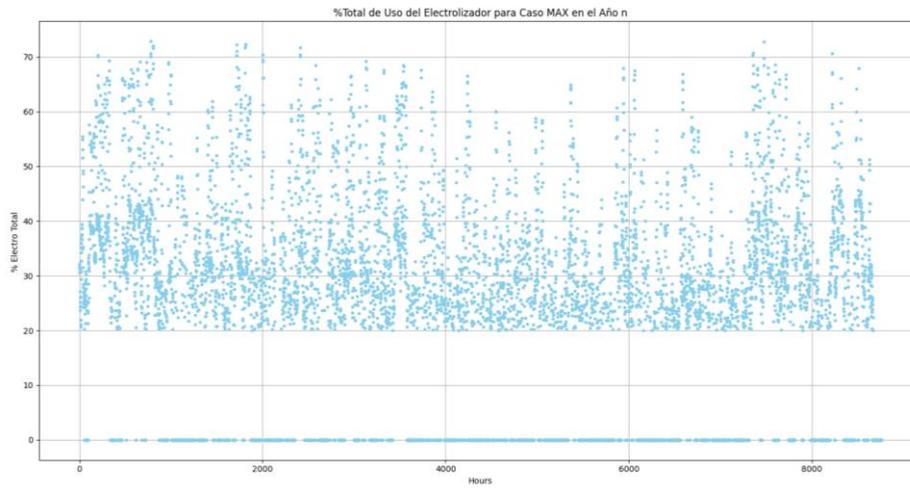


Gráfico 9: Perfil de operación de electrolizador de máxima potencia y año n. dentro de la simulación de HyModelica

#### 4 CONCLUSIONES

---

A lo largo de este caso de estudio se han identificado las mejores potencias de electrolizador para llevar a cabo la producción de hidrógeno mediante dos principales tecnologías, AWE y PEM, los valores obtenidos para este hipotético caso de estudio tienen por propósito enseñar alguna de los datos obtenidos a partir de la herramienta HyModelica. Esta herramienta desarrollada dentro de los programas Agrupaciones Empresariales Innovadoras AEIs financiadas por la Unión Europea y su programa Next Generation.

La suposición del proyecto cuenta con una instalación eólica equivalente a 4 MW y un valor potencia instalada de la energía fotovoltaica de 2.9MW. Con ello, es posible obtener valores de entre 28.92 y 27.83 toneladas al año para la membrana de PEM y AWE con las correspondientes potencias de 5400kW de electrolizador. Además de ello la proyección de valores de LCO-H de hidrógeno, para las estimaciones consideradas, resulta de 4.765 €/kgH<sub>2</sub>.

HyModelica representa una opción viable de desarrollo de dimensionamiento de estaciones de producción de hidrógeno a partir de energías renovables, este tipo de estudios buscan la optimización de tiempos de compresión y procesos de abstracción de variables de proceso para el diseño de instalaciones de hidrógeno. Si bien su modularidad representa una ventaja competitiva al momento de identificar aquellos parámetros de mayor impacto lo que resulta en la búsqueda y resolución de casos de estudio.