



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Escuela de Ingenierías Industriales

**Análisis tecno-económico de la integración de un
electrolizador en un hospital**

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de la Energía

AUTOR/A: Tejero Gómez, Javier

Tutor/a: Atienza Márquez, Antonio

Cotutor/a: Del Barrio Álvarez, Daniel

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025

Índice General

Resumen	IX
Abstract	XI
Agradecimientos	XIII
1 Introducción	1
1.1. Contexto actual.....	2
1.1.1 Demanda Energética.....	2
1.1.2 Agenda 2030 y Acuerdo de París.....	5
1.2 Motivaciones.....	6
1.3 Objetivos.....	6
2 Estado del arte	7
2.1 Integración de sistemas de hidrógeno en edificios.....	8
2.2 Aplicaciones en hospitales y producción de oxígeno.....	9
2.3 Desafíos y perspectivas futuras.....	10
3 Sistemas híbridos solar-hidrógeno	13
3.1 Hidrógeno.....	14
3.1.1 Métodos de obtención.....	14
3.1.2 Electrólisis.....	16
3.1.3 Electrolizadores.....	17
3.2 Energía solar fotovoltaica.....	20
4 Modelización	23
4.1 Emplazamiento y demanda eléctrica del hospital.....	24
4.2 Diseño de la instalación fotovoltaica.....	28
4.2.1 Instalación fotovoltaica de la cubierta.....	28
4.2.2 Instalación fotovoltaica de la zona de aparcamientos.....	31
4.3 Curvas de consumo y producción.....	33
4.3.1 Producción fotovoltaica.....	33
4.3.2 Curvas horarias.....	34
4.4 Diseño del electrolizador.....	36
5 Análisis tecno-económico	41
5.1 CAPEX y OPEX.....	44

5.2	Evaluación técnica de escenarios	47
5.2.1	Escenario 1: Priorización de la rentabilidad (TIR)	47
5.2.2	Escenario 2: Priorización de la producción de H ₂	49
5.2.3	Escenario 3: Enfoque equilibrado	50
5.3	Conclusiones.....	51
6	Bibliografía	55

Índice de figuras

Figura 1.1: Demanda energética 1900-2023, Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024)	3
Figura 1.2: Proyección del consumo de energía por región (2015-2050), Enerdata	4
Figura 1.3: Agenda 2030, Naciones Unidas	5
Figura 2.1: Esquema del sistema energético Yin et al. (2023).	10
Figura 3.1: Electrolizador PEM International Journal of Hydrogen Energy (2019)	17
Figura 3.2: Principio de funcionamiento de un electrolizador alcalino, S.Shiva Kumar & H.Lim (2022)	18
Figura 3.3: Principio de funcionamiento de un electrolizador SOE, Shiva Kumar & V.Himabindu (2019)	19
Figura 3.4: Efecto fotovoltaico en una célula solar, Ashraf Kalil (2004)	20
Figura 3.5: Estructura básica de un módulo fotovoltaico	21
Figura 4.1: Cartografía catastral del Hospital Materno-Infantil de Málaga	25
Figura 4.2: Curva de consumo Hospital la Axarquía	27
Figura 4.3: Curva de consumo Hospital Materno-Infantil	27
Figura 4.4: Simulación HelioScope Cubierta Hospital	29
Figura 4.5: Sombreado HelioScope Cubierta Hospital	29
Figura 4.6: Pérdidas HelioScope Cubierta Hospital	30
Figura 4.7: Simulación HelioScope Aparcamientos Hospital	31
Figura 4.8: Sombreado HelioScope Aparcamientos Hospital	32
Figura 4.9: Pérdidas HelioScope Aparcamientos Hospital	32
Figura 4.10: Producción fotovoltaica anual	33
Figura 4.11: Curva horaria de abril	34
Figura 4.12: Curva horaria de enero	34
Figura 4.13: Curva horaria de agosto	35
Figura 4.14: Matriz de disponibilidad horaria	36
Figura 4.15: Resultados simulación abril	38
Figura 5.1: Interfaz de entrada de la simulación	43
Figura 5.2: Interfaz de resultados de la simulación	43
Figura 5.3: Resultados escenario 1	48
Figura 5.4: Porcentaje de carga medio anual del electrolizador escenario 1	48

Figura 5.5: Resultados escenario 2	49
Figura 5.6: Porcentaje de carga medio anual del electrolizador escenario 2.....	50
Figura 5.7: Resultados escenario 3	50
Figura 5.8: Porcentaje de carga medio anual del electrolizador escenario 3.....	51

Índice de tablas

Tabla 4.1: Indicadores energéticos AIEH	26
Tabla 4.2: Datos simulación abril	37
Tabla 5.1: Inversión inicial (CAPEX)	46
Tabla 5.2: Costes de mantenimiento (OPEX).....	47

Índice de expresiones

(3.10): Reacción de reformado de metano con vapor de agua	15
(3.2): Reacción de desplazamiento del gas de agua (WGS).....	15
(3.3): Reacción global del reformado de vapor	15
(3.4): Reacción general de electrólisis.....	17
(5.1): Ecuación del coste de inversión aproximado para un electrolizador.....	44

Resumen

El cambio climático, impulsado por el calentamiento global, es una de las mayores amenazas para la humanidad. Este fenómeno es consecuencia del aumento de gases de efecto invernadero, como el CO₂, generado por la quema de combustibles fósiles. El incremento de las temperaturas ha llevado a una urgente necesidad de descarbonización mediante el uso de energías limpias y renovables, en línea con el Acuerdo de París y la Agenda 2030.

En este contexto, el hidrógeno verde se posiciona como un pilar clave en la transición energética. La Agencia Internacional de Energía (AIE) advierte que, si no se reducen los combustibles fósiles, el calentamiento global se agravará para 2050. Por ello, las energías renovables están ganando protagonismo frente al petróleo y el gas, impulsadas por normativas que aceleran la transición energética.

La crisis energética derivada de la invasión de Ucrania ha evidenciado la necesidad de autonomía energética en Europa. La Unión Europea ha reforzado sus estrategias para reducir la dependencia de los combustibles fósiles rusos y fomentar el hidrógeno verde como parte de su modelo energético para 2050. La cooperación entre países es clave para garantizar la seguridad y sostenibilidad energética.

El hidrógeno verde, además, permite la interconexión entre sectores energéticos, promoviendo flexibilidad y resiliencia. Su combinación con energías renovables optimiza su aprovechamiento y acelera la transición hacia un modelo sostenible. Así, se avanza hacia un mix energético equilibrado, eficiente y respetuoso con el medio ambiente.

Palabras clave: *Hidrógeno, transición energética, Electrolizador, Energías renovables, Descarbonización, Sostenibilidad*

Abstract

Climate change, driven by global warming, is one of the greatest threats to humanity. This phenomenon is a consequence of the increase in greenhouse gases, such as CO₂, generated by the burning of fossil fuels. The rise in global temperatures has led to an urgent need for decarbonization using clean and renewable energy sources, in line with the Paris Agreement and the 2030 Agenda.

In this context, green hydrogen is emerging as a key pillar in the energy transition. The International Energy Agency (IEA) warns that if fossil fuel consumption is not significantly reduced, global warming will worsen by 2050. Consequently, renewable energy sources are gaining prominence over oil and gas, driven by regulations aimed at accelerating the energy transition.

The energy crisis resulting from Russia's invasion of Ukraine has highlighted the need for energy autonomy in Europe. The European Union has strengthened its strategies to reduce dependence on Russian fossil fuels and to promote green hydrogen as a fundamental component of its energy model for 2050. International cooperation is essential to ensure energy security and sustainability.

Furthermore, green hydrogen facilitates the interconnection of different energy sectors, enhancing flexibility and resilience. Its integration with renewable energy optimizes resource utilization and accelerates the transition towards a sustainable model. This approach contributes to achieving a balanced, efficient, and environmentally friendly energy mix.

Key words: Hydrogen, Energy transition, Electrolyser, Renewable energy, Decarbonization, Sustainability.

Agradecimientos

Quiero mostrar mi agradecimiento a mi familia, en especial a mis padres y mi hermano, por apoyarme incondicionalmente y brindarme la oportunidad de estudiar una carrera.

También quiero dar las gracias a Antonio Atienza Márquez por su gran desempeño como tutor y por transmitir un afán constante por la investigación y el desarrollo de tecnologías del hidrógeno.

Por último, quiero agradecer a Diego, Ángel y Javi el hacer de mi una persona mucho más competente.

Muchas gracias.

1 Introducción

Desde que tenemos constancia de la existencia del ser humano hasta la actualidad, el progreso continuo y la aspiración de construir una sociedad más compleja y desarrollada han sido aspectos característicos de nuestra especie. Esta evolución ha estado marcada por hitos tecnológicos que han dado lugar a la construcción de civilizaciones más avanzadas. Desde el dominio de la agricultura, que aseguró la estabilidad alimentaria, hasta la Revolución Industrial, que impulsó el crecimiento exponencial de la producción y el comercio.

El desarrollo humano ha estado estrechamente ligado a la capacidad de dominar nuevas fuentes de energía. El descubrimiento y uso de combustibles fósiles, como el carbón y, posteriormente, el gas natural y el petróleo, dieron lugar a una era de crecimiento sin precedentes. Sin embargo, la dependencia y el abuso de este tipo de energías han generado graves problemas ambientales, entre ellos el cambio climático, que, junto con la creciente demanda mundial de energía, ha desencadenado en una crisis energética. A medida que las reservas de combustibles fósiles disminuyen, los efectos del calentamiento global se hacen más evidentes y los conflictos geopolíticos impactan cada vez más en el mercado energético, la búsqueda de fuentes de energía sostenibles y menos dependientes se ha convertido en una prioridad global.

En las últimas décadas, los avances científicos y tecnológicos han permitido el desarrollo de energías renovables, destacando la solar, la hidráulica y la eólica. Estas fuentes han demostrado ser soluciones viables para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la diversificación del sistema energético. No obstante, su naturaleza intermitente y la dificultad de almacenamiento de la energía generada han planteado nuevos desafíos que requieren soluciones innovadoras y complejas.

En este contexto, el hidrógeno ha emergido como una alternativa clave en la transición energética. Este elemento tiene la capacidad de almacenar y transportar energía de manera eficiente, y destaca por su gran versatilidad en aplicaciones industriales, de transporte y generación de electricidad, convirtiéndose en un vector energético fundamental para la descarbonización.

El hidrógeno verde, producido mediante electrólisis del agua, un proceso en el que se separa el hidrógeno del oxígeno utilizando energía eléctrica, es una opción sostenible siempre que dicha energía provenga de fuentes renovables. Su capacidad de integrarse en numerosos sectores lo convierte en una solución viable para reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

1.1. Contexto actual

1.1.1 Demanda Energética

La demanda energética mundial ha mantenido un crecimiento constante desde principios del siglo XX, impulsada por factores como el aumento de la población, el desarrollo

industrial y el avance tecnológico. En la Figura 1.1, elaborada por el Instituto de la Energía (EI), se refleja esta evolución en función de las fuentes de energía utilizadas hasta la actualidad.

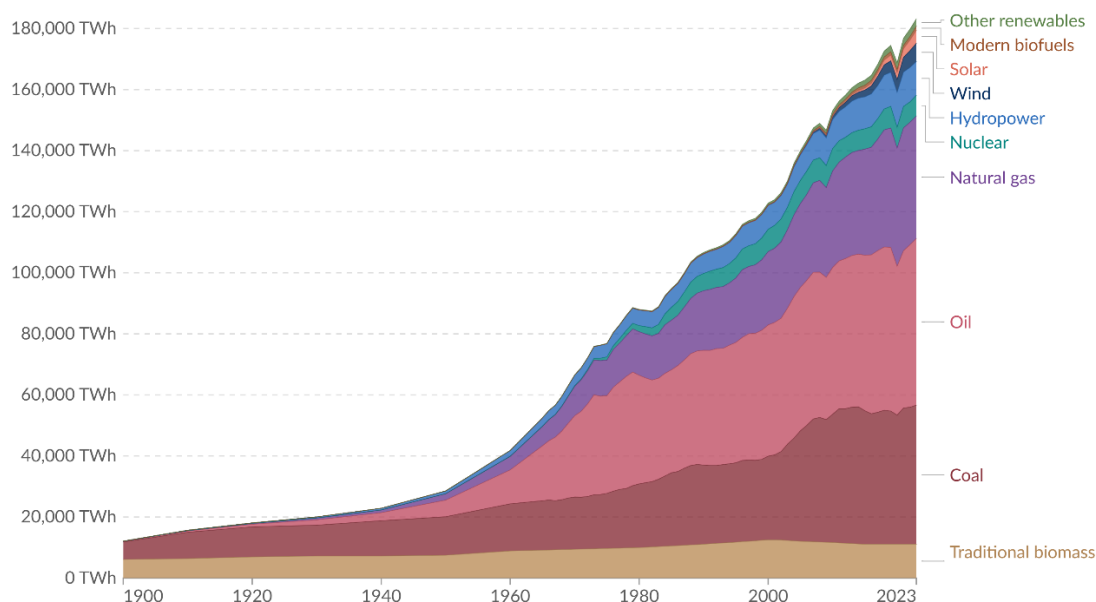


Figura 1.1: Demanda energética 1900-2023, Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024)

Como se observa, la demanda energética ha seguido una tendencia creciente, con un notable incremento a partir de la década de 1950, cuando el consumo de energía comenzó a dispararse a un ritmo acelerado. Este aumento ha sido abastecido, en su mayoría, por fuentes fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural. No es hasta principios de la década de 1980 cuando las energías renovables empiezan a ganar protagonismo, hasta alcanzar la situación actual, en la que representan aproximadamente un 20% del consumo energético global. La demanda total de energía sigue aumentando a un ritmo anual del 1% al 2%. Esto supone un doble desafío para las fuentes renovables: por un lado, deben satisfacer el incremento anual de la demanda, y por otro, deben reemplazar progresivamente los combustibles fósiles en el mix energético.

De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía, en el escenario de Emisiones Netas Cero (NZE), se prevé que la generación global de electricidad aumente más de dos veces y media entre 2021 y 2050. Durante este período, la generación eléctrica crecerá a una tasa anual del 3,2% hasta 2030 y del 3,4% entre 2030 y 2050, superando el crecimiento promedio del 2,5% registrado entre 2010 y 2021. Este incremento responde, en gran medida, a la creciente electrificación de los sectores de uso final, incluyendo el transporte con vehículos eléctricos, la calefacción y la producción industrial. Como

resultado, la participación de la electricidad en el consumo energético final pasará del 20% en 2021 a casi un 30% en 2030, y superará el 50% en 2050.

Este incremento en la demandan global de electricidad se concentrará especialmente en países emergentes y en desarrollo como India, África, Oriente Medio y el sudeste asiático, así como aquellos que están experimentando una rápida expansión industrial y tecnológica como China. En la Figura 1.2 proporcionada por Enerdata se presenta la estimación del consumo de energía por región para el año 2050 [1].

