Universidad Europea

Universidad Europea de Madrid

Máster en Transición Energética Renovable

Trabajo de Fin de Máster

Energía fotovoltaica y almacenamiento de H_2 verde para autoconsumo y punto de recarga de vehículos en Supermercado Costco Las Rozas

Autor: Paúl Morales Mendoza

Tutor: David Fernández Rodríguez

Índice de contenido

1 Introducción 7

1.1 Planteamiento 7

1.2 Objetivo 9

1.3 Alcance del proyecto 9

2 Estado del Arte 11

2.1 Normativa y generalidades 11

2.2 Hidrógeno (H_2) 12

2.2.1 ¿Qué es? 12

2.2.2 Clasificación de H_2 13

2.2.3 Producción de H_2 Verde 14

2.2.4 Principales Componentes de una planta de generación 16

2.2.5 Aplicaciones de hidrógeno 17

2.2.6 Pilas de combustible 20

2.3 Proyectos de hidrógeno 21

2.4 Electrolizadores comerciales 23

2.5 Vehículos de hidrógeno 27

3 Caso de Estudio 29

3.1 Selección de la ubicación 29

3.2 Demanda energética 30

4 Descripción de instalaciones proyectadas 34

4.1 Planta fotovoltaica 34

4.1.1 Área disponible 34

4.1.2 Componentes principales 34

4.1.3 Descripción técnica de la solución 35

4.2 Planta de hidrógeno 35

4.2.1 Componentes principales 35

4.2.2 Criterios de dimensionamiento de la planta de hidrógeno 36

5 Diseño del sistema de hidrógeno 38

5.1 Demanda de hidrógeno 38

5.2 Electrolizador 38

5.3 Sistema de compresión y almacenamiento 40

5.3.1 Sistema de Baja presión 40

5.3.2 Sistema de Alta presión 41
5.4 Dispensador 43
6 Diseño del sistema fotovoltaico 44
6.1 Irradiación disponible 44
6.2 Módulo fotovoltaico 45
6.2.1 Orientación 45
6.2.2 Características del sistema parking de vehículos/módulo fotovoltaico 46
6.2.3 Módulo fotovoltaico 47
6.2.4 Disposición física 49
6.2.5 Sombreado 50
6.3 Inversor 52
6.4 Producción de Energía 53
7 Interconexiones con instalaciones existentes 56
8 Evaluación técnica económica 57
8.1 Estimación de Costos 57
8.2 Estimación de Beneficios 58
8.3 Evaluación económica 59
9 Conclusiones y recomendaciones 62
10 Anexos 70
11 Referencias 65

Índice de tablas

Tabla 1: Costes unitarios de integración de baterías, [7] 8
Tabla 2: Consumo diario de potencia y energía 32
Tabla 3: Consumo mensual y anual de energía 33
Tabla 4: Requerimiento diario de Hidrógeno 38
Tabla 5: Requerimiento de Electrolizador 39
Tabla 6: Resumen de Electrolizadores modulares comerciales 39
Tabla 7: Requerimiento de almacenamiento de Hidrógeno 40
Tabla 8: Tipos de tanques de almacenamiento de baja presión, [50] 41
Tabla 9: Cálculo de número de tanques de almacenamiento de Hidrógeno 41
Tabla 10: Tipos de tanques de almacenamiento, [51] 41
Tabla 11: Cálculo de número de tanques de almacenamiento de Hidrógeno 42
Tabla 12: Compresores de hidrógeno Toplong Compressors, [52] 42
Tabla 13: Irradiación mensual y diaria 44
Tabla 14: Selección de tamaño y potencia de módulos fotovoltaicos 47
Tabla 15: Resumen de instalación de módulos fotovoltaicos 50
Tabla 16: Resumen de simulación 53
Tabla 17: Resumen de costos de inversión 57
Tabla 18: Resumen de costos de inversión 58
Tabla 19: Resumen de costos de inversión 58
Tabla 20: Resumen de beneficios 59
Tabla 21: Resumen de Costos y beneficios en el tiempo 60
Tabla 22: Resumen de indicadores económicos 61
Tabla 23: Flujo de caja de proyecto con financiamiento 62

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Estructura de generación de energía eléctrica en 2024 en España, [4]..... 7
Ilustración 2: Gráfica representativa de una molécula de H_2 12
Ilustración 3: Gráfica representativa de vectores energéticos 13
Ilustración 4: Gráfica de tipos de hidrógeno, [13]..... 14
Ilustración 5: Gráfica de generación de hidrógeno verde..... 14
Ilustración 6: Gráfica de generación de hidrógeno verde [14]. 15
Ilustración 7: Tipos de electrolizadores, [15] 16
Ilustración 8: Gráfica de proceso de planta de generación de H_2 con electrolizador alcalino, [16] 17
Ilustración 9: Gráfica de proceso de planta de generación de H_2 con electrolizador tipo PEM, [16] 17
Ilustración 10: Aplicaciones de hidrógeno, [24]..... 19
Ilustración 11: Potencia acumulada de los proyectos del Censo con FID o más avanzados, [25]..... 19
Ilustración 12: Inversión y proyectos por cada tecnología de electrolizador, 26] 20
Ilustración 13: Pila de combustible alcalina, [28]..... 20
Ilustración 14: Ubicación de proyectos en hidrógeno, [29] 21
Ilustración 15: Ubicación de proyectos en hidrógeno, [30] 22
Ilustración 16: Stargate Hydrogen – Modelo Gateway 200 23
Ilustración 17: Hygreen energy – Modelo HGPS 50 24
Ilustración 18: Advait Energy – Modelo 250 24
Ilustración 19: Hefei Sinopower Technologies – Modelo Rubri-A1-0005 25
Ilustración 20: Hefei Sinopower Technologies – Modelo Rubri-P1-0020 25
Ilustración 21: McPhy – Modelo Piel..... 26
Ilustración 22: NEL ASA – Modelo Serie C..... 26
Ilustración 23: Cummins – Modelo HySAT 27
Ilustración 24: Esquema de Hidrógeno en Toyota Mirai, [41] 28
Ilustración 25: Esquema carga de Hidrógeno en Hiundai Nexo, [42] 28
Ilustración 26: Vista en planta del Supermercado, obtenida de Google earth..... 29
Ilustración 27: Fotografía del Supermercado, Enero 2025 30
Ilustración 28: Perfil de demanda típico de un supermercado/Supermercado, elaboración propia..... 31
Ilustración 29: Perfil de demanda estimado de Costco..... 32
Ilustración 30: Módulos de Paneles Fotovoltaicos/Parking de vehículos, [46]..... 34
Ilustración 31: Esquema de Sistema Fotovoltaico..... 35
Ilustración 32: Esquema de Sistema de generación de Hidrógeno (Electrolizador Alcalino), [47]..... 36
Ilustración 33: Esquema general de procesos de planta de hidrógeno..... 37
Ilustración 34: Duración media del día - Madrid..... 38
Ilustración 35: Esquema contenerizado de electrolizador, [40] 40
Ilustración 36: Dispensador de hidrógeno, [53]..... 43
Ilustración 37: Irradiación mensual..... 44

Ilustración 38: Vista en planta del Supermercado 45
Ilustración 39: Zona típica de aparcamiento 46
Ilustración 40: Esquema de paneles en aparcamientos 46
Ilustración 41: Curva tensión vs corriente, figura obtenida de PVSyst 48
Ilustración 42: Agrupamiento de paneles 48
Ilustración 43: Esquema de paneles en aparcamientos 49
Ilustración 44: Generación de energía vs inclinación de paneles 50
Ilustración 45: Diagrama solar del Bloque 1 51
Ilustración 46: Diagrama solar del Bloque 2 51
Ilustración 47: Diagrama solar del Bloque 3 52
Ilustración 48: Inversor Growatt MAX 100KTL3-X LV, [55] 53
Ilustración 49: Energía generada por año vs demanda de la planta de H_2 54
Ilustración 50: Demanda de Energía Supermercado vs Energía Fotovoltaica Generada55
Ilustración 51: Esquema general de conexiones 56
Ilustración 52: Distribución de costos 58
Ilustración 53: Acumulación neta de flujos de caja en el tiempo 60
Ilustración 54: Acumulación neta de flujos de caja en el tiempo considerando financiación 61

1 Introducción

1.1 Planteamiento

La forma en que consumimos energía en nuestra vida diaria incide directamente en la contaminación ambiental y el cambio climático. A nivel global, los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas aún representan más del 70 % de la generación eléctrica al año 2023, aunque algunos datos apuntan a una proporción incluso mayor del suministro energético total, con un incremento de emisiones de CO_2 relacionadas con la energía en 0,8 %. [1]

En el transporte, los vehículos eléctricos (con baterías o pilas de hidrógeno) representan una solución clave en la reducción de emisiones de CO_2; sin embargo, solo en la Unión Europea, el transporte por carretera emite aproximadamente 760 millones de toneladas de CO_2, equivalentes al 21 % del total, y ha experimentado un aumento del 24 % desde 1990. En España, solo el transporte por carretera incrementó sus emisiones un 1,6 % en 2024 respecto al año anterior, siendo el sector con mayor contribución al aumento de gases de efecto invernadero en el país. [2][3]

En este contexto, las energías renovables se presentan como alternativas viables y de menor impacto ambiental frente a las fuentes tradicionales de energía basadas en combustibles fósiles, ya que reducen de forma significativa las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuyen a mitigar el cambio climático. Además, son recursos inagotables que ofrecen una solución energética sostenible y a largo plazo, mejorando la seguridad energética y disminuyendo la dependencia de importaciones. Durante su operación, estos sistemas no liberan gases de efecto invernadero, lo que los convierte en un pilar clave para la transición hacia un modelo energético más limpio y responsable.

Energías renovables como la energía solar, al provenir de un recurso inagotable y no generar emisiones directas de CO_2 durante su funcionamiento, tiene un impacto ambiental sustancialmente menor en comparación con los combustibles fósiles. En 2024, las energías renovables, incluyendo solar, eólica e hidráulica, representaron el 56,8 % de toda la electricidad generada en España, con la fotovoltaica aportando un 17 % del mix eléctrico nacional.

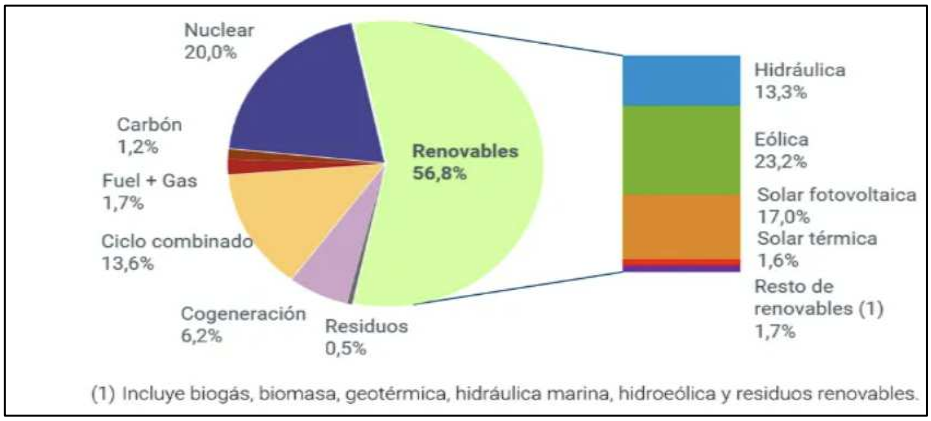


Ilustración 1: Estructura de generación de energía eléctrica en 2024 en España, [4]

No obstante, uno de los principales retos de la solar, y en general de las energías renovables, es su intermitencia, lo que dificulta su integración a los sistemas eléctricos convencionales. Un gran ejemplo de este problema lo sufrió el sistema eléctrico español con el apagón más grave de su historia el 28 de abril de 2025, cuando se desconectó el 60 % de la producción en solo segundos debido a la caída de 15 GW de energía fotovoltaica, evidenciando la fragilidad del sistema frente a variaciones abruptas en la generación renovable. [5].