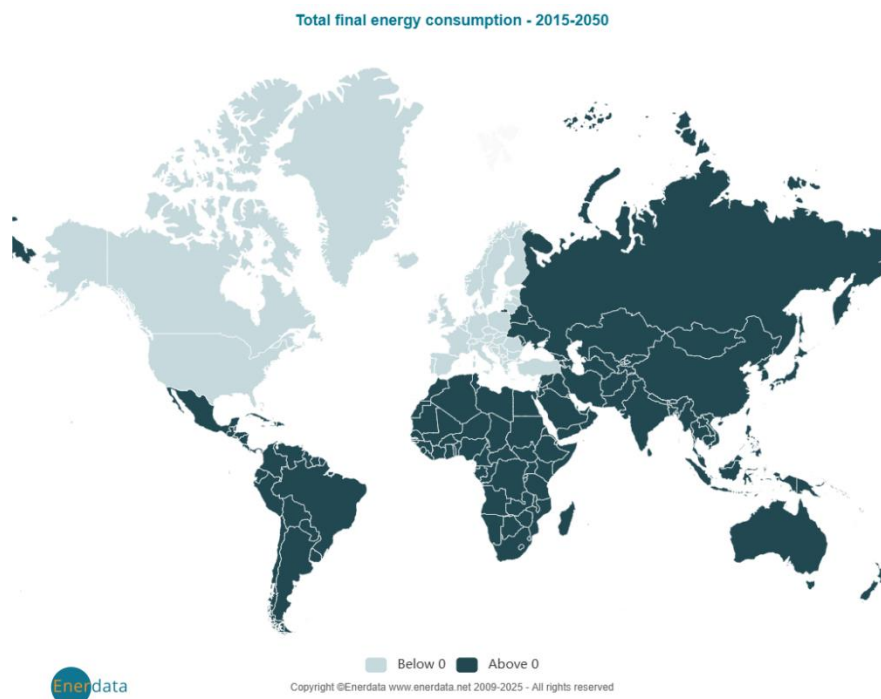


Figura 1.2: Proyección del consumo de energía por región (2015-2050), Enerdata

Según el escenario EnerBlue, que asume el cumplimiento de ciertos objetivos nacionales de reducción de emisiones (NDC) y otros compromisos climáticos para 2030, el consumo final mundial de energía crecerá a un ritmo mucho más lento que en décadas anteriores. Como se observa en la Figura 1.2, las economías avanzadas tenderán a reducir su consumo energético, sin embargo, la región de Asia-Pacífico representará más de la mitad de la demanda final mundial, y África consumirá más energía que América del Norte o Europa.

Ambas figuras reflejan el reto energético global: mientras que los países industrializados tienden a estabilizar su consumo gracias a la eficiencia energética y la integración de energías renovables, las economías emergentes experimentarán un fuerte incremento en su demanda, impulsado por el desarrollo y el crecimiento demográfico. Este panorama refuerza la urgencia de buscar soluciones sostenibles, como el hidrógeno verde, para cubrir la creciente demanda sin comprometer los objetivos de reducción de emisiones.

1.1.2 Agenda 2030 y Acuerdo de París

La preocupación por el cambio climático y la crisis energética ha llevado a la comunidad internacional a establecer compromisos globales para mitigar los efectos del calentamiento global y promover un crecimiento equitativo y respetuoso con el medio ambiente a nivel mundial. En este contexto, destacan dos iniciativas clave: la Agenda 2030 y el Acuerdo de París, ambos impulsados por las Naciones Unidas con el objetivo de garantizar un futuro sostenible para las próximas generaciones.

La Agenda 2030, adoptada en 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas, es un plan de acción orientado a favorecer el bienestar de las personas, la protección del planeta y el impulso de la prosperidad. Además, busca fortalecer la paz universal y garantizar el acceso a la justicia. Esta agenda se estructura en 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), representados en la Figura 1.3.



Figura 1.3: Agenda 2030, Naciones Unidas

De todos estos objetivos, el que resulta de mayor interés para este trabajo es el número 7, titulado *Energía Asequible y No Contaminante*. De acuerdo con las Naciones Unidas, para garantizar que todos puedan acceder a la energía eléctrica para el año 2030, debemos acelerar la electrificación, aumentar las inversiones en energía renovable, mejorar la eficiencia energética y desarrollar políticas y marcos regulatorios propicios [2].

El Acuerdo de París está estrechamente relacionado con la Agenda 2030. Ambas iniciativas, promovidas por las Naciones Unidas, comparten el objetivo común de lograr

un desarrollo equitativo y sostenible mientras se combate el cambio climático. Este acuerdo es un tratado internacional jurídicamente vinculante, adoptado por 196 partes el 12 de diciembre de 2015. De acuerdo con el Artículo 2, el objetivo principal es mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático [3].

1.2 Motivaciones

Actualmente, nuestra sociedad enfrenta un cambio climático y una crisis energética, originados por la excesiva dependencia de los combustibles fósiles. Por ello, encontrar soluciones alternativas que sean respetuosas con el medio ambiente y aceleren la transición hacia fuentes renovables es un desafío clave que concierne a toda la población mundial.

En este contexto, el hidrógeno se presenta como un candidato prometedor en su papel de vector energético. Sin embargo, aún es una tecnología en desarrollo, con un amplio margen de mejora e innovación. Por lo tanto, es fundamental continuar con la investigación y el estudio en este campo para maximizar su potencial y lograr su integración en la vida cotidiana.

1.3 Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo principal el análisis tecno-económico de la integración de un sistema solar-hidrógeno, incluyendo el diseño de una planta solar fotovoltaica de 794 kWp y el uso de un electrolizador en el Hospital Materno-Infantil de Málaga,.

Además, se marcan los siguientes objetivos específicos:

- Analizar el perfil de generación fotovoltaica del hospital
- Evaluar potencial de un electrolizador en un hospital: O_2 y H_2
- Determinar el diseño y tipo de tecnología del electrolizador
- Identificar y resolver posibles desafíos técnicos
- Evaluar rentabilidad económica
- Cuantificar la reducción de emisiones de carbono



2 Estado del arte

La transición hacia el uso de fuentes renovables ha impulsado un creciente interés en el hidrógeno como vector energético en diversas aplicaciones, incluida su integración en edificios. En el ámbito hospitalario, donde la demanda de energía es continua y su seguridad es fundamental, la incorporación de tecnologías de hidrógeno ofrece ventajas significativas en términos de eficiencia, autonomía energética y descarbonización.

Esta revisión del estado del arte destaca diferentes enfoques para la integración de sistemas de hidrógeno en edificaciones. Para ello, se analizan estudios recientes sobre la optimización del uso de electrolizadores, su acoplamiento con sistemas de energías renovables, como la energía fotovoltaica, y los beneficios técnicos y económicos que estas tecnologías pueden aportar.

2.1 Integración de sistemas de hidrógeno en edificios

El uso de sistemas híbridos que combinan energía renovable con tecnologías de hidrógeno es un campo ampliamente estudiado. Uno de los enfoques más investigados es la integración de paneles fotovoltaicos con electrolizadores para la producción y almacenamiento de hidrógeno.

En un estudio realizado en Afyon, Turquía, se analizó un sistema de energía solar combinado con tecnologías de hidrógeno autónomas para abastecer un edificio. Este sistema incluye paneles fotovoltaicos, un electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM), un tanque de almacenamiento de hidrógeno y una pila de combustible PEM. Al estar aislado de la red eléctrica, se propone como una solución sostenible y viable para garantizar un suministro de energía continuo durante todo el año, convirtiendo la vivienda de estudio en un edificio de cero emisiones [4].

Los resultados del estudio indican que el diseño óptimo de un sistema híbrido solar-hidrógeno depende de la relación entre la demanda energética y la disponibilidad de irradiación solar. Además, un mayor número de paneles fotovoltaicos reduce la necesidad de un tanque de almacenamiento de hidrógeno de gran capacidad. Sin embargo, es importante considerar que un electrolizador con capacidad insuficiente podría provocar pérdidas de energía excedente. Asimismo, el uso de múltiples pilas de combustible mejora la eficiencia del sistema, ya que evita operar cerca de su capacidad máxima y, al mismo tiempo, reduce el consumo de hidrógeno.

Por otro lado, Khaligh et al. (2023) propusieron un modelo basado en control predictivo (MPC) para la integración de electrolizadores alcalinos en sistemas de calefacción urbana. Este modelo optimiza la producción de hidrógeno y el aprovechamiento del calor residual generado en la electrólisis, logrando mejoras significativas en eficiencia energética y reduciendo las emisiones de carbono. Los resultados muestran que la recuperación de calor del electrolizador permite cubrir hasta el 10% de la demanda térmica de un distrito residencial, alcanzando una eficiencia media del electrolizador del 90% [5].

Otro estudio relevante es el de Basiony et al. (2024) quienes evaluaron un sistema solar-hidrógeno que integra paneles fotovoltaicos, un electrolizador y una pila de combustible para abastecer las necesidades eléctricas y de agua potable de un edificio en Egipto. Para ello, se desarrolló un modelo matemático del sistema completo utilizando MATLAB/Simulink, considerando las condiciones climáticas, así como la producción y el consumo de energía eléctrica y agua en escalas diaria, mensual y anual. Finalmente, se calcularon la eficiencia del sistema y los costes energéticos [6].

La producción de agua potable se lleva a cabo mediante un proceso de desalinización, utilizando la tecnología de destilación de efectos múltiples con compresión mecánica de vapor (MED-MVC), el cual es alimentado por la electricidad generada por los paneles fotovoltaicos.

La combinación de hidrógeno y desalinización permite suministrar agua y energía a edificios de forma autónoma, siendo ideal para regiones sin acceso a la red o a infraestructuras convencionales.

2.2 Aplicaciones en hospitales y producción de oxígeno

Este trabajo tiene como objetivo principal aplicar sistemas híbridos de energía solar-hidrógeno en un hospital. Por ello, a continuación, se destacan los estudios más recientes relacionados con esta temática.

El uso del hidrógeno en hospitales no solo se limita a la generación de energía, sino que también permite aplicaciones clave, como la producción de oxígeno medicinal. Yin et al. (2023) desarrollaron un sistema para optimizar la generación de hidrógeno y oxígeno en hospitales, utilizando electrólisis alcalina y un sistema híbrido de energías renovables, con el objetivo de garantizar un suministro seguro de oxígeno en contextos similares a la pandemia de COVID-19 [7].

Para ello, se modeló un edificio de oficinas de dos pisos en OpenStudio y se determinó su demanda energética. Posteriormente, se instalaron 500 paneles solares y un electrolizador alcalino. Además, los investigadores incorporaron redes neuronales profundas e inteligencia artificial en MATLAB para convertir el sistema en una función matemática y realizar una optimización a gran escala con un algoritmo genético, buscando minimizar el coste del electrolizador y la pila de combustible, mientras se maximizaba la producción de cápsulas de oxígeno de tipo E.

En la Figura 2.1 se muestra el esquema del sistema energético desarrollado:

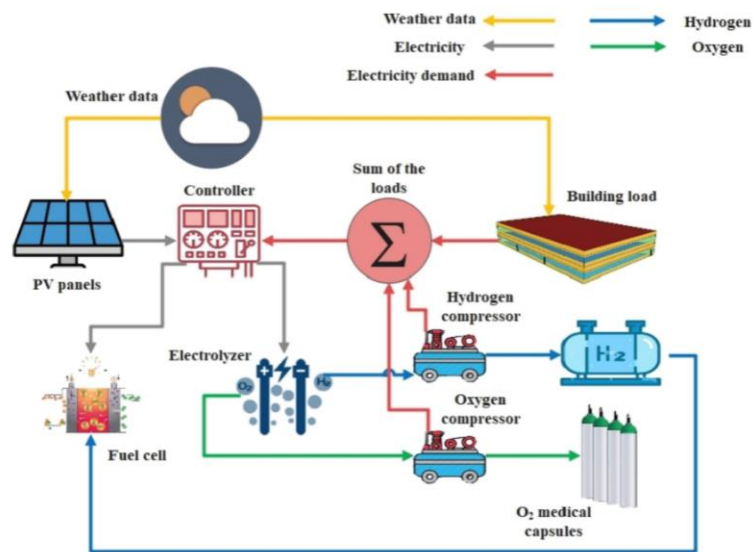


Figura 2.1: Esquema del sistema energético Yin et al. (2023).

La figura ilustra de manera clara el flujo de energía dentro del sistema:

Los paneles fotovoltaicos generan la electricidad necesaria para abastecer tanto el edificio como los procesos de electrólisis. El electrolizador alcalino utiliza el excedente de energía solar para producir hidrógeno, que se comprime y almacena en un tanque de alta presión, y oxígeno, que se almacena en cápsulas de tipo E para su uso en hospitales. Cuando la energía solar no es suficiente para cubrir la demanda del sistema, una pila de combustible convierte el hidrógeno almacenado en electricidad, asegurando un suministro continuo. Además, el sistema cuenta con un controlador central encargado de gestionar la distribución de energía en todo momento, optimizando su uso y garantizando el funcionamiento eficiente del hospital.

2.3 Desafíos y perspectivas futuras

A pesar de los avances en la integración de tecnologías de hidrógeno en edificios, aún existen varios desafíos técnicos y económicos que deben abordarse para su adopción a mayor escala. La intermitencia de fuentes como la solar y la eólica exige sistemas de almacenamiento eficientes para garantizar un suministro de energía estable. Además, los altos costes iniciales de los electrolizadores, los sistemas de almacenamiento y las celdas de combustible continúan siendo una gran barrera en comparación con las tecnologías convencionales. Otro aspecto crítico son las dificultades técnicas en la infraestructura de almacenamiento de hidrógeno, ya que este requiere condiciones especiales, como alta presión o estado líquido, lo que implica un diseño seguro y sofisticado.

Para abordar estos retos, diversos estudios han planteado estrategias innovadoras, como el desarrollo de modelos predictivos avanzados y la aplicación de inteligencia artificial, con el objetivo de optimizar el funcionamiento de los sistemas híbridos de hidrógeno.

En este contexto, los desafíos identificados constituyen la base y motivación del presente trabajo, el cual se centra en el estudio del perfil energético de un sistema fotovoltaico y la integración de un electrolizador en un entorno hospitalario. A través de este análisis, se pretende evaluar su viabilidad tecnológica y económica, contribuyendo al desarrollo de soluciones sostenibles y eficientes para la integración de las tecnologías de hidrógeno en la vida cotidiana.





3 Sistemas híbridos solar-hidrógeno

3.1 Hidrógeno

El hidrógeno es el primer elemento químico de la tabla periódica, identificado con el símbolo H y con número atómico 1. Su estructura atómica está conformada por un protón y un electrón, lo que lo convierte en el elemento más ligero existente. Además, es uno de los más abundantes en el planeta, presente en compuestos como el agua y los hidrocarburos; sin embargo, rara vez se encuentra en su estado puro. Entre los combustibles convencionales, es el que posee el mayor contenido energético por unidad de peso, con una densidad energética aproximadamente tres veces superior a la de la gasolina.

En la actualidad, el hidrógeno destaca como un combustible sostenible, ya que su uso en procesos de combustión o en pilas de combustible solo genera vapor de agua como subproducto. No obstante, no todo son ventajas; el hidrógeno no es una fuente de energía primaria como el carbón o el petróleo, sino que debe ser producido a partir de otros recursos para ser utilizado como combustible. A pesar de ello, su empleo como vector energético comenzó a destacar en el campo aeroespacial, desempeñando un papel clave en las primeras misiones espaciales y permitiendo al ser humano llegar a la Luna en la misión Apolo 11.

El hidrógeno es considerado un combustible con un gran potencial para el futuro por diversas razones. En primer lugar, su uso no genera emisiones contaminantes y, si su producción se lleva a cabo mediante energías renovables, se convierte en un recurso de cero emisiones. Además, presenta una gran versatilidad, con aplicaciones que van desde el suministro doméstico hasta la industria, destacando por su alta capacidad de almacenamiento y distribución de energía.

3.1.1 Métodos de obtención

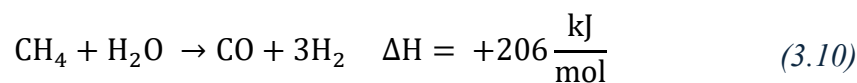
Existen diversos métodos para la producción de hidrógeno, clasificados según su origen y sostenibilidad, destacando los siguientes:

- **Reformado de hidrocarburos**

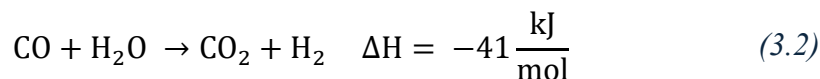
Es el proceso termoquímico más utilizado en la actualidad. Consiste en un reformado con vapor de agua a alta temperatura que permite obtener como producto principal H_2 , junto con CO_2 y CO como subproductos.

Normalmente, este proceso se aplica al gas natural, debido a que está compuesto principalmente por metano, el cual posee una alta relación H/C. Se lleva a cabo en dos etapas:

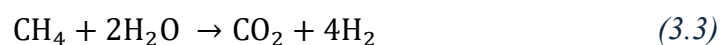
En la primera etapa, ocurre la reacción endotérmica de reformado de metano con vapor de agua, en un rango de temperatura de 700-1000 °C y en presencia de un catalizador. Como resultado, se produce hidrógeno y monóxido de carbono:



Posteriormente, tiene lugar la reacción exotérmica de desplazamiento del gas de agua, conocida como *Water-Gas Shift Reaction* (WGS), donde el monóxido de carbono generado en la primera etapa reacciona con el vapor de agua restante para producir más hidrógeno y dióxido de carbono:



Finalmente, la reacción global del reformado de vapor se expresa como:



Si bien este proceso permite obtener hidrógeno de alta calidad, genera aproximadamente 10 veces más CO₂ que H₂, lo que plantea un problema ambiental. Por ello, en la transición hacia un futuro sostenible, se buscan alternativas más ecológicas y respetuosas con el medio ambiente.

- **Electrólisis**

La descomposición electrolítica del agua fue descubierta en 1800 por Nicholson y Carlisle, quienes lograron separar el agua en hidrógeno y oxígeno mediante el uso de energía eléctrica. El principal atractivo de este método es que, en combinación con fuentes renovables, no genera gases de efecto invernadero, lo que permite obtener el denominado hidrógeno verde. Este proceso de producción de hidrógeno tiene un gran potencial en la actualidad y constituye un aspecto clave en este trabajo de fin de grado.

- **Ciclos termoquímicos**

Descomponen el agua mediante la aportación de calor o una combinación de calor y electricidad. Para ello, utilizan una serie de reacciones químicas enlazadas, de carácter endotérmico o exotérmico, que suelen operar en un rango de temperaturas en el entorno de 750-1000 °C. En esta línea, existe una gran variedad de ciclos térmicos, pero los más comunes son los ciclos de la familia del azufre (S-I, HyS), los ciclos de óxidos metálicos (volátiles y no volátiles) y los ciclos de baja temperatura.

- **Procesos biológicos**

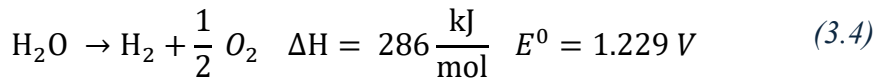
El uso de microorganismos para descomponer materia orgánica, como la biomasa, permite la producción de hidrógeno como subproducto. Se trata de un campo innovador con gran potencial, ya que estos procesos operan a temperaturas y presiones moderadas. Sin embargo, su eficiencia aún es inferior a la de otros métodos de producción más comunes, por lo que continúa la investigación para optimizarlo y convertirlo en un proceso competitivo en el futuro. En la actualidad, destacan estudios recientes sobre el uso de algas y bacterias para la producción biológica de hidrógeno.

3.1.2 Electrólisis

Proceso en el cual se separan los elementos que conforman un compuesto mediante el uso de una corriente eléctrica. Para ello, se utilizan dos electrodos: el polo positivo, conocido como ánodo, y el polo negativo, llamado cátodo, ambos sumergidos en un electrolito.

En la electrólisis del agua, al circular la corriente del ánodo al cátodo, el agua se disocia en hidrógeno y oxígeno.

La reacción química general que ocurre durante la electrólisis es la siguiente:



Este proceso tiene la gran ventaja de producir hidrógeno sin generar CO₂. Además, si la energía eléctrica utilizada proviene de una fuente renovable, se obtiene hidrógeno verde. Para ello, es necesario el uso de electrolizadores que lleven a cabo este proceso y sean capaces de utilizar la energía de la manera más eficiente posible.

3.1.3 Electrolizadores

- **Electrolizadores de Membrana de Intercambio Protónico (PEM)**

Se utiliza una membrana de intercambio de protones como electrolito para separar el hidrógeno y el oxígeno producidos durante el proceso de electrólisis. Estos electrolizadores ofrecen una gran eficiencia en comparación con otros tipos. Además, tienen un tamaño muy compacto, un tiempo de respuesta relativamente rápido y operan a bajas temperaturas, típicamente entre 5 y 80 °C. También permiten obtener las densidades de corriente más elevadas. Todas estas ventajas han impulsado un gran auge en el uso de este tipo de electrolizadores en los últimos años. Sin embargo, su fabricación requiere metales raros y depende en gran medida del platino, lo que eleva significativamente su coste en el mercado [8].

A continuación, en la Figura 3.1, se muestra de manera gráfica su funcionamiento:

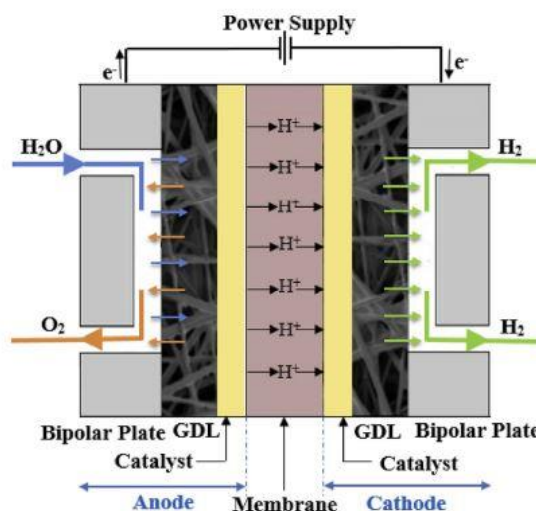


Figura 3.1: Electrolizador PEM International Journal of Hydrogen Energy (2019)

El funcionamiento de estos electrolizadores se basa en el uso de un electrolito sólido y una membrana que permite el paso de los protones. Cuando se suministra corriente al sistema, el agua introducida en el ánodo se descompone en protones (H^+), electrones (e^-) y oxígeno molecular (O_2).

Los protones atraviesan la membrana PEM hacia el cátodo, mientras que el oxígeno se libera en forma de gas. Posteriormente, los protones se combinan con los electrones proporcionados por el circuito eléctrico, formando hidrógeno molecular (H_2).

- **Electrolizadores alcalinos**

Actualmente, son los más comerciales y utilizados en el mercado debido a su bajo coste y a que se trata de una tecnología muy madura. Sin embargo, no logran alcanzar altas eficiencias y el hidrógeno obtenido no es tan puro como en otros tipos de electrolizadores.

Su funcionamiento se basa en la inmersión de dos electrodos en una solución electrolítica líquida, separados por una membrana o diafragma.

El electrolito suele estar compuesto por una disolución acuosa de una sustancia alcalina, como hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH).

En la Figura 3.2 se muestra el principio de funcionamiento de un electrolizador alcalino [9].

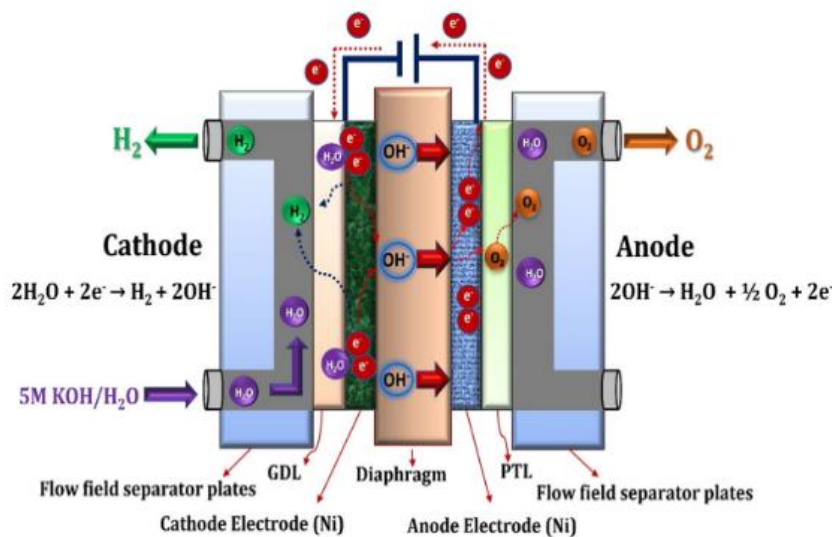


Figura 3.2: Principio de funcionamiento de un electrolizador alcalino, S.Shiva Kumar & H.Lim (2022)

La electrólisis del agua alcalina consta de dos reacciones electroquímicas individuales que ocurren en los electrodos: la reacción de evolución de hidrógeno (HER) en el cátodo y la reacción de evolución de oxígeno (OER) en el ánodo.

Durante la electrólisis alcalina, en el cátodo, dos moles de solución alcalina se reducen, lo que da lugar a la formación de un mol de hidrógeno molecular (H_2) y dos moles de iones hidróxido (OH^-). El hidrógeno generado se libera de la superficie del cátodo, mientras que los iones hidróxido (OH^-) restantes migran hacia el ánodo a través del separador poroso, impulsados por el campo eléctrico del circuito.

En el ánodo, los iones hidróxido (OH^-) se oxidan, lo que da lugar a la formación de 1/2 mol de oxígeno molecular (O_2) y una molécula de agua (H_2O).[9]

Estos electrolizadores están compuestos por varias celdas unitarias conectadas entre sí, las cuales pueden operar en dos configuraciones distintas: monopolar o bipolar.

- **Electrolizadores de Óxido Sólido (SOE)**

Este tipo de electrolizadores se caracteriza por el uso de una membrana de óxido cerámico como electrolito, operando con agua en forma de vapor a altas temperaturas (500–850 °C). Este proceso permite reducir drásticamente el consumo de energía al dividir el agua en hidrógeno y oxígeno, lo que aumenta significativamente la eficiencia energética. A esta tecnología se le conoce como electrólisis de alta temperatura (HTE, High-Temperature Electrolysis).

Aunque permite obtener hidrógeno de alta pureza y alcanzar eficiencias extremadamente elevadas, aún se encuentra en desarrollo y no es una tecnología tan madura como la de otros tipos de electrolizadores.

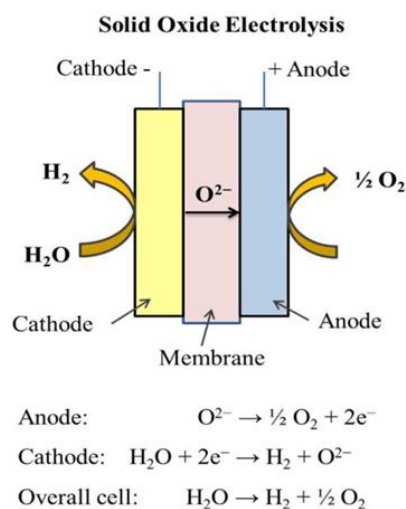


Figura 3.3: Principio de funcionamiento de un electrolizador SOE, Shiva Kumar & V.Himabindu (2019)

En la Figura 3.3 se puede observar el funcionamiento básico de este tipo de electrolizadores. El agua, en forma de vapor llega al cátodo, donde mediante un aporte externo de electricidad se genera hidrógeno junto con iones de oxígeno. Estos iones luego se desplazan hacia el ánodo, donde se reducen y se transforman en oxígeno molecular (O_2) [10].

3.2 Energía solar fotovoltaica

Esta energía desempeñará un papel fundamental en el proyecto, ya que será la fuente utilizada para alimentar el electrolizador y permitir la producción de hidrógeno y oxígeno. Por ello, es crucial establecer los principios fundamentales de este tipo de energía.

La energía solar fotovoltaica se obtiene en forma de corriente continua a partir de un dispositivo de material semiconductor, denominado célula solar, cuando sobre él incide la radiación solar.

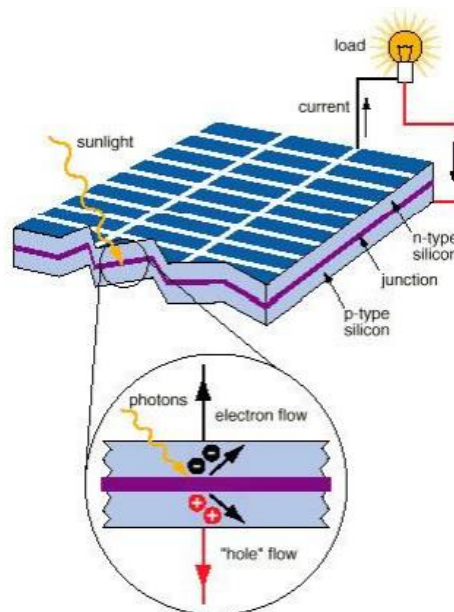


Figura 3.4: Efecto fotovoltaico en una célula solar, Ashraf Kalil (2004)

Para que tenga lugar el efecto fotovoltaico, es necesario que la célula solar presente una unión física entre dos semiconductores: uno de tipo P, con déficit de electrones, y otro de tipo N, con exceso de electrones. De este modo, cuando la radiación solar incide sobre la célula y su energía es igual o superior a la necesaria para que un electrón pase de una capa a otra, se genera corriente eléctrica en un circuito [11].

En la práctica, las células solares se conectan en serie y en paralelo para formar lo que se conoce como módulo o panel fotovoltaico. Esto permite aislar eléctricamente el circuito del exterior, además de proporcionar mayor seguridad y resistencia al conjunto de células.

En la Figura 3.5 se puede apreciar la estructura básica de un módulo fotovoltaico [12].

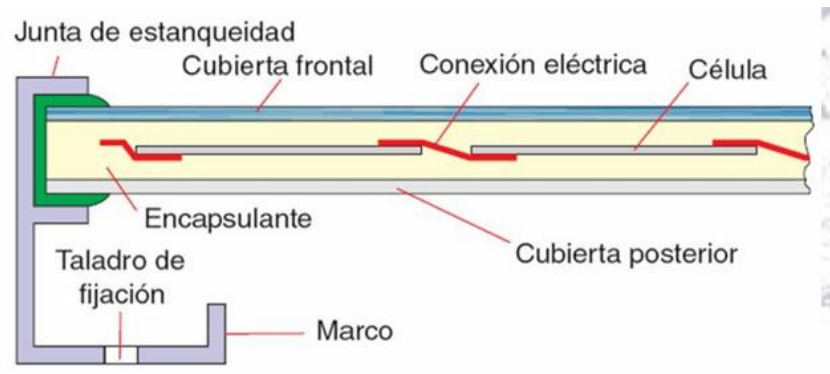


Figura 3.5: Estructura básica de un módulo fotovoltaico

En una instalación fotovoltaica, además de los módulos solares, son necesarios otros componentes esenciales:

- Inversor: Dispositivo que transforma la corriente continua generada por los paneles solares en corriente alterna.
- Estructura de soporte: Dependiendo del emplazamiento de la instalación, se emplean diferentes tipos de estructuras para los módulos. Las más comunes son la coplanar y la triangular.
- Conexión y cableado: Es fundamental realizar una correcta conexión de toda la instalación, considerando todos los dispositivos y posibles controladores, garantizando así la seguridad y el óptimo funcionamiento del sistema.

Las instalaciones fotovoltaicas ofrecen una gran versatilidad para integrar otras tecnologías, como sistemas de almacenamiento, pilas de combustible o sistemas de carga para vehículos eléctricos. En nuestro caso, analizaremos la incorporación de un electrolizador.





4 Modelización

En este apartado se desarrolla el aspecto clave de este Trabajo de Fin de Grado, que consiste en la modelización de un sistema híbrido solar-hidrógeno, el cual integra una instalación fotovoltaica con un electrolizador en un entorno hospitalario. El objetivo es evaluar la viabilidad técnico-económica del sistema en un caso práctico, contribuyendo a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero mediante el aprovechamiento de energías renovables y la producción de hidrógeno verde.

El modelo se desarrolla tomando como referencia el Hospital Materno-Infantil de Málaga, un emplazamiento que presenta condiciones especialmente favorables para la generación fotovoltaica gracias a su elevada radiación solar anual y simultáneamente para el aprovechamiento de los productos obtenidos del electrolizador.