El uso de baterías es una solución consolidada para almacenar energía durante los momentos de alta producción y reutilizarla en periodos de mayor demanda. No obstante, esta alternativa tiene costes significativos: por ejemplo, en 2021 una batería de 5 kWh costaba aproximadamente 3 045 €, mientras que a finales de 2024 su precio se redujo un 28 %, situándose en 2 195 €. [6].

Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), el coste unitario de integrar baterías en instalaciones híbridas puede alcanzar hasta 250 €/kWh, o incluso 300 €/kWh si se requiere *grid forming*.

Tabla 1: Costes unitarios de integración de baterías, [7]

Coste unitario máximo del proyecto	
	(€/kWh)
Standalone	250
Standalone con *grid forming*	300
Almacenamiento térmico	300
Almacenamiento hibridado*	Establecido para cada tecnología
	(€/kW)
Bombeo nuevo	1.500
Bombeo en infraestructura existente	1.000

Esto supone que muchos proyectos sean económicamente inviables sin incentivos. Como alternativa, los sistemas híbridos permiten combinar generación renovable (solar, eólica) con autoconsumo directo y el aprovechamiento del excedente para producir hidrógeno verde, evitando en muchos casos la necesidad de almacenamiento eléctrico tradicional.

Como parte de las estrategias para reducir las emisiones de CO_2 y optimizar el aprovechamiento de las energías renovables, se propone el desarrollo de proyectos que integren la generación fotovoltaica con la producción de hidrógeno verde. Este enfoque permite utilizar la electricidad renovable para alimentar electrolizadores, generando hidrógeno que puede emplearse como combustible en el transporte, contribuyendo así a la descarbonización. Además, estas instalaciones pueden ubicarse en espacios con áreas libres destinadas al estacionamiento de vehículos, maximizando el uso del suelo mediante cubiertas solares. Finalmente, con el objetivo de eliminar la necesidad de almacenamiento en baterías y reducir los costes asociados, se opta emplazamientos donde la demanda supere la generación fotovoltaica, de forma tal que los excedentes de energía pueden verterse al sistema para autoconsumo.

1.2 Objetivo

El objeto de presente trabajo de fin de máster es el dimensionamiento de una planta de generación y almacenamiento de hidrógeno en el aparcamiento de un Supermercado para diferentes usos (carga de vehículos de hidrógeno y autoconsumo). Para llevar a cabo ese objetivo principal es necesario realizar las siguientes tareas:

- Revisión bibliográfica de las tecnologías del hidrógeno.
- Determinar la ubicación del proyecto.
- Estimar la demanda eléctrica del supermercado.
- Realizar el dimensionamiento de la planta fotovoltaica.
- Realizar el dimensionamiento de la planta de hidrógeno.
- Llevar a cabo una evaluación económica.
- Obtener conclusiones derivadas del estudio.

1.3 Alcance del proyecto

En el primer capítulo se presenta el contexto actual en cuanto a la transición energética y la necesidad de reducir las emisiones de CO_2 asociadas al uso intensivo de combustibles fósiles, incorporando soluciones sostenibles como la generación renovable y el hidrógeno verde. Así mismo, se lista el objetivo fundamental del proyecto y las tareas que se llevarán a cabo para su consecución.

El segundo capítulo desarrolla el estado del arte, detallando las normativas aplicables a sistemas de generación de hidrógeno y generación de energía fotovoltaica, así como normativas o criterios para la implementación de los componentes de estos sistemas en un Supermercado. En caso de los sistemas fotovoltaicos, se evaluarán las opciones o alternativas disponibles para la implementación de módulos en zonas de aparcamiento. Comentaremos acerca del hidrógeno como vehículo para el almacenamiento de energía eléctrica, además de explicar que es el hidrógeno verde. Finalmente, evaluaremos proyectos o instalaciones relacionadas o similares con el proyecto en desarrollo.

En el tercer capítulo describe la selección del lugar en donde se desarrollará el proyecto además de la estimación de la demanda, la cual será prevista por horas, de forma que podamos evaluar los picos de demanda durante el día, además de considerar escenarios en temporada de verano e invierno.

El cuarto capítulo describe de manera general las instalaciones del Supermercado, y de manera más detallada las zonas en donde se llevaría a cabo la implementación del proyecto.

El quinto capítulo estará comprendido por el diseño del sistema de generación de hidrógeno, el cual está comprendido por los siguientes:

- Electrolizador.
- Tanque de almacenamiento de hidrógeno.
- Dispensador de hidrógeno.

La capacidad de producción se establecerá según las proyecciones de demanda de hidrógeno asociadas al uso en vehículos particulares y unidades de transporte público impulsadas por celdas de combustibles. Así mismo, se ubicarán los puntos de carga para vehículos considerando la distribución de las zonas de aparcamiento.

En el sexto capítulo desarrollaremos el diseño de la planta fotovoltaica, la cual comprende los siguientes:

- Módulo fotovoltaico.
- Regulador/Inversor.

El esquema de generación fotovoltaica será adecuado para zonas de aparcamiento de vehículos, por lo tanto, físicamente, el sistema hará uso de tecnologías disponibles en el mercado para este fin. Se evaluará la mejor posición de los paneles para obtener la mayor generación de energía, haciendo un uso eficiente del área disponible de aparcamiento. La potencia generada por los módulos fotovoltaicos, inversor y demás componentes será determinada mediante el software PVSyst. Finalmente, se realizarán bosquejos de la implementación del proyecto considerando lo siguiente:

- Esquema de planta del Supermercado, considerando las zonas actualmente construidas y zonas de aparcamiento en donde se instalarán los paneles fotovoltaicos.
- Esquema de elevación típica de como quedarían instalados los módulos en el aparcamiento.

El séptimo capítulo comprende las interconexiones necesarias con el tablero principal del Supermercado, con el fin de proveer energía desde la generación de electricidad mediante los paneles fotovoltaicos.

Finalmente, el octavo capítulo comprende la estimación del costo de los componentes del proyecto, la cuantificación del beneficio obtenido como ahorro respecto del costo de la energía eléctrica consumida desde la red local reemplazada por la energía eléctrica generada por el sistema fotovoltaico y la evaluación económica mediante la determinación de la tasa interna de retorno de la inversión.

2 Estado del Arte

Este capítulo presenta una revisión detallada del estado del arte en relación con el uso del hidrógeno como vector energético, con especial énfasis en su aplicación en el sector transporte. Se abordan aspectos normativos, técnicos y tecnológicos que sustentan el desarrollo y la implementación de sistemas basados en hidrógeno, incluyendo su clasificación, métodos de producción, principales componentes de las plantas de generación, así como sus diversas aplicaciones industriales y de movilidad.

Particularmente, se pone énfasis en la producción de hidrógeno verde a partir de fuentes renovables, específicamente mediante el uso de energía fotovoltaica. Este enfoque busca aprovechar la abundancia del recurso solar para generar hidrógeno de forma sostenible, sin emisiones de carbono, lo cual resulta fundamental en el contexto de la transición energética y la descarbonización del sector transporte. La integración entre generación fotovoltaica y electrólisis representa un componente clave en el diseño de soluciones energéticas limpias, eficientes y escalables, orientadas a la movilidad sustentable y al desarrollo de infraestructuras energéticas modernas.

2.1 Normativa y generalidades

Considerando que los suministros de cada sistema cumplen sus correspondientes normativas y reglamentaciones de fabricación, así como de calidad del propio suministro; la propia instalación también debe cumplir normativas respecto a cómo se deben implementar este tipo de sistemas en ambientes comerciales como los planteados en el presente proyecto, para lo cual se han evaluado y revisado los siguientes:

- Decretos Ley
- Código Técnico de la Edificación.
- Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión.
- Normas UNE, IEC y NFPA.

Respecto al sistema fotovoltaico, la normativa a seguir es el Código Técnico de la Edificación [8], el cual nos permitirá instalar los componentes de manera adecuada, minimizando el riesgo hacia las personas, así como hacia las instalaciones. El sistema de almacenamiento en hidrógeno cuenta con normas de generación de hidrógeno, instalación, almacenamiento, entre otros, tanto para hidrógeno en forma de gas o de líquido. La normativa general en este caso es la NFPA 2: Código de Tecnologías de Hidrógeno [9], que establece lineamientos de seguridad y diseño para sistemas de hidrógeno en diferentes aplicaciones. Además, se consideran las siguientes normativas y estándares técnicos relevantes:

- ISO 14687:2019 – Especificaciones de calidad para hidrógeno utilizado en celdas de combustible.
- ISO 22734:2019 – Requisitos para generadores de hidrógeno mediante electrólisis del agua, aplicables a la producción de hidrógeno verde.

- ISO 19880-1:2020 – Requisitos generales para estaciones de abastecimiento de hidrógeno.
- IEC 62282 (serie) – Normas técnicas para celdas de combustible, incluyendo seguridad, rendimiento y pruebas.
- CertifHy (UE) – Esquema europeo de certificación que define los criterios para clasificar el hidrógeno como renovable o de bajas emisiones.
- Directiva RED II (2018/2001/EU) – Marco regulatorio europeo que define la trazabilidad y sostenibilidad del hidrógeno renovable.
- NFPA 55 – Norma sobre almacenamiento y manejo de gases comprimidos, incluidos gases inflamables como el hidrógeno.
- ASME B31.12 – Código de tuberías de hidrógeno para aplicaciones industriales y de infraestructura.

Estas normativas permiten asegurar que los sistemas de hidrógeno verde cumplan con estándares internacionales de seguridad, calidad y eficiencia, facilitando su integración segura en proyectos energéticos, industriales o de transporte.

Localmente, España cuenta con políticas y legislaciones relacionadas con la producción de hidrógeno como actividad industrial, así mismo, cuenta con planes y objeticos claros y específicos acerca de la producción de hidrógeno a partir de energía renovables o hidrógeno verde Hoja de Ruta del Hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno verde [10].

Los puntos de carga vehicular tienen su impulso en el Real Decreto-ley 29/2021 [11], de 21 de diciembre, el cual fomenta y promueve la movilidad sostenible. La ley promueve la movilidad eléctrica e impulsa la instalación de puntos de recarga eximiendo para su instalación, licencias o autorizaciones por parte de la administración.

2.2 Hidrógeno (H_2)

2.2.1 ¿Qué es?

Conforme al Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico el hidrógeno en el elemento químico más abundante en el universo y se presenta en su forma molecular, formando el gas diatómico H_2 en condiciones normales [12], es decir, que el hidrógeno se compone de moléculas conformadas por dos átomos, tal como sucede con elementos como el nitrógeno y el oxígeno, que se encuentran en el aire a una presión y temperatura ambiente.

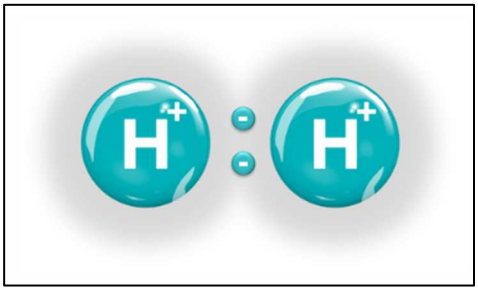


Ilustración 2: Gráfica representativa de una molécula de H_2

Así mismo, para producir hidrógeno es necesario el uso de energía; el hidrógeno (H_2) es almacenado para su inmediato o posterior uso, con lo cual se convierte en un vector energético.

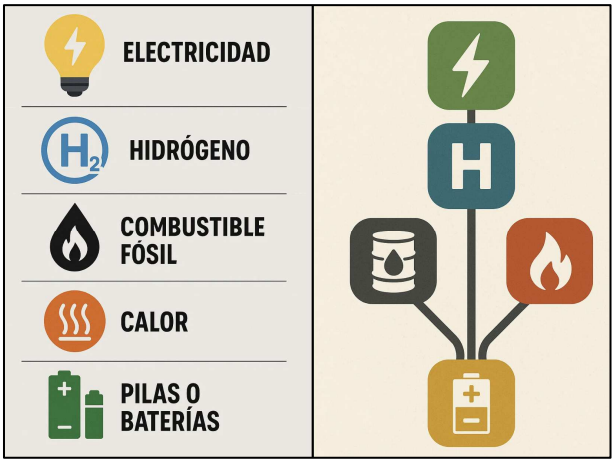


Ilustración 3: Gráfica representativa de vectores energéticos

2.2.2 Clasificación de H_2

Dependiendo de la fuente de energía usada para generar el H_2, puede ser clasificada en colores según lo siguiente:

- Hidrógeno Negro/Marrón, es aquel generado a partir de la gasificación del carbón; la generación de este tipo de H_2 tiene un alto impacto negativo sobre el ambiente (liberación de CO_2 al aire).
- Hidrógeno Gris, se genera a través del proceso químico de reformado del gas natural a partir del metano, componente principal del gas; así mismo, tiene un alto impacto negativo sobre el medio ambiente (liberación de CO_2 al aire).
- Hidrógeno Amarillo, para generar el H_2, se hace uso de un electrolizador (usando como materia prima el agua), el cual es alimentado por energía eléctrica cuyo origen será un mix de las diferentes fuentes de generación que inyectan energía en el sistema eléctrico.
- Hidrógeno Azul, se trata de una mejora del proceso de H_2 gris; en lugar de liberar el CO_2 al medio ambiente, se realiza una captura y almacenamiento de este en un alto porcentaje, reduciendo significativamente el impacto negativo al aire.
- Hidrógeno Rosa, de manera similar al H_2 amarillo, se hace uso de un electrolizador, pero en este caso se define que la fuente de energía que alimenta el proceso sea la generada por una central nuclear.
- Hidrógeno Verde, a diferencia del H_2 amarillo y rosa, usamos únicamente energía generada por centrales renovables como centrales fotovoltaicas, eólicas, etc.



Ilustración 4: Gráfica de tipos de hidrógeno, [13]

Como mencionamos anteriormente, el hidrógeno verde es el generado a partir de fuentes de energía renovable, haciendo uso del agua como materia prima, generando hidrógeno mediante el uso de un electrolizador, tal como se muestra en la siguiente figura:

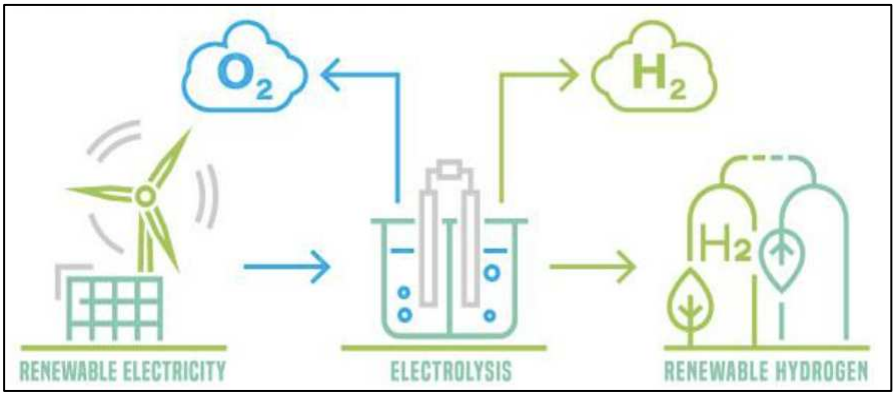


Ilustración 5: Gráfica de generación de hidrógeno verde

Como podemos observar, el electrolizador es alimentado de energía eléctrica que proviene de fuentes de generación renovable.

2.2.3 Producción de H_2 Verde

El hidrógeno verde se produce mediante el proceso de electrólisis (reacción química) del agua, lo cual consiste en darle energía eléctrica a la reacción química con el fin de separar las moléculas de agua (H_2O) en moléculas diatómicas gaseosas de hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2).

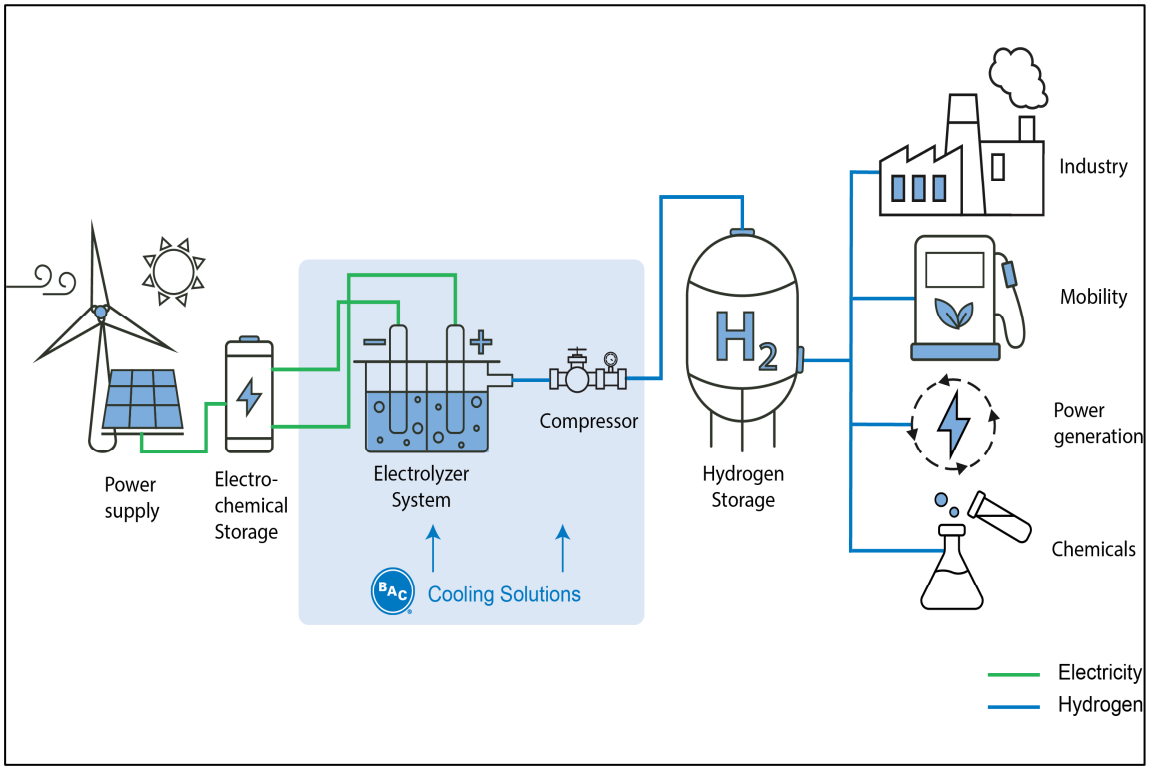


Ilustración 6: Gráfica de generación de hidrógeno verde [14].

La reacción química se realiza en un electrolizador, equipo capaz de producir hidrógeno mediante la reacción química antes mencionada. El hidrógeno generado es trasladado a un tanque de almacenamiento para su transporte o posterior uso.

Es posible la siguiente clasificación de electrolizadores dependiendo del tipo de electrolisis:

- Electrolizador Alcalino; utilizan una solución alcalina (como hidróxido de potasio) como electrolito. Destacan por su eficiencia energética y su bajo coste de fabricación por lo cual son utilizados con mucha frecuencia en aplicaciones industriales a gran escala.
- Electrolizador tipo PEM; utilizan una membrana de intercambio de protones y un electrolito polimérico sólido. Son equipos más compactos, sin embargo, tienen un costo más elevado.
- Electrolizador tipo SOEC; estos equipos se distinguen por su alta eficiencia energética, gran tolerancia a las impurezas, la posibilidad de emplear el calor residual y su versatilidad, ya que pueden funcionar para generar electricidad y calor a partir de hidrógeno, sin embargo, es una tecnología aun en desarrollo encontrándose muy pocos equipos comerciales. [16].

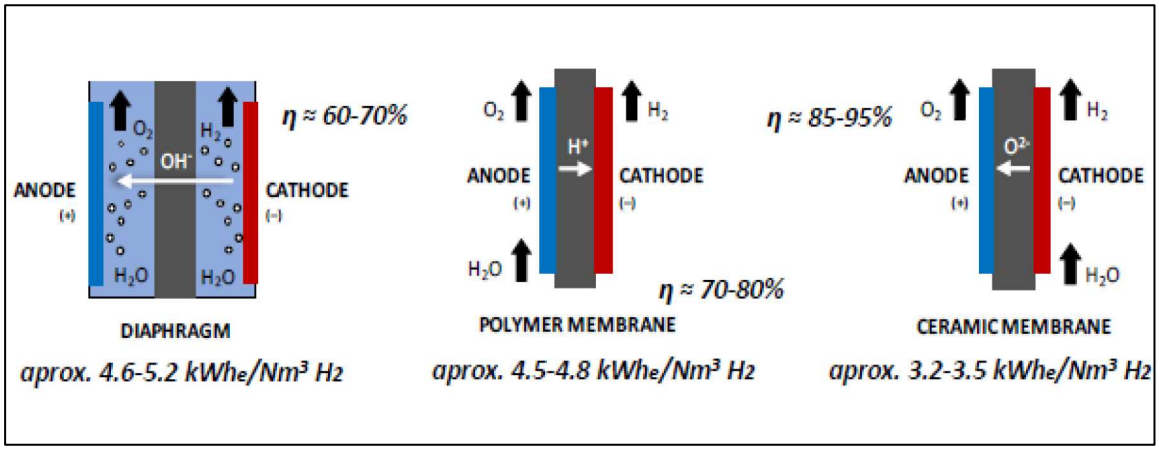


Ilustración 7: Tipos de electrolizadores, [15]

2.2.4 Principales Componentes de una planta de generación

En general, las plantas de generación de hidrógeno mediante electrólisis cuentan con las siguientes partes, materias primas y componentes principales:

- **Materia prima**, se utiliza agua como materia prima para los diferentes tipos de electrolizadores. Para electrolizadores tipo alcalina, el agua deberá tratarse además con hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH). Para no dañar el electrolizador, es necesario que el agua cuente con unas características mínimas de pureza. Para ambos tipos de electrolizadores, el tratamiento del agua podrá realizarse mediante alguno de los siguientes procesos:
  - Filtrado.
  - Descalcificación.
  - Osmosis inversa.
  - Des ionización.
  - Evaporación.
- **Sistema de Electrolito**, solo para electrolizadores alcalinos, este sistema da la característica alcalina al agua. Este sistema consta de sistemas y tanques de recuperación/recirculación del electrolito, el cual es insertado nuevamente en el flujo de agua.
- **Energía**, la cual será suministrada desde una fuente de energía renovable, y deberá contar con los equipos necesarios para regular y modular la tensión y corriente a los niveles requeridos por el electrolizador.
- **Electrolizador**, es el elemento encargado de separar las moléculas de agua en oxígeno (generado en el ánodo) e hidrógeno (generado en el cátodo). El oxígeno es liberado hacia la atmósfera, mientras el hidrógeno es trasladado hacia el sistema de depuración y secado.
  - En electrolizadores alcalinos, se realiza la recuperación del electrolito.
  - En electrolizadores PEM, el H_2 es derivado a un tanque separador en donde se realiza la separación del agua, el cual es recirculado hacia el electrolizador.
- **Depuración y sistema de secado**.

- En sistemas con electrolizadores alcalinos, el depurador el encargado de remover excedentes de electrolito en el H_2, además de enfriarlo.
- En sistemas con electrolizadores PEM, el depurador se encarga de separar las moléculas de agua en oxígeno (generado en el ánodo) e hidrógeno (generado en el cátodo).

- **Tanque de almacenamiento**, luego del proceso de secado, el H_2 es almacenado en tanques en donde podrán ser posteriormente usados en un siguiente proceso.