Para cubrir parte de la demanda eléctrica del hospital, se ha diseñado una instalación fotovoltaica de 794 kWp. Dicha instalación está dimensionada aprovechando toda la superficie útil disponible en la cubierta y en las zonas de aparcamiento pertenecientes al propio hospital. La energía generada se utilizará en primer lugar para el abastecimiento directo del centro sanitario, y el excedente se destinará a alimentar un electrolizador, generando hidrógeno verde y oxígeno.

El hidrógeno producido será almacenado para su posterior comercialización como vector energético, según el precio estipulado por el mercado. Por otro lado, el oxígeno generado será sometido a un proceso de purificación para poder ser empleado como oxígeno medicinal, contribuyendo a cubrir una parte de la demanda del hospital.

En los siguientes apartados se detallará el proceso de diseño de la instalación fotovoltaica, las características técnicas del electrolizador seleccionado, así como el planteamiento general del sistema híbrido.

4.1 Emplazamiento y demanda eléctrica del hospital

El Hospital Materno-Infantil de Málaga es un centro sanitario de referencia ubicado en el sur de España, en pleno centro urbanístico de la ciudad. Este emplazamiento se ha seleccionado por su alto potencial de producción fotovoltaica y por su superficie disponible en cubierta y zonas de aparcamiento que permiten la instalación de una planta fotovoltaica de gran capacidad, dando lugar a mayor libertad de maniobra para la incorporación del electrolizador.

En la Figura 4.1 se muestra la cartográfica catastral del emplazamiento, situado en Av. del Arroyo de los Ángeles, s/n, Bailén-Miraflores, 29011 Málaga.



Figura 4.1: Cartografía catastral del Hospital Materno-Infantil de Málaga

Para estimar el consumo anual de energía en kWh del Hospital Materno-Infantil, se han utilizado los métodos descritos en un artículo de la Asociación Española de Ingeniería Hospitalaria (AEIH). En dicho artículo se hace referencia a diversas estimaciones y datos reales de hospitales en España con el objetivo de contrastar y aproximar el consumo energético en edificios de este carácter similar, así como mejorar su gestión energética [13].

Los métodos considerados son los siguientes:

- **Consumo por cama:** Es el ratio clásico, aunque ha perdido relevancia en los últimos años debido a la reducción del número de camas en los hospitales. Se expresa en kWh/cama.
- **Consumo por superficie:** Es el ratio más utilizado en la actualidad, ya que se adapta mejor a la proporcionalidad del reparto de consumos. Se expresa en kWh/m².

- **Consumo por actividad:** Tiene en cuenta el número de operaciones, consultas, estancias, urgencias, etc. Este indicador se emplea principalmente para determinar los costes energéticos asociados a cada actividad del hospital.

A continuación, en la Tabla 4.1 se muestran los valores específicos para nuestro caso:

Zona: MEDITERRÁNEA Año 2011				
	€/kWh	kWh/cama	kWh/m ²	€/cama
Titularidad				
Público	0,107	32.407	177	3.492
Privado	0,106	15.392	193	1.556
Nº de camas				
<100	0,109	42.774	215	4.730
>101 y <250	0,106	20.666	166	2.149
>251 y <500	0,107	19.295	169	2.039
>501 y <1.000	0,102	25.216	184	2.564
>1.001	0,099	27.814	244	2.739
Equipos AT				
Sí	0,107	30.458	187	3.272
No	0,104	9.869	162	920
TOTAL	0,106	26.460	183	2.816

Tabla 4.1: Indicadores energéticos AIEH

De acuerdo con la información proporcionada por el Ministerio de Sanidad, el Hospital Materno-Infantil de Málaga cuenta actualmente con 349 camas instaladas, por otra parte, el edificio tiene una superficie total construida de 53.166 metros cuadrados.

Utilizando los indicadores recogidos en la Tabla 4 y los datos disponibles, se obtienen dos estimaciones del consumo anual de energía del hospital en kWh. Si se emplea el número de camas como referencia, el consumo estimado es de 6.733.955 kWh/año. Por otro lado, al tomar como base la superficie construida, el consumo asciende a 8.985.054 kWh/año. Con el fin de evitar infravaloraciones y minimizar el margen de error, se ha optado por utilizar el valor más alto de los dos.

Otro aspecto clave a considerar es el comportamiento de la curva de carga diaria del hospital, ya que esta determinará en qué franjas horarias se podrá cubrir el consumo mediante energía fotovoltaica, cuándo existirán excedentes y en qué momentos no se podrá abastecer la demanda energética del centro. Dado que no se dispone de curvas reales de consumo del propio Hospital Materno-Infantil, se ha optado por simular una curva de demanda eléctrica utilizando como referencia la del Hospital de la Axarquía en

Málaga. Mediante el uso de inteligencia artificial, se ha recreado una curva de consumo representativa que permite analizar el comportamiento horario de la demanda energética del centro, para ello, se ha utilizado un prompt que plantea un escenario en el que se solicita, para un proyecto de ingeniería, una curva de consumo real aproximada para el hospital de estudio, los datos que se conocen son el perfil de referencia de la Figura 4.2 y el consumo anual, se requiere una curva horaria con un nivel de detalle máximo, con intervalos de 15 minutos.

A continuación, en la siguiente gráfica se pueden apreciar las curvas de consumo del Hospital de la Axarquía [14].

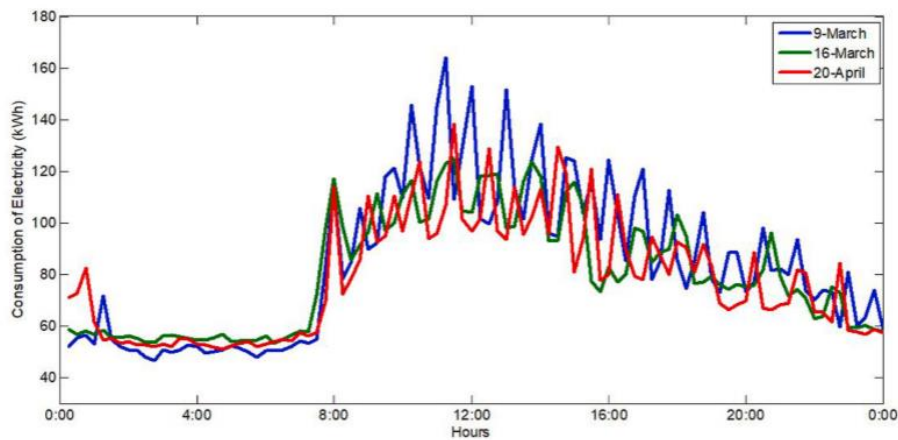


Figura 4.2: Curva de consumo Hospital la Axarquía

En la Figura 4.2 se observa la curva de consumo correspondiente a tres días distintos. Aunque en el día 9 de marzo se aprecia un consumo ligeramente superior, el comportamiento es prácticamente idéntico en los tres periodos. Esto nos permite recrear una curva para el hospital objeto de estudio, basándonos en un consumo anual de 8.985.054 kWh/año.

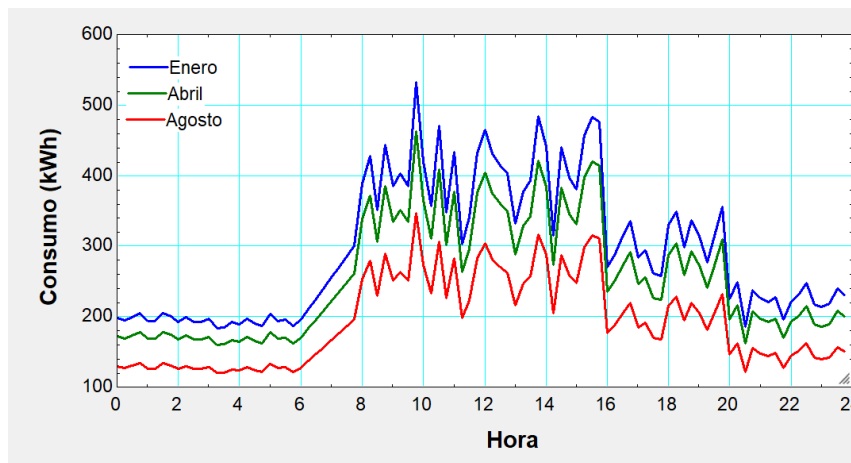


Figura 4.3: Curva de consumo Hospital Materno-Infantil

En la Figura 4.3 se muestran tres escenarios representativos: un mes de alto consumo, en este caso enero; un mes con un consumo intermedio, que será abril; y un mes con bajo consumo, correspondiente a agosto.

Podemos observar que el consumo aumenta rápidamente a partir de las 6 de la mañana, alcanzando su pico máximo alrededor de las 10. Posteriormente, se producen fluctuaciones leves en la demanda, y a partir de las 8 de la tarde comienza a disminuir progresivamente.

Esta curva de consumo será clave para determinar el comportamiento energético de nuestro sistema una vez se incorpore la producción fotovoltaica, lo cual se analizará a continuación.

4.2 Diseño de la instalación fotovoltaica

En este apartado se describirá el proceso seguido para el diseño de la instalación fotovoltaica del Hospital Materno-Infantil de Málaga. Para ello, se ha utilizado el software de ingeniería solar *HelioScope*, el cual permite realizar el diseño, simulación y análisis de sistemas fotovoltaicos de manera profesional. Este software emplea una base de datos meteorológica y permite analizar pérdidas por sombreado, temperatura, orientación, cableado, entre otros factores.

Una vez completado el diseño de la planta fotovoltaica, se procederá a realizar su simulación con el fin de obtener datos precisos de producción diaria.

El diseño de la planta se ha dividido en dos sectores: uno correspondiente a la cubierta del hospital con una potencia instalada de 412,1 kWp, y otro ubicado en las zonas de aparcamiento del recinto hospitalario, donde se encuentran marquesinas y algunas edificaciones, con una potencia instalada de 381,9 kWp. Por lo tanto, el sistema completo alcanza una potencia total de 794 kWp.

Para el modelado de la planta se han utilizado módulos de 670 Wp e inversores de 100 kW.

4.2.1 Instalación fotovoltaica de la cubierta

En el modelado de este sector se ha considerado toda la superficie útil de la cubierta del hospital, incluyendo aquellas zonas que ya contaban con instalaciones fotovoltaicas, con el objetivo de aprovechar al máximo el área disponible. Además, se han incorporado como superficie útil varias marquesinas ubicadas en las zonas de aparcamiento situadas a la derecha de la entrada principal del hospital.

A continuación, se presentan las simulaciones obtenidas:



Figura 4.4: Simulación HelioScope Cubierta Hospital

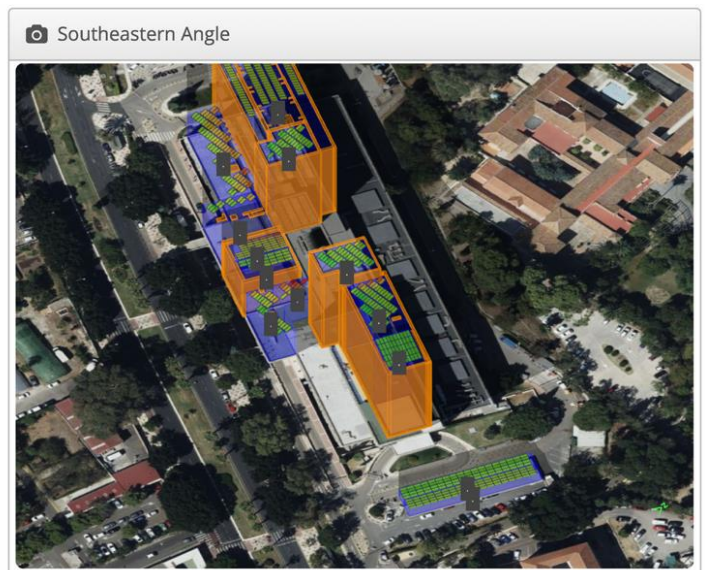


Figura 4.5: Sombreado HelioScope Cubierta Hospital

En el modelo desarrollado para este sector, mostrado en las figuras anteriores, se han utilizado un total de 615 módulos fotovoltaicos, de los cuales 350 están montados sobre estructura triangular lastrada para cubiertas, y los 266 restantes con estructura coplanar. Para el sistema eléctrico se han considerado cuatro inversores y un cableado de cobre de sección 6 mm².

Con esta configuración, se obtiene un yield de 1.432,6 kWh/kWp. Si bien este valor es positivo, podría ser más elevado considerando la ubicación geográfica del proyecto. Tal como se analizará en la Figura 4.6, esta diferencia se debe a las pérdidas presentes en el sistema.

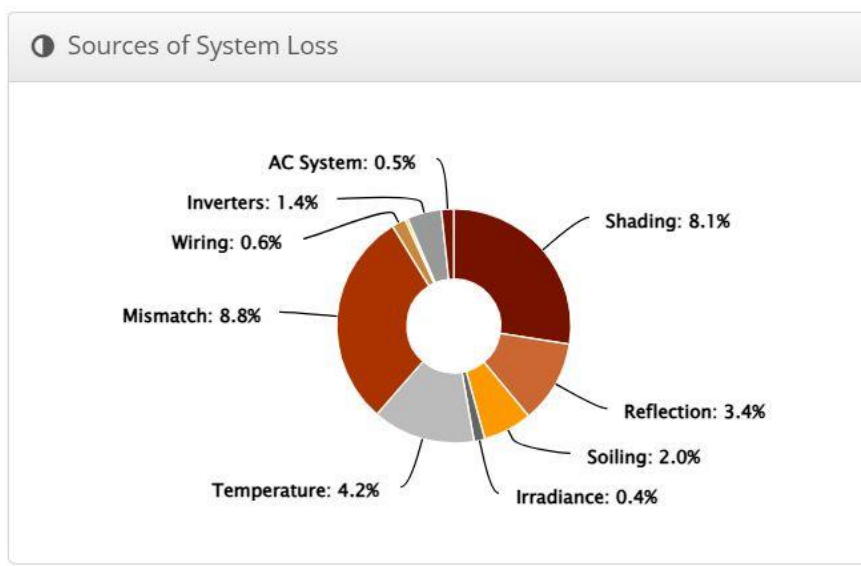


Figura 4.6: Pérdidas HelioScope Cubierta Hospital

Se pueden observar unas pérdidas por sombreado del 8,1%, atribuibles a los numerosos obstáculos presentes en la cubierta, como pretilos y elementos estructurales, así como a las sombras proyectadas entre módulos montados con estructuras triangulares con una inclinación de 10°.

Además, se registran pérdidas por mismatch del 8,8%, debidas principalmente a las diferencias en la orientación e inclinación de los módulos. En particular, los módulos con estructura coplanar presentan orientaciones muy dispares entre sí y respecto a los montados sobre estructura triangular, los cuales sí mantienen una orientación uniforme hacia el sur.

A pesar de estas pérdidas, este sector de la planta fotovoltaica logra alcanzar una producción anual de 590,3 MWh.

4.2.2 Instalación fotovoltaica de la zona de aparcamientos

En este sector de la instalación se ha aprovechado toda la superficie disponible de las marquesinas de los aparcamientos para vehículos, así como la cubierta disponible de algunas edificaciones pertenecientes al recinto hospitalario.