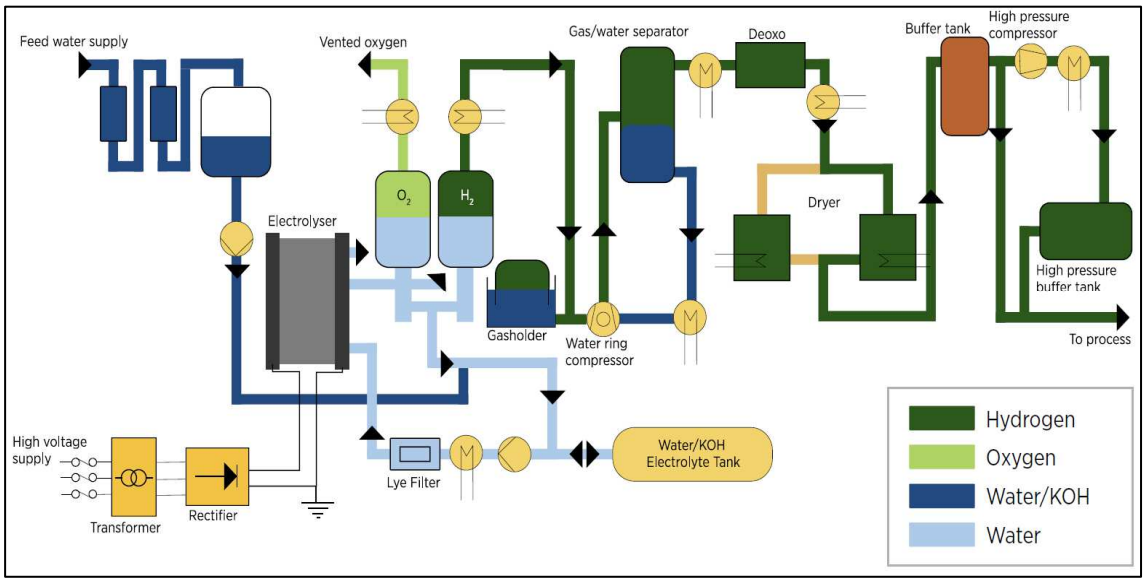


Ilustración 8: Gráfica de proceso de planta de generación de H_2 con electrolizador alcalino, [16]

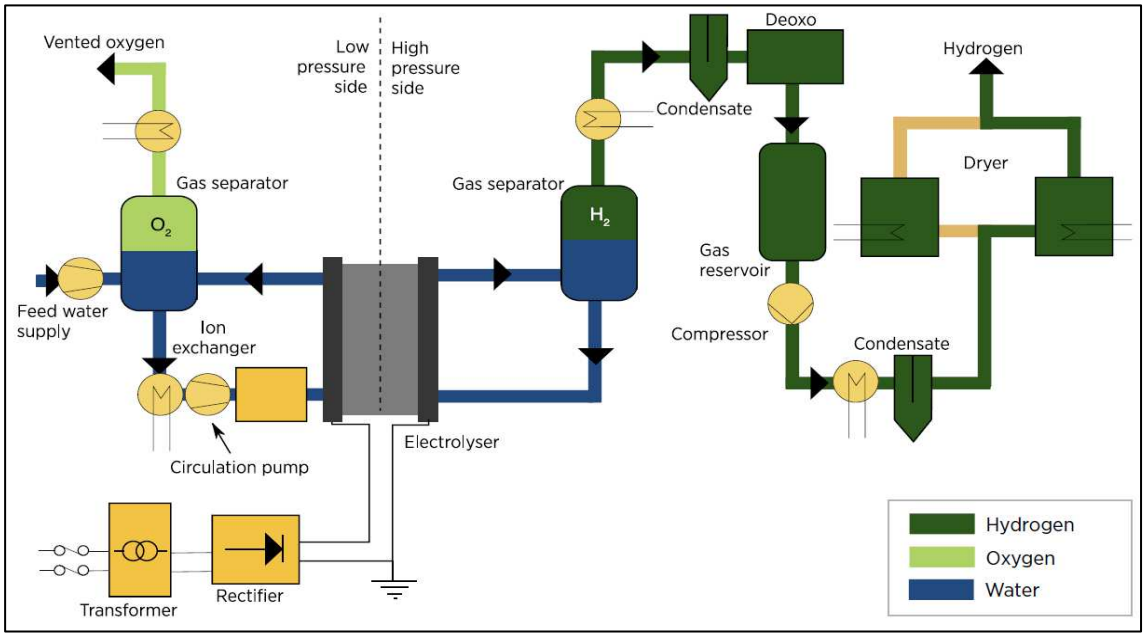


Ilustración 9: Gráfica de proceso de planta de generación de H_2 con electrolizador tipo PEM, [16]

2.2.5 Aplicaciones de hidrógeno

Entre los usos más comunes del hidrógeno podemos listar los siguientes:

- En el sector industria, en donde actualmente se usa H_2 gris u otro con un alto grado de contaminación ambiental, es posible reemplazar el suministro actual de hidrógeno por uno generado a partir de energía renovables (H_2 verde), ejemplos de estas aplicaciones son las siguientes:
    - Proyecto H2F, Planta de hidrógeno, amoniaco y fertilizantes bajos en carbono, 20 MW de electrólisis alimentada por una planta fotovoltaica de 100 MW con un sistema de batería 20 MWh para almacenamiento de energía. El hidrógeno verde se consume in situ para producir amoníaco y fertilizantes, sustituyendo H_2 gris del complejo. La instalación se encuentra en operación. [17].
    - Iberdrola y BP, Refinería Castellón, 25 MW de electrólisis alimentada por energía renovable adquirida mediante acuerdos de compra de energía (ppa). El hidrógeno verde sustituirá H_2 gris producido actualmente a partir de gas natural. La instalación entrará en operación en el año 2026. [18].
- En transporte, en donde tenemos vehículos con pilas de hidrógeno que permiten la no dependencia de los combustibles fósiles, tanto para vehículos particulares, camiones de transporte de mercancías, así como transporte ferroviario.
    - Proyecto FCH2Rail, tren de hidrógeno que ha circulado en pruebas en la red ferroviaria española y portuguesa. [19].
    - Project Green Hysland, Mallorca, implementación de autobuses con pila de hidrógeno.
- En el sistema de calefacción por gas natural, reemplazando dicho combustible por una fuente de calor a base de hidrógeno.
    - Caldera doméstica de hidrógeno al 100 %, Madrid, primera caldera de hidrógeno verde para generar calefacción sostenible. [20].
    - Hidro ducto, Mallorca, primer hidrogenoducto en España, con 3 200 m de longitud, que permite inyectar hidrógeno verde en la red de gas natural a 85 bar. Este sistema mezcla el H_2 con gas convencional para reducir su huella de carbono. [21].
- En energía eléctrica, haciendo uso de pilas de hidrógeno, almacenando la energía para su posterior uso. Por ahora, esta tecnología está limitada a vehículos eléctricos.
    - SOFC4GREENGRID – Desarrollo de celdas de combustible. Está basado en la investigación y desarrollo industrial de tecnologías de almacenamiento de energía verde, específicamente en las pilas de combustible de óxido sólido (en adelante, SOFC) que permiten transformar la energía química del hidrógeno verde en eléctrica. [22].
    - Planta piloto Deutz (energía solar → H_2 → electricidad), En 2025, Deutz inauguró una instalación piloto donde el excedente de energía solar generada in situ se emplea para producir hidrógeno verde mediante electrólisis. Luego, dicho hidrógeno se almacena a presión y se

reconvierte en electricidad a través de un grupo electrógeno impulsado por un motor. [23].

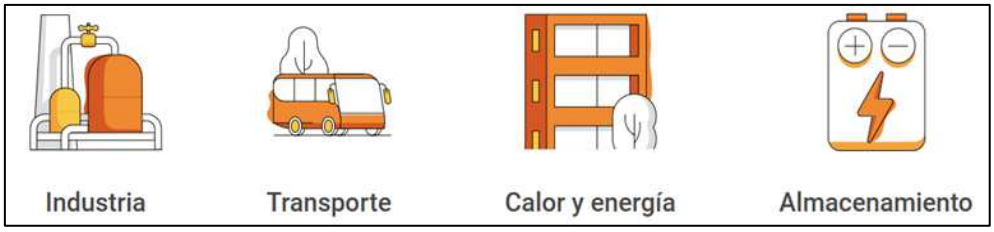


Ilustración 10: Aplicaciones de hidrógeno, [24]

En España, la Hoja de Ruta del Hidrógeno establece alcanzar al menos 4 GW de electrolizadores para 2030, con una meta intermedia de 300–600 MW en 2024, meta que no fue alcanzada logrando solo la instalación de 30 MW.

Los proyectos con FID – Final Investment Decision o en fases más avanzadas muestran un despliegue moderado, pero la cartera planificada recogidos en Censo es más ambiciosa, con 8 GW previstos para 2024 y casi 11 GW a partir de 2026, superando ampliamente los objetivos nacionales.

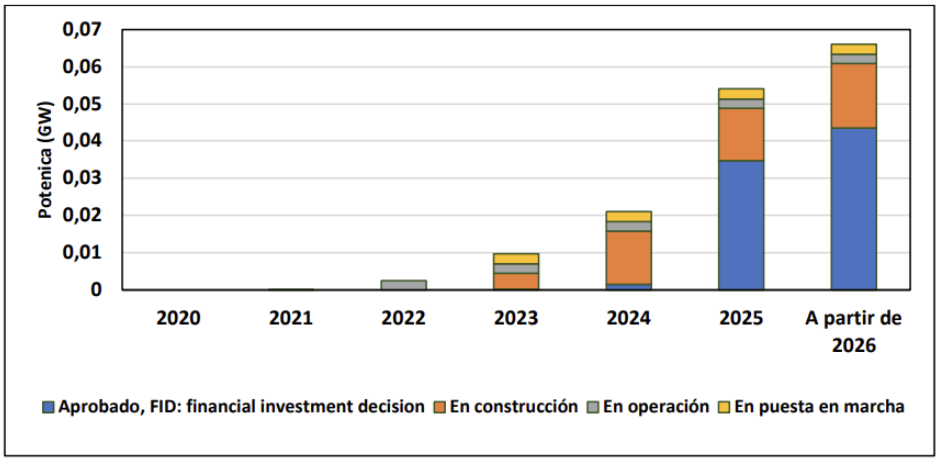


Ilustración 11: Potencia acumulada de los proyectos del Censo con FID o más avanzados, [25]

El 56 % de los proyectos utiliza energía renovable por conexión directa y hasta un 91 % espera emplear fuentes limpias, mayoritariamente mediante electrólisis alcalina para grandes potencias (>100 MW) y tecnología PEM en proyectos pequeños y medianos. Las inversiones totales superan los 13.000 M€ en proyectos de gran escala [25], [26], [27].

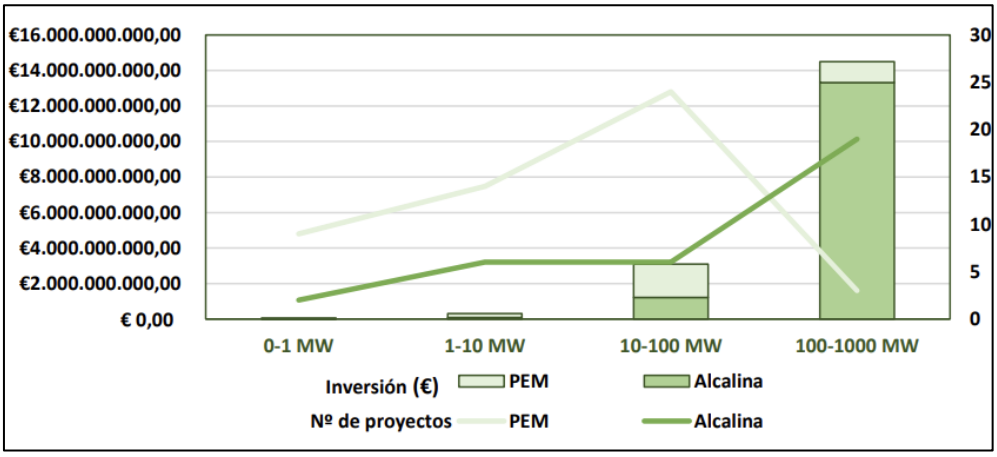


Ilustración 12: Inversión y proyectos por cada tecnología de electrolizador, 26]

2.2.6 Pilas de combustible

El hidrógeno generado y almacenado en los tanques puede ser empleado para generar electricidad mediante una pila de combustible. Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que transforman directamente la energía de una reacción química en energía eléctrica. Esta reacción se basa en la combinación de un elemento combustible, en este caso el hidrógeno, y un agente oxidante, usualmente el oxígeno del aire, generando como productos agua, electricidad y calor.