Las simulaciones obtenidas son las siguientes:



Figura 4.7: Simulación HelioScope Aparcamientos Hospital

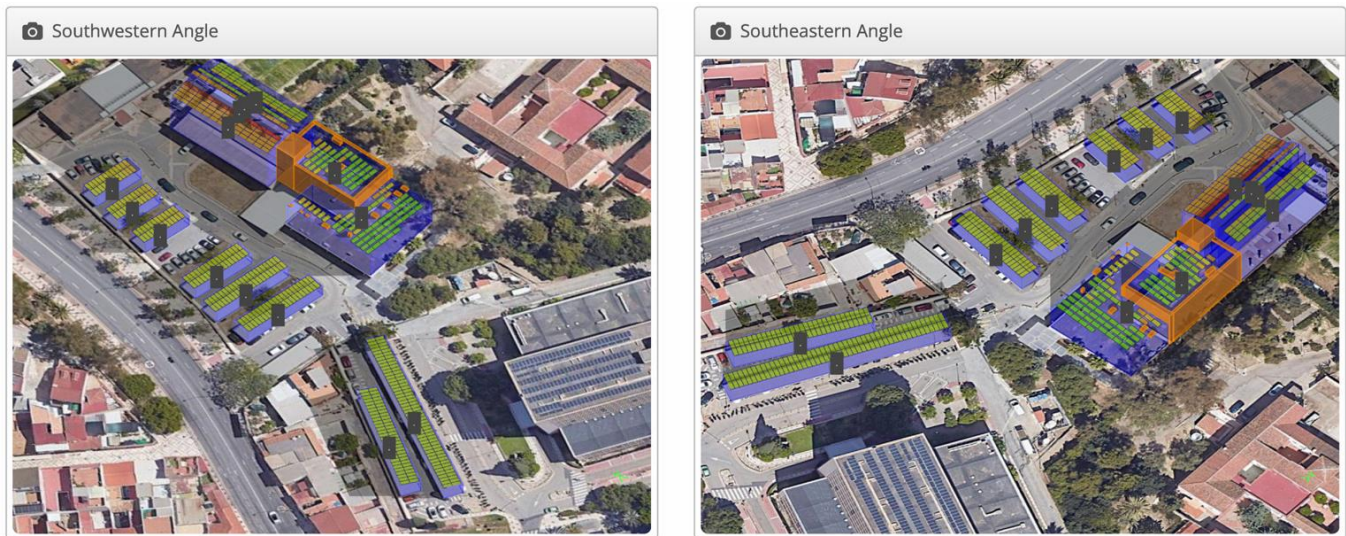


Figura 4.8: Sombreado HelioScope Aparcamientos Hospital

En el modelo desarrollado mostrado en las figuras anteriores, se han utilizado un total de 570 módulos fotovoltaicos, de los cuales 95 están montados sobre estructura triangular lastrada para cubiertas, y los 475 restantes con estructura coplanar. Para el sistema eléctrico se han considerado cuatro inversores y un cableado de cobre de sección 6 mm².

Con esta configuración, se obtiene un yield de 1.579,2 kWh/kWp. En este sector se logra una mayor producción por kWp en comparación con el otro modelo, debido a que, como se mostrará en la Figura 4.9, las pérdidas del sistema son menores, especialmente aquellas relacionadas con el sombreado.

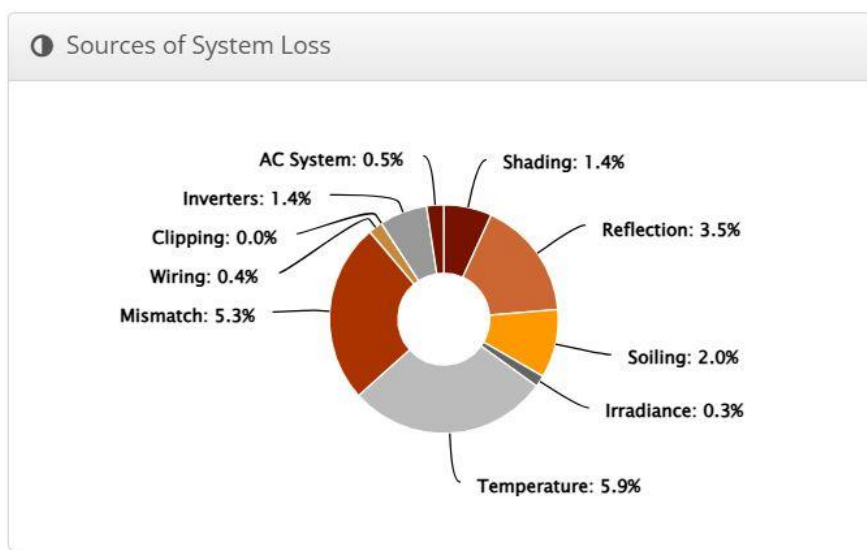


Figura 4.9: Pérdidas HelioScope Aparcamientos Hospital

En esta ocasión, debido a una estructura más simple y con menos obstáculos, principalmente compuesta por marquesinas, las pérdidas por sombreado son mínimas, alcanzando apenas el 1,5%. Además, las pérdidas por mismatch también son inferiores, ya que el sistema presenta una configuración mucho más uniforme que el sector anterior. Por lo tanto, a pesar de contar con una potencia instalada menor, esta simulación logra alcanzar una producción anual de 603,1 MWh.

4.3 Curvas de consumo y producción

4.3.1 Producción fotovoltaica

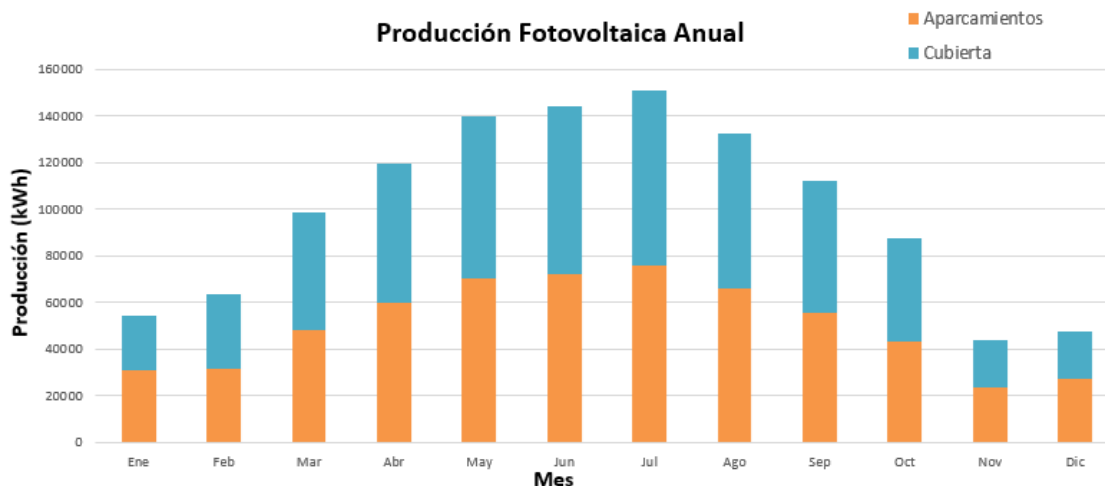


Figura 4.10: Producción fotovoltaica anual

La planta solar fotovoltaica cuenta finalmente con una potencia instalada de 794 kWp, un yield medio de 1.503,1 kWh/kWp y una producción anual estimada de 1.194.400 kWh, tal como se muestra en la Figura 4.10.

El software *HelioScope* además de datos mensuales también ofrece los datos de producción horaria para cada día a lo largo del año, lo cual nos permitirá obtener las curvas de producción fotovoltaica.

Para llevar a cabo las simulaciones pertinentes se ha tomado como referencia la curva de producción fotovoltaica correspondiente a un día promedio de cada mes. Asimismo, se ha supuesto una única curva de consumo del hospital para todo el mes. De esta manera, se obtienen con precisión ambas curvas: la de producción fotovoltaica y la de consumo energético

4.3.2 Curvas horarias

Con los datos obtenidos, se ha caracterizado una curva horaria para cada mes, a continuación, se muestran tres curvas representativas:

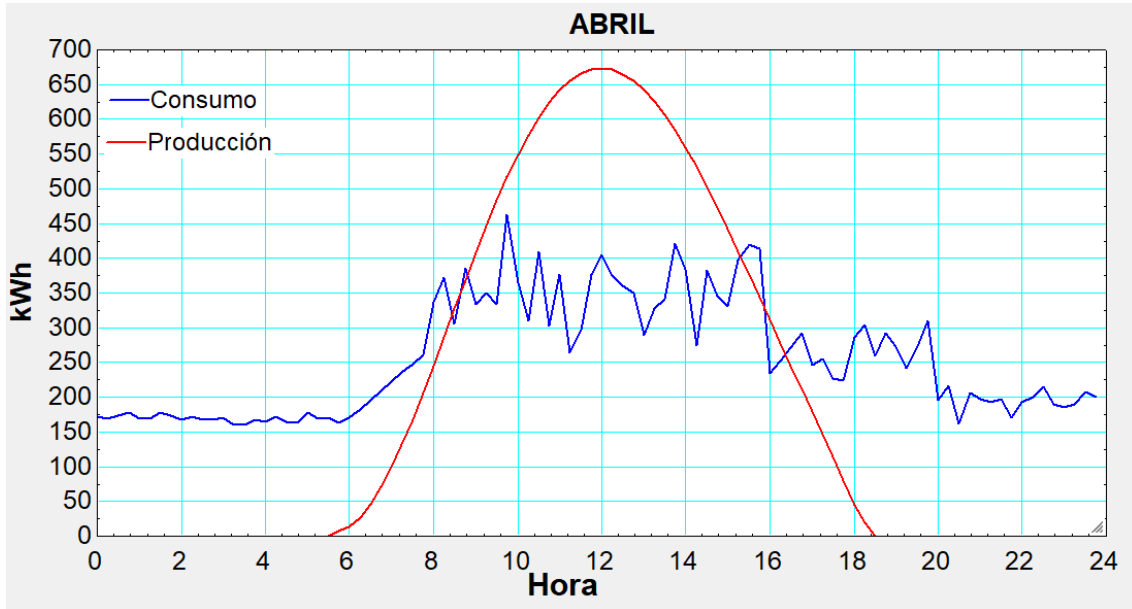


Figura 4.11: Curva horaria de abril

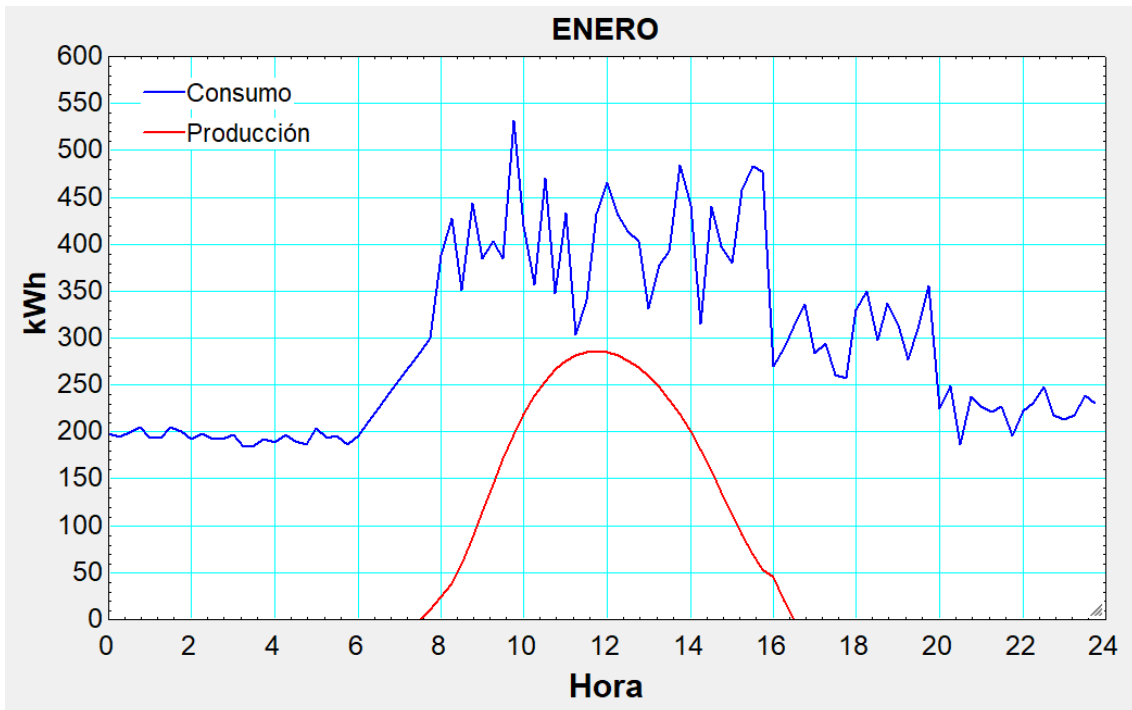


Figura 4.12: Curva horaria de enero

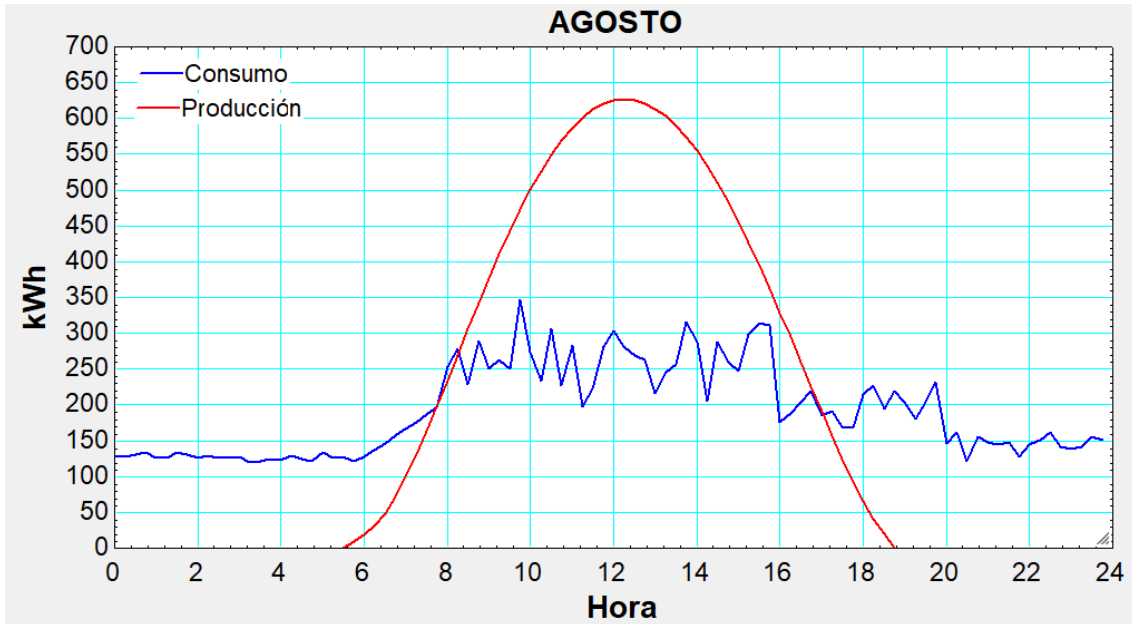


Figura 4.13: Curva horaria de agosto

En el mes de abril se registra un consumo medio acompañado de una producción fotovoltaica considerablemente buena, esto da lugar a excedentes energéticos diarios de aproximadamente 1.507 kWh, lo que permite un margen suficiente para incorporar un electrolizador que aproveche de manera eficiente dicha energía a lo largo del día.

En agosto se presenta un escenario similar, aunque el consumo del hospital es menor debido a la reducción de la actividad habitual durante los meses de verano. Como resultado, se alcanzan excedentes diarios de 2.010 kWh, con una potencia pico de 397 kW en las horas de mayor generación.

Sin embargo, durante los meses de invierno, como enero, la situación cambia drásticamente. Prácticamente toda la energía generada es destinada al autoconsumo del hospital, debido a un alto nivel de demanda y una reducida generación solar. Esto limita severamente la posibilidad de operar el electrolizador, que apenas podrá utilizarse en estas condiciones.

En términos generales, entre los meses de marzo y septiembre se dispondrá de excedentes considerables que permitirán el funcionamiento eficiente del electrolizador. En cambio, durante el resto del año, estos excedentes serán escasos, impidiendo la producción significativa de hidrógeno y oxígeno.

En la Figura 4.14 se muestra una tabla donde se muestra el comportamiento energético anual para las franjas horarias de 6:00 a 19:00.