En el ánodo de la pila, el hidrógeno se divide en protones y electrones. Los electrones fluyen a través de un circuito externo, generando una corriente eléctrica que puede alimentar diversos dispositivos o sistemas, como motores eléctricos. Por su parte, los protones atraviesan una membrana electrolítica hacia el cátodo, donde se recombinan con los electrones y el oxígeno, formando agua como subproducto.

Actualmente, uno de los principales usos de las pilas de combustible se encuentra en los vehículos de pila de combustible (también conocidos como vehículos de hidrógeno), donde se aprovechan para producir energía eléctrica de forma continua durante la operación de la pila de combustible motor, a diferencia de las baterías que requieren recarga. Las pilas de combustible de tipo PEM (Proton Exchange Membrane), comúnmente utilizadas en aplicaciones móviles, presentan eficiencias del orden del 40 % al 60 % en la conversión de energía química en energía eléctrica. [28].

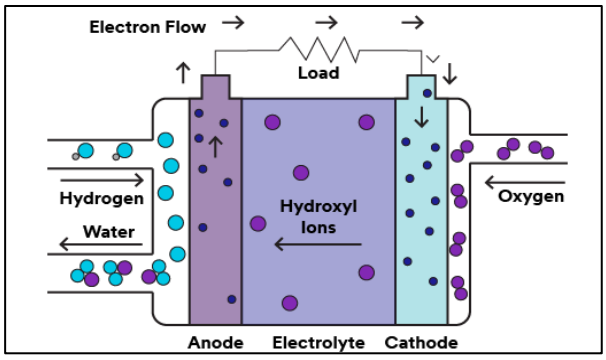


Ilustración 13: Pila de combustible alcalina, [28]

2.3 Proyectos de hidrógeno

Conforme a la Asociación Española del Hidrógeno, actualmente se tiene en todo el país más de 350 proyectos con una madurez tecnológica superior a 3. La ubicación todos los proyectos se muestra a continuación:



Ilustración 14: Ubicación de proyectos en hidrógeno, [29]

Uno de los proyectos encontrados en bibliografía incluye generación de hidrógeno a partir de excedentes de generación fotovoltaica. Los detalles del proyecto son listados a continuación:

- Entidad líder / Coordinador del proyecto Deutz Spain
- Ubicado en el municipio de Zafra, provincia de Badajoz, comunicada autónoma de Extremadura.
- Descripción: Se trata de un proyecto demostrativo en entorno industrial de la cadena de valor del hidrógeno. Se pretende utilizar los excedentes fotovoltaicos a disposición de Deutz Spain en su centro productivo de Zafra para producir hidrógeno mediante electrólisis alcalina. Este hidrógeno será comprimido y almacenado para ser consumidos durante la noche u otros periodos de necesidad en un grupo electrógeno cuyo corazón es un motor de combustión interna 100% de hidrógeno de Deutz AG. La electricidad generada será consumida por la propia fábrica de componentes de Deutz Spain.
- Estado: Se estima que el proyecto ingrese en operación durante el año 2025.
- Los electrolizadores tendrán una capacidad total de 0.5 MW.
- La tecnología de almacenamiento será en depósitos de gas comprimido a una presión de almacenamiento de 200 bar.

Por otro lado, la Universidad Pontificia Comillas cuenta con un mapa de visualización de proyectos de hidrógeno en España y Portugal. La herramienta proporcionada por la Universidad Pontificia de Comillas permite identificar los proyectos de hidrógeno

asociados a energía, además de brindar información específica del proyecto y enlaces relacionados con la entidad encargada del proyecto. Es así como tenemos identificados los siguientes proyectos de hidrógeno asociados a energía.



Ilustración 15: Ubicación de proyectos en hidrógeno, [30]

Otro proyecto que merece la pena destacar es el “Hub movilidad sostenible: Toledo”, cuyo promotores son “Inael Electrical y el Ayuntamiento de Toledo”, con una potencia instalada de electrolizador de 1 MW. El proyecto está basado en la generación y almacenamiento de energía 100 % renovable, que incluirá instalaciones de autoconsumo, recarga eléctrica de vehículos y también “hidrogenera” y comprende las siguientes áreas:

- Una planta fotovoltaica de 2 MW.
- Una electrolinera de carga eléctrica semirrápida, rápida y ultrarrápida, orientada a vehículos y autobuses eléctricos, que ofrece la opción de reducir los tiempos de carga habituales.
- Una hidrogenera: orientada a autobuses urbanos, furgonetas y camiones de bajo-medio tonelaje. Aporta una ventaja competitiva a vehículos industriales y municipales, ya que se alcanzan rangos de autonomía por encima de los 400 kilómetros en escasos minutos de recarga (3-10 minutos).
- Módulos de almacenamiento. Con el fin de aprovechar los excesos de energía producidos, la energía se almacena a través de una batería de grandes dimensiones y un sistema de almacenamiento y pila de combustible de H_2.
- Por último, una plataforma de gestión y el software, encargados del control de la instalación y de gestionar el balance de la planta.

Como podemos apreciar, dicho proyecto tiene muchas similitudes con el desarrollado en el presente Trabajo de Fin de Máster, por que cual, será una referencia para algunas definiciones y aplicaciones en el presente trabajo.

2.4 Electrolizadores comerciales

En el mercado tenemos diferentes modelos de electrolizadores alkalinos y tipo PEM, incluyendo equipos compactos que consideran la mayor cantidad de elementos necesarios para el funcionamiento de la planta generadora de hidrógeno. Algunas de las opciones disponibles son:

- Stargate Hydrogen, [31].
  - Tipo : Alcalino
  - Modelo : Stellar Edge
  - Generación de H_2 : 100 m3/h
  - Generación diaria : 215 kg/día
  - Potencia nominal : 460 kW
  - Presión de salida : 32 Bar
- Stargate Hydrogen, [32].
  - Tipo : Alcalino
  - Modelo : Gateway 200
  - Generación de H_2 : 200 m3/h
  - Generación diaria : 432 kg/día
  - Potencia nominal : 1200 kW
  - Presión de salida : 30 Bar

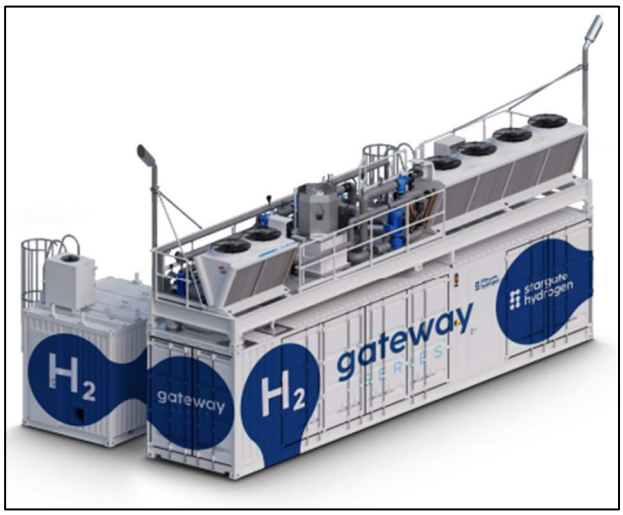


Ilustración 16: Stargate Hydrogen – Modelo Gateway 200

- Hygreen energy, [33].
  - Tipo : Alcalino
  - Modelo : HELA 1000
  - Generación de H_2 : 1000 m3/h
  - Generación diaria : 2150 kg/día

- Presión de salida : 16 Bar

- Hygreen energy, [34].
  - Tipo : PEM
  - Modelo : HGPS 50
  - Generación de H_2 : 50 m3/h
  - Generación diaria : 108 kg/día
  - Presión de salida : 30 Bar



Ilustración 17: Hygreen energy – Modelo HGPS 50

- Advait Energy, [35].
  - Tipo : Alcalino
  - Modelo : 250
  - Generación de H_2 : 50 m3/h
  - Potencia nominal : 250 kW
  - Presión de salida : 16 a 32 Bar

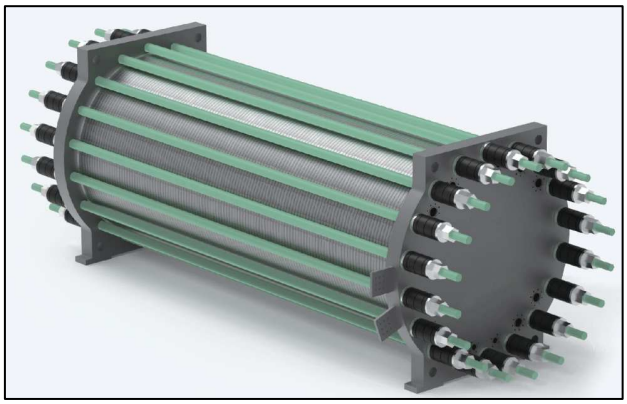


Ilustración 18: Advait Energy – Modelo 250

- Hefei Sinopower Technologies, [36].
  - Tipo : Alcalino
  - Modelo : Rubri-A1
  - Generación de H_2 : 5 a 20 m3/h
  - Presión de salida : 16 Bar



Ilustración 19: Hefei Sinopower Technologies – Modelo Rubri-A1-0005

- Hefei Sinopower Technologies, [37].
  - Tipo : PEM
  - Modelo : Rubri-P1
  - Generación de H_2 : 1 a 20 m3/h
  - Presión de salida : 30 Bar



Ilustración 20: Hefei Sinopower Technologies – Modelo Rubri-P1-0020

- McPhy, [38].
  - Tipo : Alcalino

- Modelo : Piel P, M, H
- Generación de H_2 : 1 a 10 m3/h
- Potencia nominal : 6 a 60 kW
- Presión de salida : 4 a 8 Bar



Ilustración 21: McPhy – Modelo Piel

- NEL ASA, [39].
  - Tipo : PEM
  - Modelo : Series S, H y C
  - Generación de H_2 : 0.27 a 30 m3/h
  - Potencia nominal : 2 a 180 kW
  - Presión de salida : 30 Bar

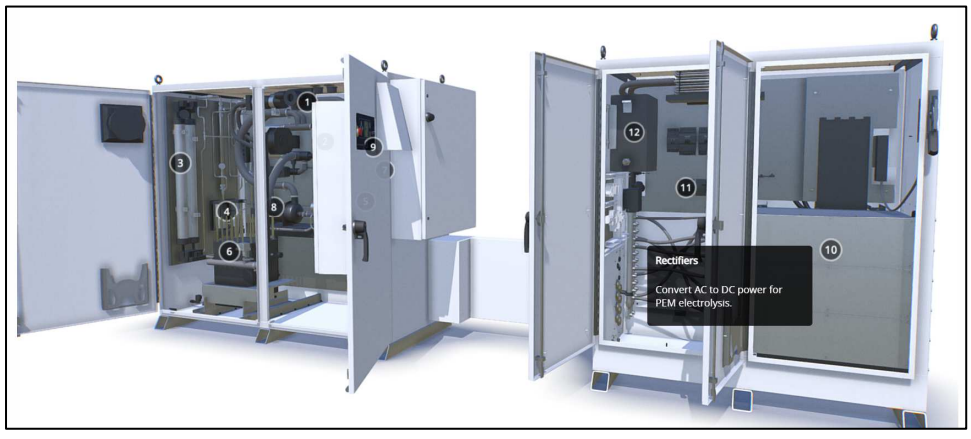


Ilustración 22: NEL ASA – Modelo Serie C

- Cummins, [40].
  - Tipo : Alcalino
  - Modelo : HySAT
  - Generación de H_2 : 10 a 100 m3/h
  - Potencia nominal : 50 a 500 kW

- Presión de salida : 10 Bar



Ilustración 23: Cummins – Modelo HySAT

2.5 Vehículos de hidrógeno

En la actualidad, los vehículos eléctricos alimentados pila de combustible representan una alternativa emergente dentro del sector del transporte. En cuanto a su funcionamiento, utilizan celdas de combustible que convierten el hidrógeno en electricidad para alimentar motores eléctricos, emitiendo únicamente vapor de agua como residuo.