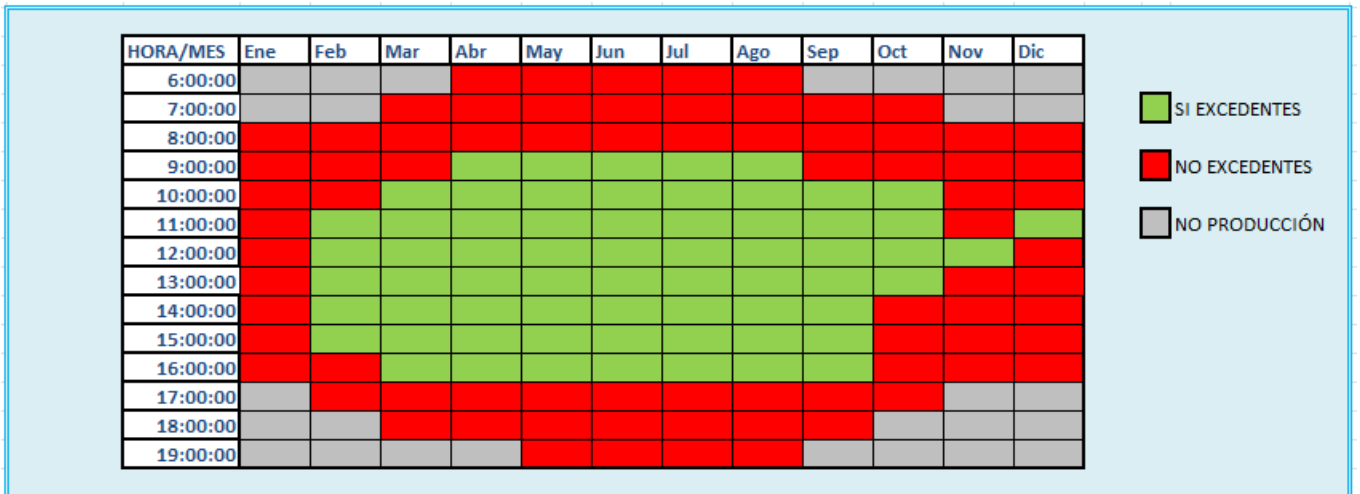


Figura 4.14: Matriz de disponibilidad horaria

Analizando la matriz, se observa que la franja horaria comprendida entre las 10:00 y las 16:00 es la más favorable para el funcionamiento del electrolizador, especialmente entre los meses de marzo y septiembre, donde existen excedentes de forma continua. Por otra parte, en las franjas de 6:00-8:00 y 17:00-19:00 no se puede aprovechar energía para el uso del electrolizador, ya que esta es consumida por el hospital o directamente no hay producción fotovoltaica.

Con estos datos podemos establecer aproximadamente un perfil operativo para el electrolizador, sin embargo, para realizar un diseño eficiente y realista se ha decidido optar por un modelo más detallado.

4.4 Diseño del electrolizador

Para realizar el diseño del electrolizador y simular todos los escenarios posibles se ha creado un modelo energético-económico donde se tienen en cuenta todas las variables, desde la potencia del propio electrolizador, hasta valores de precios de venta de hidrógeno, oxígeno medicinal, excedentes y tarifas de electricidad, todo ello sustentado por los datos de consumo y producción obtenidos anteriormente. De esta manera se ha logrado crear un modelo totalmente monitorizado que nos muestra todos los datos de interés de producción de hidrógeno y oxígeno, gráficas útiles que muestran el porcentaje de carga a la que opera el electrolizador, así como los resultados económicos del proyecto.

Se ha optado por un electrolizador alcalino, ya que se trata de una tecnología ampliamente desarrollada, con un funcionamiento estable y fiable en condiciones de carga continua. Además, presenta una inversión inicial y unos costes de operación inferiores en comparación con otros tipos de electrolizadores. Se ha establecido un rendimiento de producción de hidrógeno de 1 kg H₂ por cada 50 kWh consumidos, lo que equivale a una eficiencia del 66,7%.

Antes de llevar a cabo análisis tecno-económico del proyecto, se presenta la ventana de entrada y salida del mes de abril utilizando como referencia una potencia de electrolizador de 120 kW. El objetivo es explicar el procedimiento que se seguirá en las posteriores simulaciones anuales.

ABRIL							
Hora	Consumo	Producción	Autoconsumo	Excedentes	Electrolizador	% CARGA	Excedentes Finales
6:00:00	169,84 kWh	14,01 kWh	14,01 kWh	0,00 kWh	0,00 kW	0%	0,00 kWh
7:00:00	222,10 kWh	99,44 kWh	99,44 kWh	0,00 kWh	0,00 kW	0%	0,00 kWh
8:00:00	337,36 kWh	245,36 kWh	245,36 kWh	0,00 kWh	0,00 kW	0%	0,00 kWh
9:00:00	334,42 kWh	407,69 kWh	334,42 kWh	73,26 kWh	73,26 kW	61%	0,00 kWh
10:00:00	365,11 kWh	548,86 kWh	365,11 kWh	183,75 kWh	120,00 kW	100%	63,75 kWh
11:00:00	376,73 kWh	642,05 kWh	376,73 kWh	265,32 kWh	120,00 kW	100%	145,32 kWh
12:00:00	404,41 kWh	673,38 kWh	404,41 kWh	268,97 kWh	120,00 kW	100%	148,97 kWh
13:00:00	288,55 kWh	642,13 kWh	288,55 kWh	353,58 kWh	120,00 kW	100%	233,58 kWh
14:00:00	383,77 kWh	558,94 kWh	383,77 kWh	175,17 kWh	120,00 kW	100%	55,17 kWh
15:00:00	330,44 kWh	441,94 kWh	330,44 kWh	111,51 kWh	111,51 kW	93%	0,00 kWh
16:00:00	234,98 kWh	310,94 kWh	234,98 kWh	75,96 kWh	75,96 kW	63%	0,00 kWh
17:00:00	246,27 kWh	179,54 kWh	179,54 kWh	0,00 kWh	0,00 kW	0%	0,00 kWh
18:00:00	286,77 kWh	45,23 kWh	45,23 kWh	0,00 kWh	0,00 kW	0%	0,00 kWh

Tabla 4.2: Datos simulación abril

En la Tabla 4.2 se recogen todos los datos necesarios para realizar una simulación mensual precisa. En primer lugar, se prioriza el autoconsumo del propio hospital a partir de la energía generada por la instalación fotovoltaica. A continuación, el excedente de energía se destina a alimentar un electrolizador de 120 kW, el cual únicamente opera al 100 % de su potencia entre las 10:00 y las 14:00 horas en el mes de abril. Finalmente, la energía no aprovechada por el electrolizador se clasifica como excedente final, siendo vertida a la red para su correspondiente compensación económica.

A partir de estos datos se obtienen los siguientes resultados:

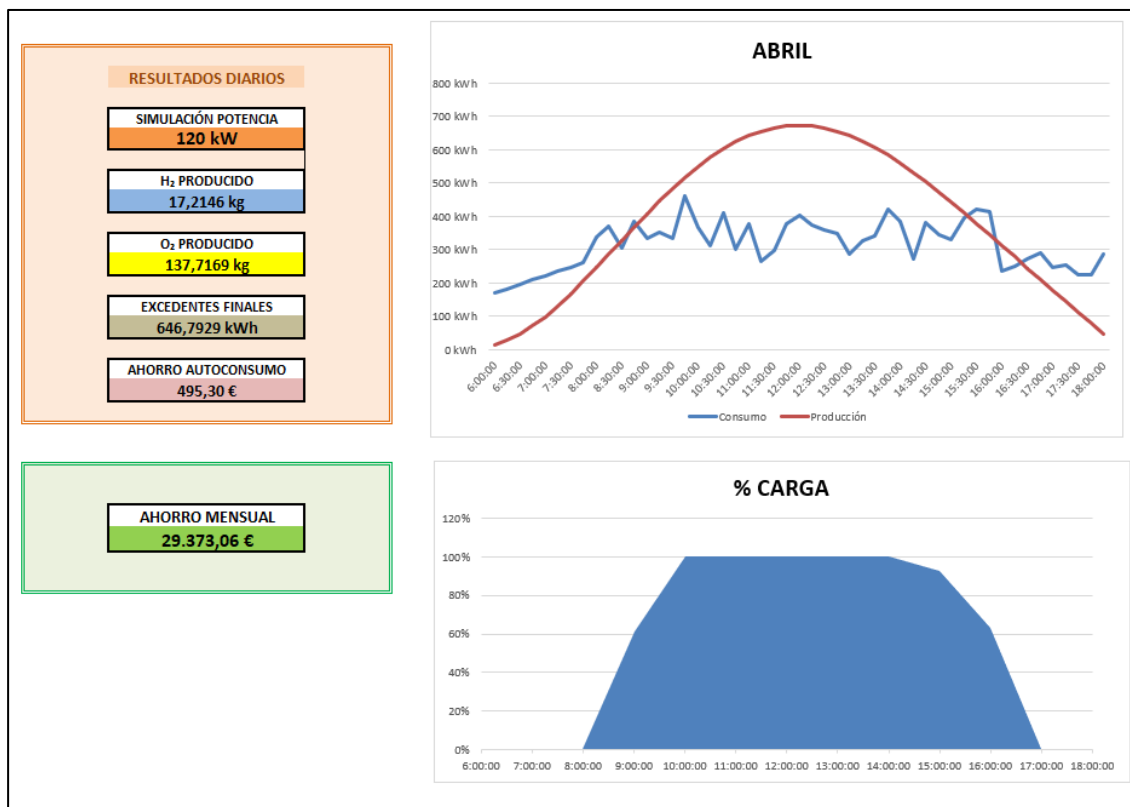


Figura 4.15: Resultados simulación abril

La Figura 4.15 muestra la interfaz de resultados correspondiente al mes de abril, en la parte superior derecha, se presenta la gráfica horaria de dicho mes, donde se representa la curva horaria del hospital revisada antes que permite visualizar rápidamente las franjas horarias donde existe un excedente de energía solar, estos excedentes son los que se destinan a alimentar el electrolizador para producir hidrógeno y oxígeno.

En la parte inferior derecha se incluye la curva de carga del electrolizador (%). Esta refleja el porcentaje de potencia utilizada por el sistema de electrólisis a lo largo del día. En este caso, se puede observar que el electrolizador alcanza su potencia nominal del 100 % entre las 10:00 y las 14:00 horas, coincidiendo con las horas de máxima irradiación y excedente solar. Fuera de ese intervalo, el electrolizador opera a carga parcial, disminuyendo en horas tempranas de la mañana y al caer la noche.

A la izquierda, se resumen los resultados diarios de la simulación:

- H₂ producido: 17,21 kg/día
- O₂ producido: 137,72 kg/día
- Excedentes solares no utilizados por el electrolizador: 646,79 kWh/día

- Ahorro por autoconsumo directo: 495,30 €/día

Extrapolando este comportamiento diario al conjunto del mes de abril, se estima un ahorro mensual de 29.373,06 €, combinando los beneficios del autoconsumo, la valorización del hidrógeno generado y el ahorro de oxígeno medicinal, así como la venta de los excedentes finales.

Estos resultados permiten analizar el comportamiento del sistema híbrido en condiciones reales, y evaluar el perfil de carga del electrolizador en función de los excedentes solares disponibles. Asimismo, proporcionan una base sólida para comparar distintos escenarios de dimensionado o estacionalidad desde el punto de vista técnico y tecnológico, sin embargo, es de vital importancia en este tipo de proyectos analizar la viabilidad económica del mismo, por ello, a continuación, se realiza un análisis final tecno-económico donde evaluaremos distintos escenarios y se determinará el potencial de integrar tecnología de hidrógeno en un hospital.





5 Análisis tecno-económico

En este apartado se evalúa la viabilidad tecnológica y económica del sistema híbrido solar-hidrógeno diseñado para el Hospital Materno Infantil de Málaga. Para ello, se han analizado tanto los costes de inversión inicial (CAPEX) como los costes operativos anuales (OPEX), así como las principales variables de entrada que afectan al comportamiento económico del proyecto.

El análisis parte de una estimación detallada de los costes asociados a la instalación fotovoltaica, el electrolizador alcalino y los sistemas auxiliares de almacenamiento, tratamiento de agua y purificación de oxígeno. A ello se suman los costes de operación y mantenimiento. Además, se han considerado diversos parámetros clave que influyen directamente en la rentabilidad del sistema, como:

- El precio de venta del hidrógeno generado
- El valor económico del oxígeno medicinal producido tras purificación
- El ahorro asociado al autoconsumo energético
- El precio de la electricidad

En este proyecto, se considera un precio de venta del hidrógeno generado de 5,85 €/kg, de acuerdo con el índice ibérico del precio de hidrógeno renovable establecido por MIBGAS.

Por otra parte, para estimar el ahorro asociado a la producción de oxígeno medicinal se ha recurrido a fuentes externas, en las que se establece un rango de 3 a 4 €/kg como precio competitivo, según datos de la AIFA (Agencia Italiana del Medicamento). Este valor resulta especialmente viable desde el punto de vista económico en hospitales con una capacidad superior a 200 camas.

A partir de estos datos, se han definido tres escenarios distintos, los cuales se han ponderado mediante una metodología de scoring, que valora la combinación de variables técnicas y económicas bajo diferentes niveles de exigencia. Estos escenarios permiten estudiar el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones.

En las siguientes secciones se detallarán los costes de CAPEX y OPEX, los supuestos económicos empleados y, posteriormente, los resultados obtenidos en cada simulación, incluyendo indicadores clave como el Payback, TIR, producción de H₂ y O₂, autoconsumo y ahorro anual.

A continuación, y antes de entrar en detalle, se presenta la ventana final de entrada y salida del modelo desarrollado en Excel para un proyecto de estas características, que contempla tanto la instalación fotovoltaica como la integración de un electrolizador en un edificio sanitario. Este modelo permite simular cualquier potencia de electrolizador a partir de

datos específicos de consumo y producción fotovoltaica, y además ofrece la posibilidad de modificar los parámetros clave relacionados con precios y costes del sistema. De este modo, se obtiene una herramienta flexible que permite analizar múltiples escenarios, adaptándose a las prioridades y condicionantes económicos de cada proyecto.

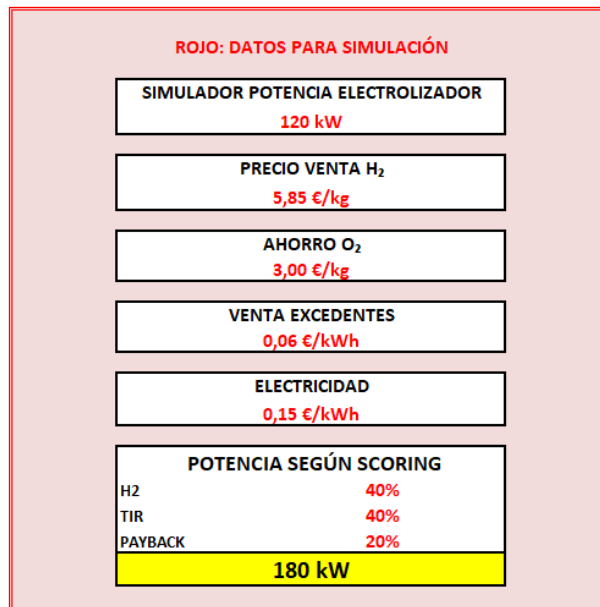


Figura 5.1: Interfaz de entrada de la simulación

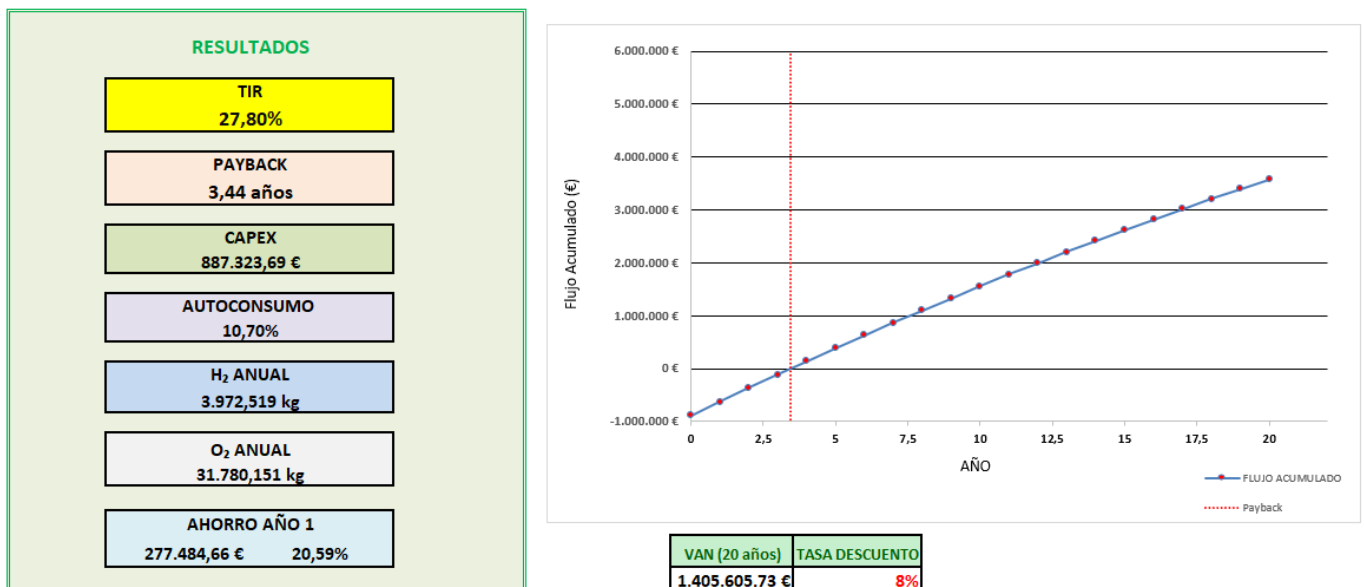


Figura 5.2: Interfaz de resultados de la simulación

La Figura 5.1 muestra la interfaz de entrada del modelo de simulación desarrollado, que permite al usuario configurar los principales parámetros económicos y de operación para el análisis del sistema híbrido solar-hidrógeno.