Aunque la presencia comercial de estos vehículos es aún limitada en comparación con los vehículos eléctricos de batería, los avances tecnológicos y el interés en descarbonizar sectores como el transporte pesado, autobuses y flotas logísticas han impulsado su desarrollo.

Los autobuses y automóviles impulsados por hidrógeno están ganando terreno como soluciones sostenibles para la movilidad urbana e interurbana, gracias a su capacidad de recarga rápida y su autonomía superior frente a los vehículos eléctricos convencionales. En el caso de los autobuses, se han implementado algunas flotas de transporte público con cero emisiones locales.

La Empresa Municipal de Transporte - EMT integra dentro de su flota de buses 10 vehículos con una autonomía de 280 km, este modelo de autobús lleva cinco botellas de almacenamiento de hidrógeno tipo 4, con una capacidad total de 1.560 litros para almacenar 37,5 kg de hidrógeno.

Por otro lado, los automóviles de hidrógeno, aunque aún tienen una oferta limitada en el mercado, presentan un gran potencial en regiones con infraestructura adecuada. Los modelos con mayor desarrollo son:

- El Toyota Mirai se puede conducir hasta 650 km con el tanque lleno, utilizando solo 0,79 kg de hidrógeno por cada 100 km.



Ilustración 24: Esquema de Hidrógeno en Toyota Mirai, [41]

- En caso del Hiundai NEXO, se puede conducir hasta 666 km con el tanque lleno con una capacidad de 6.33 kilos de hidrógeno y un tiempo de recarga de 5 minutos.

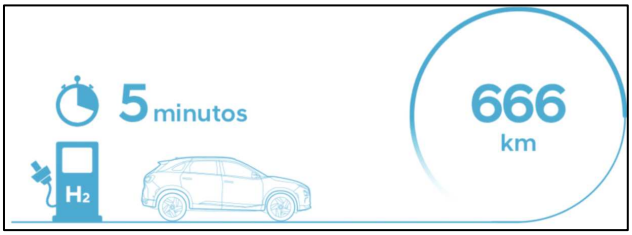


Ilustración 25: Esquema carga de Hidrógeno en Hiundai Nexo, [42]

3 Caso de Estudio

3.1 Selección de la ubicación

El enfoque del proyecto va dirigido al aprovechamiento de las zonas de estacionamiento vehicular para generación de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos y usar dicha energía en la generación de hidrógeno, además de autoconsumo de los excesos de generación de energía. En ese sentido, los centros comerciales y supermercados presentan las características que necesitamos, pues cuentan muchas veces con amplias zonas de estacionamiento no aprovechadas.

Una vez revisadas diferentes alternativas para la ubicación de proyecto, se ha seleccionado el Supermercado Costco Wholesale ubicado en Las Rozas de Madrid, Madrid, España, por presentar áreas de estacionamientos susceptibles de ser techadas con estructuras fotovoltaicas. Además, presenta un consumo energético elevado. En este caso particular, la potencial generación de hidrógeno in situ puede ser aprovechada por buses de transporte público de recorrido corto (urbano) y largo (interurbanos) que transitan por la zona.



Ilustración 26: Vista en planta del Supermercado, obtenida de Google earth.

El Supermercado Costco cuenta con las siguientes áreas:

- Edificio de Supermercado.

- Zonas de Aparcamiento.
- Gasolinera.
- Otros.

El Edificio cuenta con un área de tienda estimada en 13700 m2; de 7 m de altura aproximadamente, dispuesto de forma poligonal, construido de material noble y metálico. Las zonas de aparcamiento son diversas, dispuestas al lado izquierdo del edificio, identificadas como áreas de rojo en la gráfica anterior; todas las zonas de aparcamiento están libres, es decir, no son áreas techadas o áreas en ocupación por alguna infraestructura. Se estima un área útil de 3530 m2.

El Supermercado cuenta con una gasolinera ubicada hacia el lado sur este del edificio.

Finalmente, el Supermercado cuenta con servicios de neumáticos, centro auditivo, restaurante y óptica. Dichos servicios pueden ser ubicados en [43].



Ilustración 27: Fotografía del Supermercado, Enero 2025

3.2 Demanda energética

Puesto que no se dispone de los datos exactos de consumo eléctrico del Supermercado, se ha llevado a cabo una estimación de este considerando:

- Perfil de demanda diario, para épocas de verano e invierno, considerando lo siguiente:
    - Demanda base nocturna (00:00–06:00): baja y constante, reflejo del funcionamiento continuo de equipos esenciales como refrigeración.
    - Aumento progresivo (06:00–10:00): inicio de operaciones y preparación de áreas comerciales.
    - Primer pico moderado (12:00–14:00): horario de alta afluencia.
    - Segundo y principal pico (16:00–19:00): concentración de consumo por actividad comercial, iluminación, climatización y mayor concurrencia de clientes.

- Descenso nocturno (20:00–24:00): reducción paulatina de la demanda hasta volver al nivel base.

Estas fases se pueden ver en la siguiente gráfica. Los datos concretos de potencia, se observan en una figura mostrada con posterioridad.

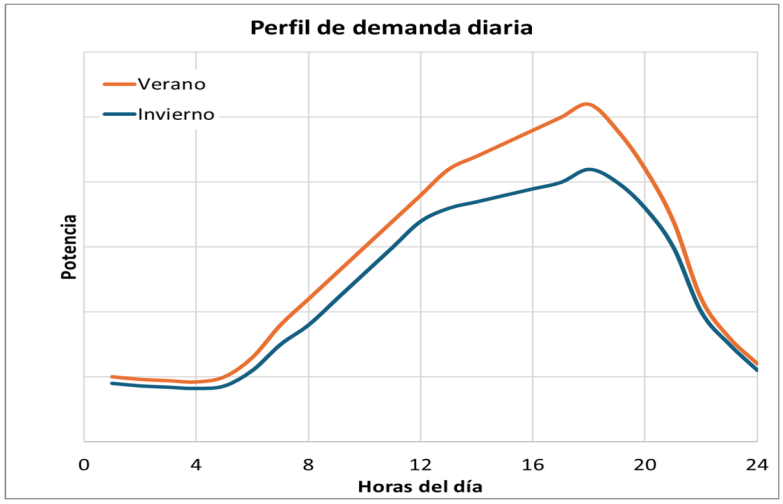


Ilustración 28: Perfil de demanda típico de un supermercado/Supermercado, elaboración propia

- La variación estacional de la demanda considera diferencias de tipo de consumo eléctrico:
  - En verano, la curva se eleva más en la tarde debido al uso intensivo de aire acondicionado, lo que incrementa la demanda total.
  - En invierno, aunque la curva es similar en forma, la potencia máxima es menor, y los sistemas de calefacción tienen menor impacto eléctrico directo (especialmente si se usan sistemas de gas).
- Se estima el consumo promedio anual en kwh conforme a la siguiente información disponible:
  - De [44], se sugiere que los centros comerciales tienen un consumo promedio por metro cuadrado entre 188 y 333 kWh/m2.
  - De la figura 5, Energy Consumption and Conservation in Food Retailing [45], en donde se realizaron evaluaciones de diferentes comercios para estimar un consumo promedio por metro cuadrado, se obtiene un valor recomendado entre 500 y 800 kwh/m2 para supermercados con áreas mayores a 10,000.00 m2.
  - Por lo tanto, para nuestro caso y teniendo en cuenta el estudio anterior, asignaremos un consumo promedio de 500 kWh/m2, considerando que las áreas de ventas son menores a las áreas construidas y que contamos con más de 10,000.00 m2 de área construida como Edificio de supermercado.
  - Finalmente, la demanda anual del supermercado será de **6,850,000.00 kWh/año**, considerando un área de 13,700.00 m2 y un consumo por metro cuadrado de 500 kwh/m2.

- La determinación de los perfiles de demanda diario por estación será ajustada al consumo anual estimado, considerando que cada día cuenta con 24 horas, obtenemos lo siguiente:

Tabla 2: Consumo diario de potencia y energía

Hora del día	Potencia kW	
	Verano	Invierno
1	300	270
2	288	258
3	282	252
4	276	246
5	300	258
6	390	330
7	540	450
8	660	540
9	780	660
10	900	780
11	1020	900
12	1140	1020
13	1261	1080
14	1321	1110
15	1381	1140
16	1441	1170
17	1501	1200
18	1561	1261
19	1441	1200
20	1261	1080
21	1020	900
22	660	600
23	480	450
24	360	330
kWh/día	20,564	17,491

- De la tabla anterior, se obtiene el siguiente gráfico de demanda por estación:

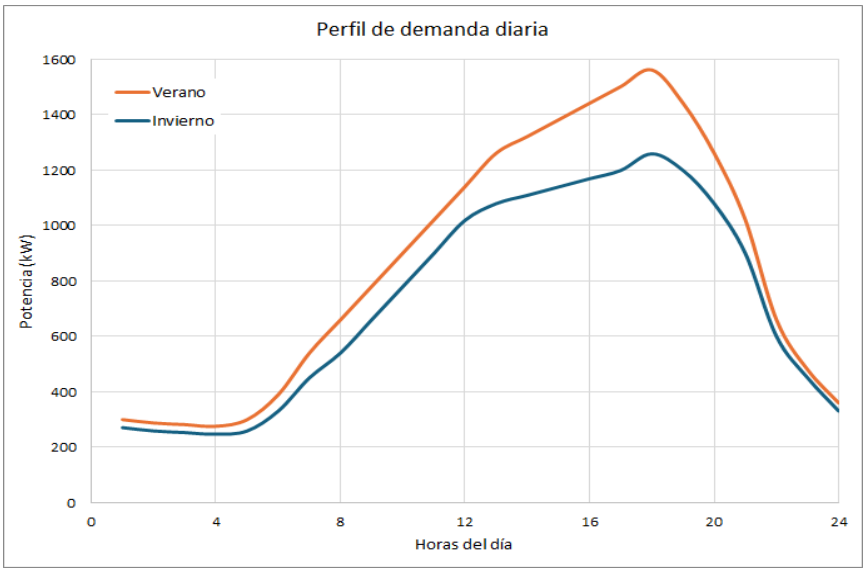


Ilustración 29: Perfil de demanda estimado de Costco

- Considerando meses con 30 días y cada estación de 6 meses, obtenemos la siguiente tabla:

Tabla 3: Consumo mensual y anual de energía

Tipo	Verano	Invierno	Unidad
Diario	20,564	17,491	kWh/día
Mensual	616,932	524,734	kWh/mes
Estacional	3,701,593	3,148,407	kWh/6-meses
Anual		6,850,000	kWh/año

4 Descripción de instalaciones proyectadas

4.1 Planta fotovoltaica

4.1.1 Área disponible

De acuerdo con la ilustración 26, el área disponible para la instalación de módulos fotovoltaicos y sistema de generación de hidrógeno es 3530 m2.

Dichas áreas son usadas actualmente para el aparcamiento de vehículos que llegan al supermercado, por lo tanto, este uso será tomado en consideración para el diseño de la planta fotovoltaica.

Actualmente, el desarrollo de soluciones con paneles fotovoltaicos para aplicaciones en aparcamiento de vehículos son como la mostrada en la figura siguiente:

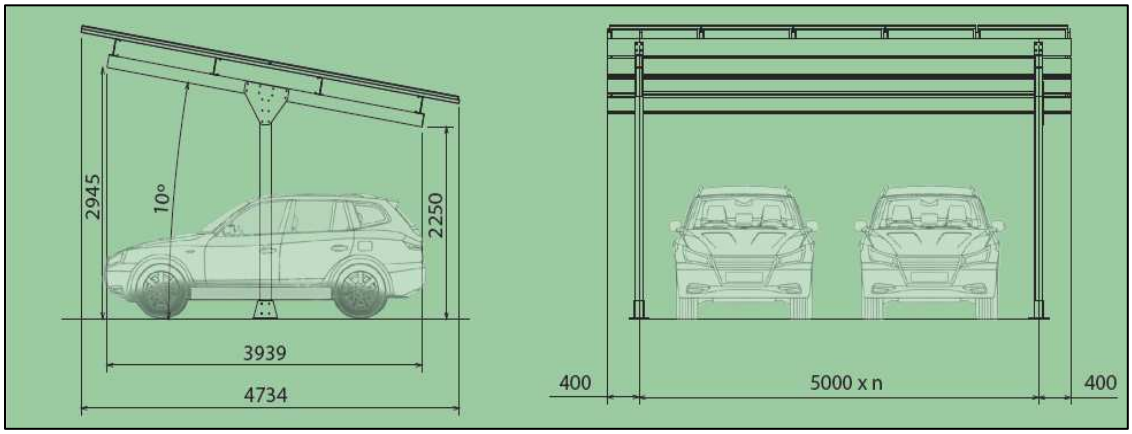


Ilustración 30: Módulos de Paneles Fotovoltaicos/Parking de vehículos, [46]

Dichos módulos serán instalados en las zonas de aparcamiento según la necesidad y disposición del área.

4.1.2 Componentes principales

El sistema fotovoltaico con una solución propuesta como la referida anteriormente estará conformado por los siguientes componentes:

- Módulos fotovoltaicos.
- 01 Regulador de carga
- 01 Inversor DC/AC

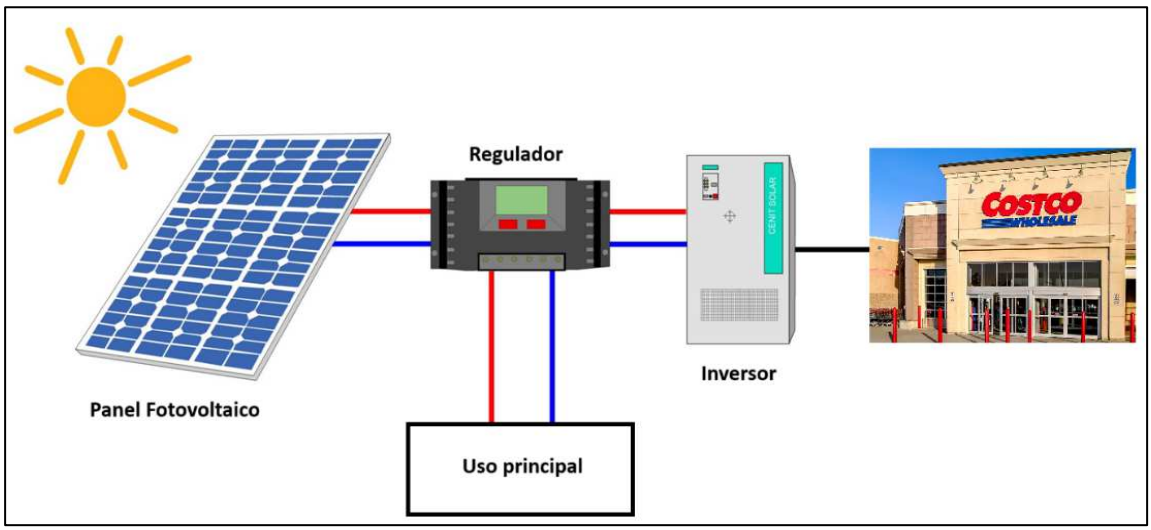


Ilustración 31: Esquema de Sistema Fotovoltaico

El uso principal de la generación de energía fotovoltaica será el suministro de energía para el sistema de generación de hidrógeno, si bien en términos energéticos, no es la opción más eficiente.

4.1.3 Descripción técnica de la solución

La planta fotovoltaica se desarrollará según lo siguiente:

- La generación de energía eléctrica se llevará a cabo en los paneles solares.
- La capacidad de la planta fotovoltaica dependerá del área disponible, hay que considerar que debemos instalar, además de los paneles solares, equipos como reguladores, inversores, por lo tanto, solo una parte del área disponible de 3530 m2 será utilizada por los paneles; así mismo, tomaremos en cuenta que parte del área será usada por los equipos de la planta de hidrógeno.
- La energía generada será conectada a un regulador de carga.
- El regulador de carga conectará con el inversor DC/AC, además de conectar a la planta de hidrógeno, con lo cual tendremos generación de hidrógeno verde.
- El inversor DC/AC conectará con el tablero general del Supermercado, por lo tanto, parte de la generación fotovoltaica que no es usada por la planta de generación de hidrógeno irá al autoconsumo del Supermercado, disminuyendo el consumo desde la red eléctrica.

4.2 Planta de hidrógeno

4.2.1 Componentes principales

El sistema de generación y almacenamiento en hidrógeno estará conformado por los siguientes componentes:

- Tanque de Agua con sistema de electrolito.
- Electrolizador.
- Sistema de compresión y secado
- Sistema de almacenamiento

- Dispensador
- Una plataforma de gestión y el software, encargados del control de la instalación y de gestionar el balance de la planta

El esquema siguiente muestra los componentes hasta el sistema de almacenamiento.

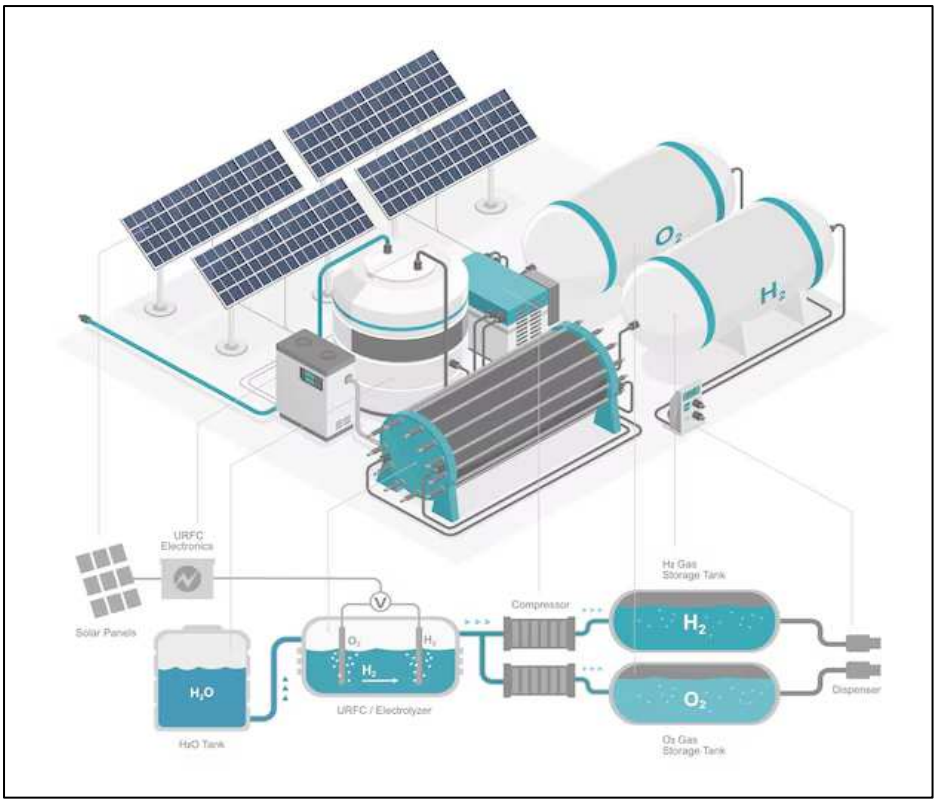


Ilustración 32: Esquema de Sistema de generación de Hidrógeno (Electrolizador Alcalino), [47]

4.2.2 Criterios de dimensionamiento de la planta de hidrógeno

El dimensionamiento de una planta de hidrógeno debe considerar el número de vehículos a abastecer, su tipo de operación y el patrón de consumo diario. Para este caso, se han considerado líneas de buses urbanos (EMT 45 y 71) e interurbanos (líneas 622 y 628) con recorridos próximos al sitio de instalación del proyecto. A partir de la información disponible en la página web del Consorcio Regional de Transportes de Madrid, [48], se ha determinado el recorrido promedio por viaje para cada tipo de bus, obteniéndose los siguientes valores:

- Buses urbanos : 7 km por viaje.
- Buses interurbanos : 25 km por viaje.

Dado que las líneas de buses consideradas operan en zonas próximas al emplazamiento de la planta, se asume una logística de recarga directa, sin requerimientos de transporte externo de hidrógeno. La demanda diaria total se estimará a partir del consumo específico por kilómetro recorrido (kg H_2/km), multiplicado por la distancia diaria recorrida por unidad y el número total de vehículos a abastecer. Estos parámetros permiten dimensionar de manera precisa la capacidad necesaria de producción,

almacenamiento y dispensado de la planta, asegurando la continuidad operativa sin incurrir en un sobredimensionamiento de la infraestructura.

Es importante destacar que no se contempla el suministro de hidrógeno para vehículos particulares (turismos), debido a la baja demanda actual y al elevado coste asociado a los sistemas de compresión requeridos para alcanzar presiones de 700 bar, propias de esta aplicación.

A continuación, se presenta el esquema general de la planta de hidrógeno:

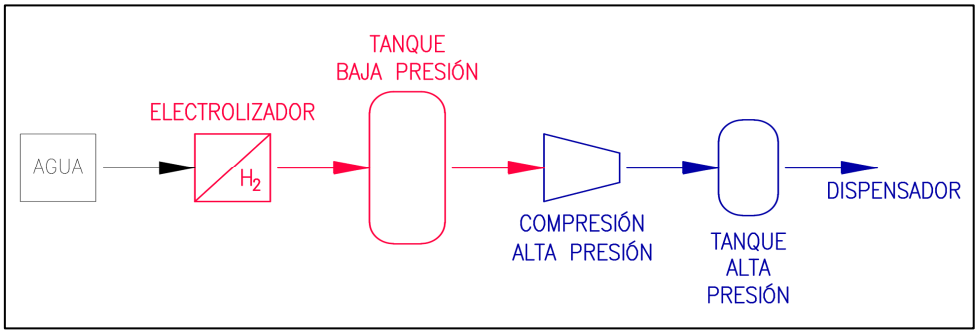


Ilustración 33: Esquema general de procesos de planta de hidrógeno

El proceso comienza con el suministro de agua al electrolizador, donde se produce hidrógeno a baja presión. Este gas se somete inicialmente a una etapa de compresión de baja presión, para luego ser almacenado temporalmente en un tanque de baja presión, que actúa como pulmón intermedio y estabilizador del flujo. Posteriormente, el hidrógeno se transfiere a una unidad de compresión de alta presión, que lo eleva hasta los 350 bar necesarios para ser almacenado en el tanque de alta presión. Desde este último, el hidrógeno es finalmente conducido hacia el dispensador, desde donde se realiza la recarga directa a los vehículos.

5 Diseño del sistema de hidrógeno

5.1 Demanda de hidrógeno

La demanda diaria de hidrógeno será determinada a partir de los criterios establecidos en el ítem 4.2.2, en donde se tiene lo siguiente:

Tabla 4: Requerimiento diario de Hidrógeno

Dato	un	Urbano	Inter urbano
Unidades	#	3	1
Almacenamiento	kg	37.5	37.5
Autonomía	km	280	280
Recorrido por viaje	km	6	25
# de viajes por día	#	5	2
Recorrido diario	km	90	50
Req. diario	**kg H2**	**12.1**	**6.7**

Tenemos una demanda diaria de 18.8 kg H_2.

5.2 Electrolizador

A partir del requerimiento diario es posible determinar las características mínimas de generación de hidrógeno si tomamos en cuenta lo siguiente:

- Poder calorífico del hidrógeno 33.325 kWh/kg.
- Tiempo de generación de 7 horas, considerando el aprovechamiento de las horas de día. [50].