En la parte superior se especifica la potencia del electrolizador seleccionada para la simulación, parámetro clave que condiciona tanto la producción de hidrógeno y oxígeno como los indicadores financieros del proyecto. Para el análisis de las distintas simulaciones, este es el único dato de entrada que será modificado, el resto de los parámetros se mantendrán con el mismo valor que se muestra.

En la parte inferior se incluye un módulo de scoring multiobjetivo, que pondera la importancia de tres factores clave: Producción de H₂, Rentabilidad (TIR) y Periodo de retorno (Payback). Este sistema será el utilizado para caracterizar los tres escenarios posibles, asignando diferentes porcentajes a cada variable.

La Figura 5.2 muestra los resultados del modelo de simulación correspondiente a una configuración concreta del sistema. A la izquierda, se recogen los principales indicadores técnicos y económicos del sistema, y en la derecha se representa gráficamente la evolución del flujo de caja acumulado a lo largo de los 20 años estimados de vida útil del proyecto. También, en la parte inferior se detalla el Valor Actual Neto (VAN), para ese mismo periodo de vida útil y con una tasa de descuento del 8%.

Estos datos serán de gran utilidad para comparar los resultados de las posteriores simulaciones y sacar unas conclusiones técnicas del proyecto.

5.1 CAPEX y OPEX

En este apartado se describen todos los elementos del proyecto asociados tanto a la inversión inicial como a los costes de mantenimiento. De forma general, estos comprenden los componentes de la planta fotovoltaica (módulos, inversores, etc.), el electrolizador, así como ciertos sistemas de almacenamiento de hidrógeno y purificación de oxígeno.

$$\text{Coste específico Electrolizador} \left[\frac{\text{€}}{\text{kW}} \right] = 1200 \cdot (P_{El})^{-0.2} \quad (5.1)$$

Para estimar el coste de inversión relacionado con la potencia del electrolizador, se ha empleado la expresión 5.1, en la cual es necesario introducir el valor de la potencia (P_{EL}), expresado en megavatios (MW) [15].

El hidrógeno producido se destina a su venta como vector energético. No obstante, es necesario incluir un sistema de almacenamiento capaz de guardar dicho hidrógeno durante un período mínimo de seguridad, el cual dependerá de la frecuencia de recogida. Se ha contemplado almacenar hasta 450 kg de hidrógeno comprimido a 300 bar, mediante un sistema modular estacionario tipo skid, compuesto por baterías de cilindros interconectados y equipos de seguridad. El valor estimado guarda coherencia con las referencias comerciales actuales para sistemas industriales certificados conforme a la normativa internacional ISO 11130 e ISO 19884.

Por otra parte, el oxígeno producido por el electrolizador debe someterse a una etapa de purificación para su uso medicinal. Esta purificación debe garantizar una pureza igual o superior al 93%, conforme a los estándares establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Además, los sistemas utilizados deben contar con certificación ISO 13485, que asegura el cumplimiento de los requisitos de calidad y seguridad exigidos para dispositivos médicos. Teniendo en cuenta este aspecto, para poder integrar el oxígeno producido en el sistema de suministro del hospital, es necesario incorporar un sistema de purificación de oxígeno. El coste de este sistema se ha estimado en un rango entre el 8 y 12 % del coste del electrolizador, en línea con referencias de proyectos similares. Asimismo, se ha contemplado la inclusión de un equipo adicional para eliminar posibles trazas de hidrógeno residual. No se incluyen equipos de almacenamiento, distribución y secado de oxígeno puesto que se asume que el hospital de estudio debe incorporar dicha infraestructura de antemano.

El proceso de electrólisis para la producción de hidrógeno y oxígeno requiere, de un suministro de agua de alta pureza. Teniendo en cuenta que se consumen aproximadamente 9 litros por cada kilogramo de hidrógeno producido, se ha incluido en la inversión inicial un sistema de ósmosis inversa con capacidad para suministrar 75 litros por hora de agua ultrapura. Además, se ha contemplado la incorporación de un sistema de almacenamiento con un margen de seguridad de 500 litros.

Respecto a los costes de mantenimiento (OPEX), se han contemplado los siguientes aspectos:

- Instalación fotovoltaica: se ha estimado un coste de mantenimiento de 10 €/kWp, un valor típico considerando la potencia instalada y las condiciones geográficas de la ubicación de la planta.
- Electrolizador: el coste de mantenimiento anual se ha considerado equivalente a 50 €/kWp, aproximadamente un 3% del total del equipo, en línea con referencias de proyectos similares y recomendaciones de fabricantes.
- Consumo de agua: se ha incluido un coste de 0,02 €/litro para el suministro de agua de alta pureza necesaria para el funcionamiento del electrolizador.

A continuación, se presenta las tablas resumen asociadas al CAPEX y el OPEX para una potencia de electrolizador de 120 kW_p.

CAPEX			
CONCEPTO	UNIDADES	COSTE UNITARIO	COSTE TOTAL
Módulos Canadian 670 Wp	1185	120,60 €	142.911,00 €
Inversores Huawei-100 KTL	8	3.600,00 €	28.800,00 €
Elemento Monitorización	1	1.300,00 €	1.300,00 €
Estructura Coplanar (microrrail)	740	10,00 €	7.400,00 €
Estructura Triangular Lastrada Cubierta	445	45,00 €	20.025,00 €
Electrolizador	1	220.052,47 €	220.052,47 €
Almacenamiento H ₂	1	200.000,00 €	200.000,00 €
Sistema purificacion O ₂	1	26.406,30 €	26.406,30 €
LNI High Press H ₂ /Water Separator	1	865,00 €	865,00 €
Equipo ósmosis inversa AguaBona JET-01 / 075	1	4.269,00 €	4.269,00 €
Aqua Energy Depósito Horizontal 500 litros	1	251,7	251,70 €
Mano de Obra	206 días		106.635,36 €
BOP	1	103.357,87 €	103.357,87 €
Varios	1	25.050,00 €	25.050,00 €
TOTAL			887.323,69 €

Tabla 5.1: Inversión inicial (CAPEX)

OPEX	
Instalación fotovoltaica	10,00 €/kWp
Electrolizador	50,00 €/kWp
Suministro de Agua	0,02 €/litro

Tabla 5.2: Costes de mantenimiento (OPEX)

En las simulaciones posteriores, únicamente se verán afectados aquellos elementos del CAPEX y OPEX relacionados directamente con el diseño del electrolizador. Estos son: la inversión inicial del equipo, el coste de mantenimiento proporcional a su potencia, y el coste asociado al suministro de agua necesario para su funcionamiento.

El dimensionamiento del electrolizador representa aproximadamente entre un 20 % y un 40 % de la inversión total del proyecto. A medida que se incrementa la potencia instalada, se requiere una mayor inversión inicial y, en consecuencia, costes de mantenimiento más elevados. Este comportamiento será un factor clave a considerar en los diferentes escenarios que se evaluarán a continuación.

5.2 Evaluación técnica de escenarios

Con el objetivo de analizar la viabilidad del sistema híbrido solar-hidrógeno diseñado en el Hospital Materno-Infantil de Málaga, se han llevado a cabo tres simulaciones en las que se prioriza distintos criterios dentro del sistema de scoring previamente definido. Los escenarios planteados permiten observar como varían los indicadores técnicos y económicos en función de la importancia asignada a cada criterio (H_2 , TIR y Payback), facilitando la toma de decisiones para diferentes tipos de proyectos o perfiles de inversión.

5.2.1 Escenario 1: Priorización de la rentabilidad (TIR)

En este primer escenario se otorga el mayor peso relativo al criterio de rentabilidad, con el objetivo de maximizar el rendimiento económico del proyecto en el menor tiempo posible. De esta manera, se otorga un peso del 80% al TIR, un 10% a la producción de H_2 , y un 10% al Payback.

El modelo presenta una potencia óptima de electrolizador de 160 kW que ofrece los siguientes resultados:

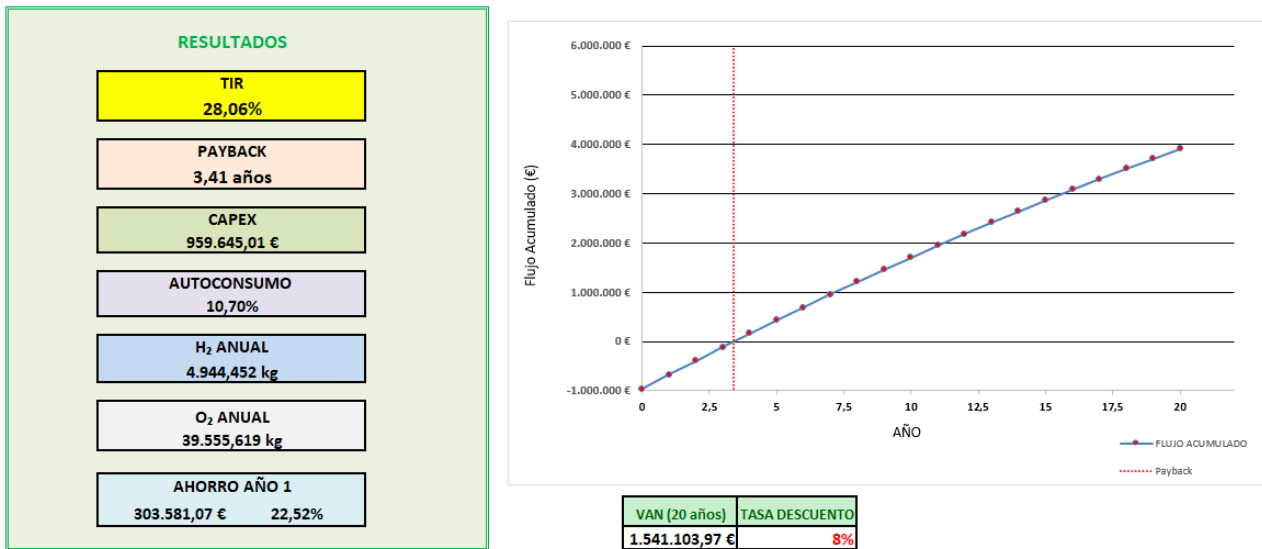


Figura 5.3: Resultados escenario 1

Este escenario es el más favorable desde una perspectiva puramente económica. Aunque no maximiza la producción de hidrógeno, ofrece el mejor rendimiento sobre la inversión inicial, siendo por tanto ideal para proyectos con un enfoque puramente financiero o con limitaciones en el presupuesto inicial.

Seguidamente, se presenta un gráfico que muestra el porcentaje de carga medio al que opera el electrolizador un día representativo para cada mes del año.

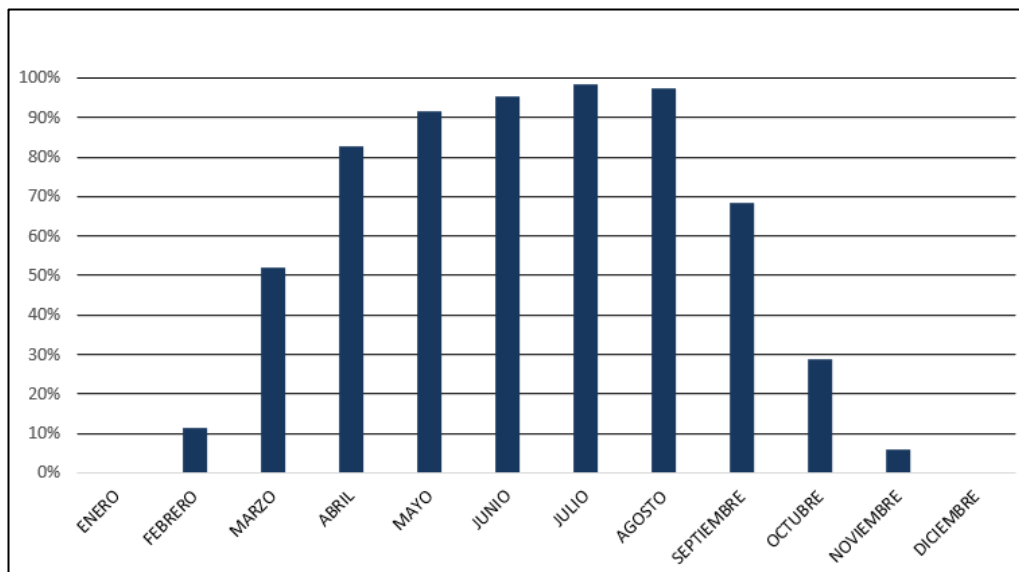


Figura 5.4: Porcentaje de carga medio anual del electrolizador escenario 1

5.2.2 Escenario 2: Priorización de la producción de H₂

En este segundo escenario se busca maximizar la cantidad de hidrógeno producido anualmente, priorizando el aprovechamiento del sistema como vector energético y dejando de lado levemente los criterios financieros. Se otorga un peso del 80% a la producción de H₂, un 10% al TIR y otro 10% restante al Payback.

El modelo alcanza una potencia óptima de electrolizador de 280 kW, que presenta los siguientes resultados:

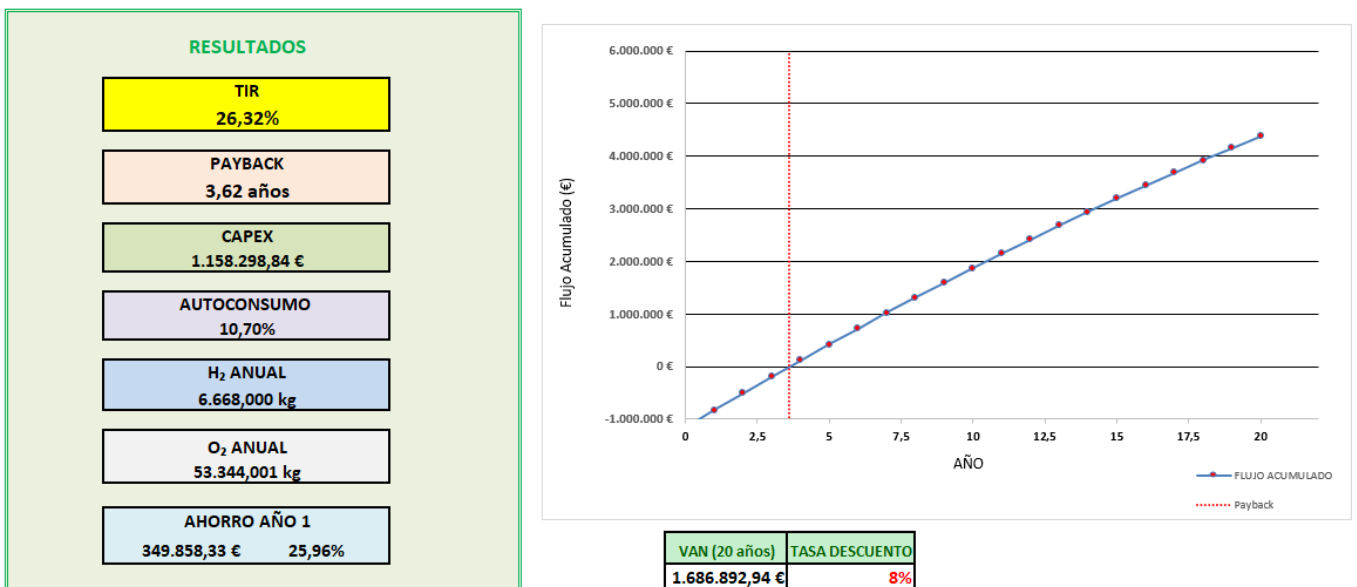


Figura 5.5: Resultados escenario 2

Este escenario es el más adecuado para aplicaciones donde el objetivo sea abastecer mayores volúmenes de hidrógeno o reducir al máximo el uso de combustibles fósiles y favorecer la reducción de la huella de carbono. Por otra parte, los indicadores económicos siguen siendo positivos, se observa una ligera penalización en la rentabilidad y el Payback respecto al escenario 1, justificada por el aumento de la potencia instalada y la inversión inicial asociada.

Con el aumento de la potencia del electrolizador, también se ve afectado su comportamiento a lo largo del año, ya que tiende a operar con una menor carga parcial, lo que reduce su grado de aprovechamiento como se observa en la Figura 5.6:

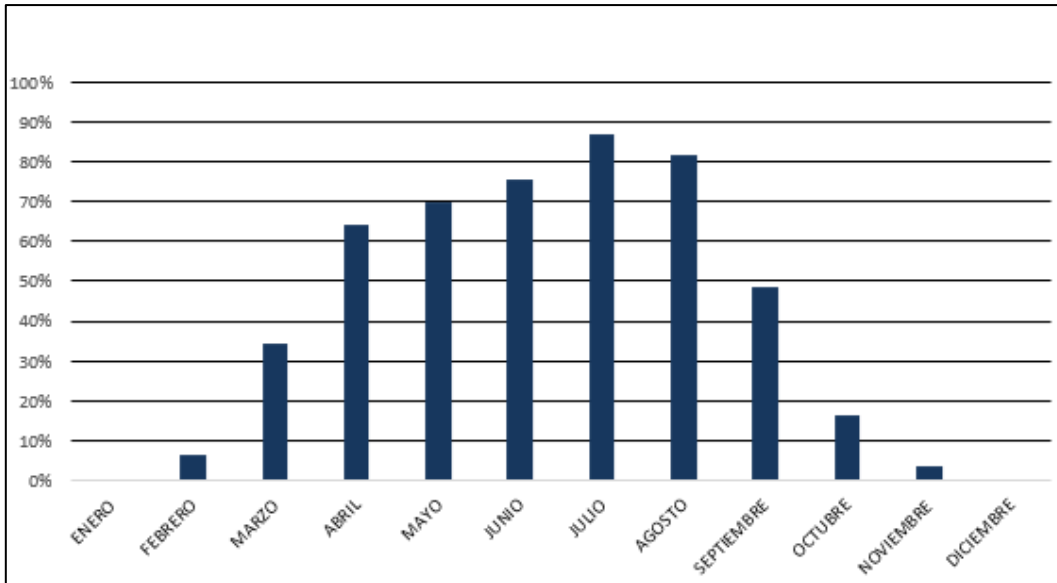


Figura 5.6: Porcentaje de carga medio anual del electrolizador escenario 2

5.2.3 Escenario 3: Enfoque equilibrado

Este tercer y último escenario busca un equilibrio entre rentabilidad económica y producción de hidrógeno, distribuyendo equitativamente los pesos asignados en el sistema de scoring. Se otorga un peso del 40% a la producción de H₂ y a la rentabilidad (TIR), y un 20% restante al Payback.

El modelo alcanza una potencia óptima de electrolizador de 180 kW, que presenta los siguientes resultados:

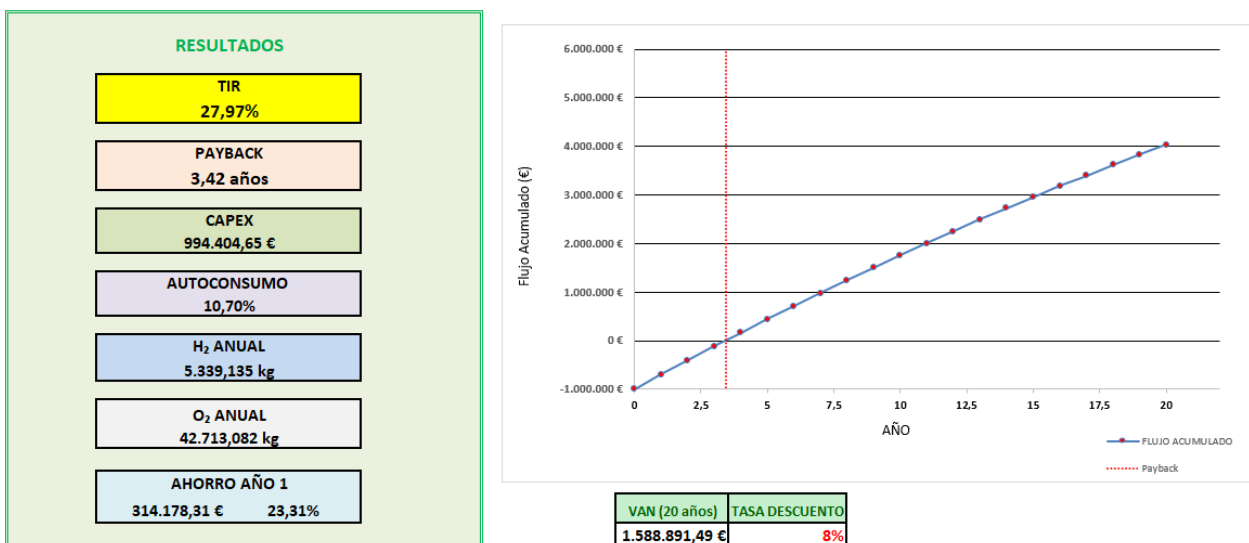


Figura 5.7: Resultados escenario 3

Este escenario representa una solución equilibrada entre viabilidad económica, producción y amortización del sistema. Ofrece una alternativa para proyectos que buscan maximizar el impacto técnico sin comprometer demasiado la rentabilidad.

En esta situación, el electrolizador mejora ligeramente su grado de aprovechamiento respecto al escenario 2:

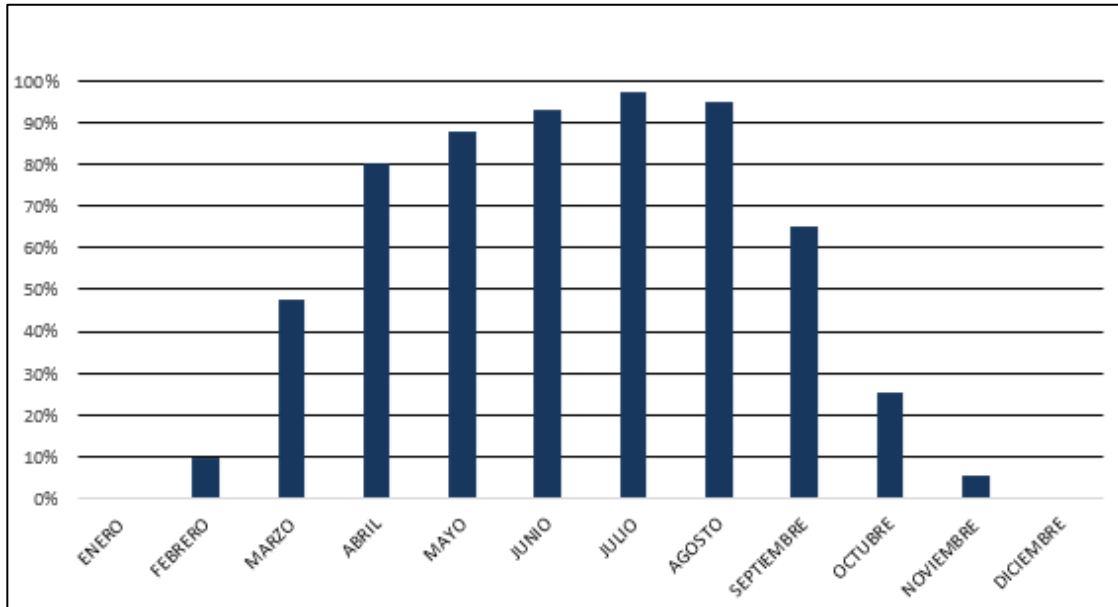


Figura 5.8: Porcentaje de carga medio anual del electrolizador escenario 3

5.3 Conclusiones

El presente Trabajo de Fin de Grado ha tenido como objetivo principal la modelización y evaluación técnico-económica de un sistema híbrido solar-hidrógeno aplicado al entorno hospitalario, concretamente en el Hospital Materno-Infantil de Málaga. A través del diseño de una instalación fotovoltaica de 794 kWp integrada con un electrolizador alcalino, se ha demostrado con creces la viabilidad de aprovechar excedentes energéticos renovables para la producción de hidrógeno verde y oxígeno medicinal, contribuyendo a la reducción de emisiones y a la autosuficiencia energética en el sector sanitario, reflejando la gran oportunidad que supone un proyecto de estas características.

Durante el desarrollo del trabajo se han planteado y analizado tres escenarios distintos basados en un sistema de ponderación (scoring) entre criterios económicos (TIR, Payback) y técnicos (producción de H₂). Estos han permitido valorar el impacto de diferentes potencias del electrolizador sobre el comportamiento global del sistema.

- El escenario 1, centrado en maximizar la rentabilidad económica, logró una TIR del 29,18 % y un payback inferior a 3,4 años, pero con una producción anual de hidrógeno más contenida (4.944 kg).
- El escenario 2, orientado a maximizar la producción energética, alcanzó los 6.668 kg de H₂ anuales, aunque a costa de un mayor CAPEX y un ligero descenso aproximado del 2% en la TIR.
- El escenario 3, con un enfoque equilibrado entre rentabilidad y producción, se considera la opción más sólida. Con una potencia de electrolizador de 180 kW, ha logrado una producción de 5.339 kg de hidrógeno al año, una TIR del 27,97 % y un payback de 3,42 años. Además, presenta un VAN superior a 1,5 millones de euros, lo que confirma la sostenibilidad económica del sistema a largo plazo pese a una degradación anual del sistema estimada en 1,5% anual.

Desde el punto de vista medioambiental, la producción de hidrógeno verde en el escenario 3 supone un ahorro estimado de 63 toneladas de CO₂ al año, además, se consigue cubrir el 10,7% de la demanda eléctrica del hospital, que suponen 961.404 kWh anuales y un ahorro aproximado de 192 toneladas de CO₂, logrando alcanzar un ahorro anual total de 255 toneladas de CO₂. Esto representa un paso significativo hacia la descarbonización del sector hospitalario, alineándose con los objetivos establecidos en la Agenda 2030 y el Acuerdo de París.

En términos de ahorro energético, el sistema permitiría al hospital reducir su factura eléctrica en más de un 23 % anual, lo que supone una cantidad de 314.178 € el primer año, mejorando su eficiencia operativa y disminuyendo la dependencia de la red eléctrica convencional.

Más allá de los resultados obtenidos, este proyecto pone de manifiesto el papel estratégico del hidrógeno como vector energético en la transición hacia un modelo energético más sostenible. La integración de estas tecnologías en edificaciones, como centros sanitarios, no solo permite reducir la huella de carbono, sino que también acelera la adopción y normalización del hidrógeno en el entorno urbano e industrial.

El trabajo desarrollado demuestra que la combinación de energías renovables y tecnologías de hidrógeno es una solución técnica y económicamente viable, incluso en entornos exigentes como un hospital. La metodología aplicada, los resultados obtenidos y el enfoque de simulación presentado pueden servir de base para futuras implementaciones reales, fomentando la innovación, la eficiencia energética y la sostenibilidad en el diseño de infraestructuras.

No obstante, y pese a los resultados positivos obtenidos, el estudio presenta márgenes de mejora que podrían abordarse en futuros estudios. Entre ellos, se encuentra la incorporación de curvas de consumo reales del hospital, asimismo, resultaría de gran interés analizar la viabilidad de escalado del modelo desarrollado en otros centros hospitalarios con diferentes perfiles de demanda, así como, su posible incorporación en comunidades energéticas, para ello, es necesario actualizar el modelo actual a un modelo más compacto y que permita operar con cualquier dato de demanda y producción fotovoltaica dado.

Los modelos desarrollados en este Trabajo Fin de Grado, junto con los resultados obtenidos, se utilizarán como base para la preparación de un artículo científico en una revista internacional indexada, con el objetivo de seguir contribuyendo al avance en la integración de tecnologías de hidrógeno en entornos reales y sostenibles.





6 Bibliografía

- [1] M. Wiatros-Motyka *et al.*, “Global Electricity Review 2023,” 2023.
- [2] “The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish”.
- [3] Unfccc, “Paris Agreement Spanish.”
- [4] C. Acar, E. Erturk, and I. Firtina-Ertis, “Performance analysis of a stand-alone integrated solar hydrogen energy system for zero energy buildings,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 5, pp. 1664–1684, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.051.
- [5] V. Khaligh, A. Ghezelbash, M. Zarei, J. Liu, and W. Won, “Efficient integration of alkaline water electrolyzer – A model predictive control approach for a sustainable low-carbon district heating system,” *Energy Convers Manag*, vol. 292, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117404.
- [6] M. G. Basiony, S. Nada, S. Mori, and H. Hassan, “Performance evaluation of standalone new solar energy system of hybrid PV/electrolyzer/fuel cell/MED-MVC with hydrogen production and storage for power and freshwater building demand,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 77, pp. 1217–1234, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.211.
- [7] H. Yin, Y. Xu, and J. Wang, “Deep learning-based optimization of a hydrogen and oxygen production system for patients in hospital with alkaline electrolyzer,” *Fuel*, vol. 333, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.126441.
- [8] S. Toghyani, S. Fakhradini, E. Afshari, E. Baniyasi, M. Y. Abdollahzadeh Jamalabadi, and M. Safdari Shadloo, “Optimization of operating parameters of a polymer exchange membrane electrolyzer,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 13, pp. 6403–6414, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.186.
- [9] S. Shiva Kumar and H. Lim, “An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production,” Nov. 01, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.egy.2022.10.127.
- [10] S. Shiva Kumar and V. Himabindu, “Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review,” Dec. 01, 2019, *KeAi Communications Co.* doi: 10.1016/j.mset.2019.03.002.
- [11] A. Khalil, “A STUDY OF THE FACTORS INFLUENCING THE EFFICIENCY OF AMORPHOUS SILICON SOLAR CELLS USING COMPUTER SIMULATION,” 2004, doi: 10.13140/RG.2.1.2650.4163.
- [12] “BT22(Modulo Solar)”.
- [13] C. D. Míguez, “Consumos energéticos.”
- [14] I. Santiago, A. Moreno-Munoz, P. Quintero-Jiménez, F. Garcia-Torres, and M. J. Gonzalez-Redondo, “Electricity demand during pandemic times: The case of the COVID-19 in Spain,” *Energy Policy*, vol. 148, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111964.



- [15] G. Squadrito, “OXYGEN FROM ELECTROLYSIS FOR MEDICAL USE: AN ECONOMICALLY FEASIBLE ROUTE.”