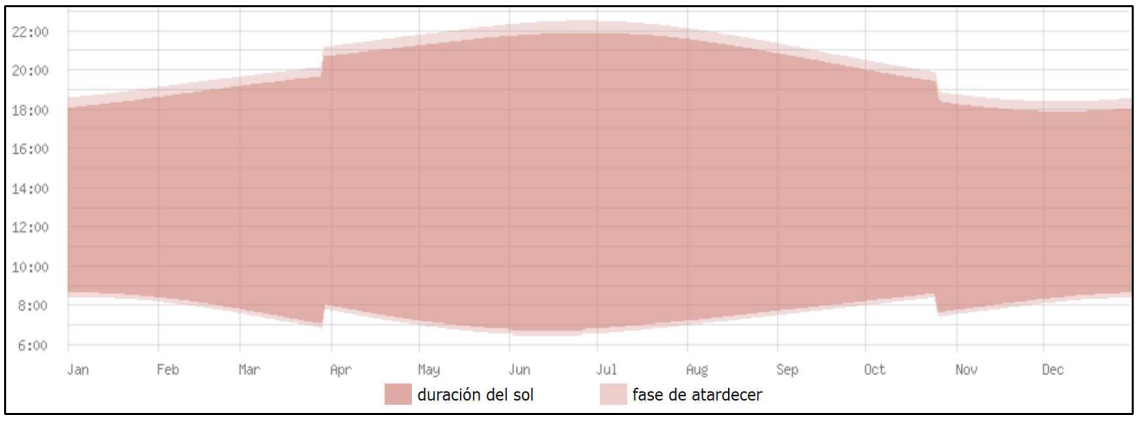


Ilustración 34: Duración media del día - Madrid

- Densidad del hidrógeno de 0.0899 kg/m3
- Eficiencia promedio del electrolizador del 70%.

Considerando los criterios anteriores, se obtiene que el electrolizador deberá tener por lo menos los siguientes requisitos:

Tabla 5: Requerimiento de Electrolizador

Dato	un	Valor
Req. H2 diario	kg H2	18.8
Margen		0%
Tiemp de generación H2	hr	7.0
Densidad de H2	kg/Nm3	0.0899
Req. H2	**m3/día**	**29.8**
Poder Calorifico H2	kWh/kg	33.325
Ef. del equipo		70%
Consumo elec	kWh/día	892.6
Potencia	**kW**	**127.5**

- Generación diaria de H_2 : 19.9 m3/h
- Generación diaria de H_2 : 18.8 kg/día
- Potencia requerida : 128 kW
- Energía requerida : 893 kWh/día

En el mercado existen diversos modelos de electrolizadores, tanto alcalinos como de tipo PEM, incluyendo versiones compactas que integran la mayoría de los componentes necesarios para el funcionamiento de una planta generadora de hidrógeno. A continuación, se presenta un resumen de los principales equipos y fabricantes analizados.

Tabla 6: Resumen de Electrolizadores modulares comerciales

Equipo	Modelo	tipo	m3/h	kWh/m3	kW/día	kWh/día	Presión (Bar)
Requerido	**-**	**-**	**29.8**	**4.28**	**128**	**893**	**15**
Stargate Hydrogen	Stellar Edge	Alcalino	100	4.59	459	3213	32
Stargate Hydrogen	Gateway 200	Alcalino	200	4.59	918	6426	30
Hygreen energy	HGPS 50	PEM	50	4.30	215	1505	30
Advait Energy	-	Alcalino	50	4.30	215	1505	16
Hefei Sinopower Technologies	**Rubri-A1-0030**	**Alcalino**	**30**	**4.80**	**144**	**1008**	**15**
Hefei Sinopower Technologies	Rubri-P1-0050	PEM	50	4.60	230	1610	30
McPhy	McLyzer 200	Alcalino	200	4.65	930	6510	8
McPhy	Piel H	Alcalino	10	6.00	60	420	8
NEL ASA	**C30**	**PEM**	**30**	**5.80**	**174**	**1218**	**30**
NEL ASA	MC 250	PEM	246	4.70	1156	8093	30
Cummins	**HySAT 30-10**	**Alcalino**	**30**	**4.95**	**149**	**1040**	**10**

De la tabla anterior, podemos observar que disponemos por lo menos de 3 proveedores que fabrican electrolizadores modulares que se adecuan a las necesidades de nuestro proyecto. Considerando que electrolizadores alcalinos tienen menores precios respecto a las otras tecnologías, se opta por implementar este tipo de electrolizadores en la planta de hidrógeno considerando además que actualmente son modulares.

Con la finalidad de estimar el área necesaria para la instalación del electrolizador, se consideraron las dimensiones de un equipo similar a la marca Cummins, modelo HySAT 30-10 del tipo Alcalino, con un área en planta de 9.4 m x 5.8 m, en una presentación contenerizada para permitir su fácil y rápida instalación.

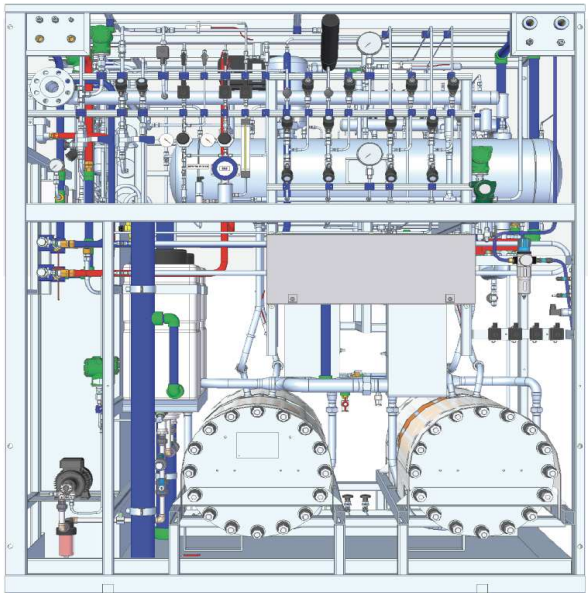


Ilustración 35: Esquema contenerizado de electrolizador, [40]

5.3 Sistema de compresión y almacenamiento

Dado que los autobuses utilizan tanques de hidrógeno comprimido a 350 bar, es necesario incorporar un sistema de compresión que eleve la presión del hidrógeno generado por el electrolizador antes de su almacenamiento y dispensado.

5.3.1 Sistema de Baja presión

Para garantizar la continuidad del suministro incluso ante eventuales paradas del sistema de producción, se considera un volumen de almacenamiento equivalente a varios días de operación, lo que aporta robustez y flexibilidad al sistema sin comprometer la eficiencia operativa.

Tabla 7: Requerimiento de almacenamiento de Hidrógeno

Dato	un	Valor
Req. H2 diario	kg/día	18.8
Autonomía del tanque	días	5.0
Capacidad requerida	kg	93.8
Volumen normal	**Nm3**	**1042.8**

Por lo tanto, el sistema de almacenamiento requerirá al menos de 93.8 kg de hidrógeno o 1042.8 metros cúbicos normales.

Los electrolizadores comerciales generan hidrógeno entre 10 bar y 30 bar, por lo tanto, nuestro diseño considera 10 bar como presión de generación. El hidrógeno será comprimido hasta 30 bar como mínimo. Emplearemos tanques de almacenamiento con capacidad de 25 litros reales cada uno, que pueden soportar la presión de hasta 40 bar.

Tabla 8: Tipos de tanques de almacenamiento de baja presión, [50]

MODELOS VERTICALES	LH 10V	LH 25V	LH 50V	LH 100V	LH 145V	LH 200V
Volumen nominal (m^3)	*10*	*25*	*50*	*100*	*145*	*200*
Diámetro exterior D (mm)	*1.500*	*2.200*	*2.450*	*3.000*	*3.000*	*3.500*
Altura total L (mm)	*6.300*	*7.850*	*12.000*	*15.850*	*22.350*	*22.800*
Peso en vacío (Ton)	*3,7*	*10,1*	*19,2*	*36*	*49,6*	*69*
MASA de H_2 (kg)[1]	*36*	*90*	*180*	*360*	*522*	*720*

(1) MASA del gas a 40 bar y 0ºC. Otras presiones a consultar

Tabla 9: Cálculo de número de tanques de almacenamiento de Hidrógeno

Dato	un	Buses
Tanque seleccionado	**litros**	**25000**
(25000 litros/40 bar)	**m3**	**25**
Presión	bar	30
Porcentaje de ocupación	%	80%
Volumen	**Nm3**	**588.9**
Capacidad de tanque	**kg**	**52.94**
Tanques requeridos	#	1.8
Cantidad seleccionada	**#**	**2**

Considerando que cada tanque puede almacenar hasta 52,94 kg de hidrógeno y que la necesidad total de almacenamiento es de 93,8 kg, se requieren aproximadamente 1,8 tanques. En consecuencia, se dimensiona el sistema de almacenamiento de baja presión con 2 tanques, garantizando así la capacidad requerida con un margen operativo.

5.3.2 Sistema de Alta presión

Emplearemos tanques de almacenamiento con capacidad de 210 litros reales cada uno, que pueden soportar la presión de trabajo de 350 bar. Los tanques serán adecuados en estructuras que permitan su instalación conjunta.

Tabla 10: Tipos de tanques de almacenamiento, [51]

Tanque de almacenamiento de hidrógeno para automóviles						
Número de modelo	Material del revestimiento interior	Volumen nominal (L)	Diámetro exterior (milímetros)	longitud sin válvula (milímetros)	Peso nominal (Sin accesorios) (kg)	Presión de trabajo (MPa)
CHG3-372-162-35S/A	6061	162	410	1800	85	35
CHG3-370-165-35T/A	6061	165	406	1800	96	35
CHG3-390-210-35S/A	6061	210	422	2120	115	35
CHG3-370-320-35T/A	6061	320	408	3400	180	35
CHG3-344-140-35 S/A	6061	140	370	1800	80	35
CHG3-382-210-35 S/A	6061	210	420	2210	120	35
CHG4-580-390-35 S/A	Plástico	390	580	2060	147	35
CHG3-358-134-70 S/B	6061	134	410	1775	135	70

Tabla 11: Cálculo de número de tanques de almacenamiento de Hidrógeno

Dato	un	Buses
Tanque seleccionado	**litros**	**210**
(210 litros/500 bar)	**m3**	**0.21**
Presión	bar	350
Porcentaje de ocupación	%	80%
Volumen	**Nm3**	**47.6**
Capacidad de tanque	**kg**	**4.28**
Tanques requeridos	#	4.4
Cantidad seleccionada	**#**	**5**

Considerando que cada tanque puede almacenar hasta 4.28 kg de hidrógeno, y una necesidad de almacenamiento diario de 18.8 kg, se requiere 4.4 tanques en total, con lo cual se opta por dimensionar el almacenamiento de alta presión con 5 tanques.

Tabla 12: Compresores de hidrógeno Toplong Compressors, [52]

Modelo	Caudal Nm3/h	Presión de succión .Mpa	Presión de descarga.Mpa	Consumo de agua L/h	Velocidad .rpm	Motor.KW	Dimensiones largo * ancho * alto mm	Peso kg
GL2-15/200	15	atmósfera	20	700	400	7.5	1700x850X1150	1100
GL2-30/13	30	atmósfera	1.3	700	400	7.5	1700X850X 1150	1200
GL2-30/13-200	30	1.3	20	700	400	7.5	1700X850X1150	1000
GL2-25/1-160	25	0.1	16	1000	400	11	1700X850X 1150	1100
GL2-40/4-160	40	0,4	16	1000	400	11	1700X850X1150	1050
GL2-50/7-160	50	0,7	16	1200	400	11	1700X850X1150	1000
GL2-40/7-320	40	0,7	32	1200	420	11	1700X850X1150	900
GL2-60/12-160	60	1.2	16	1000	360	11	1700X850X1150	900
GL2-40/13-400	40	1.3	40	1000	400	11	1700X850X1150	900
GL2-30/4-350	30	0,4	35	1000	420	11	1700X850X1150	900
GL2-60/30-400	60	3	40	1200	400	11	1700X850X 1150	850
GL2-15/350	15	0	35	1500	400	18.5	1700X 1200X 1150	1500
GZ2-10/10-150	10	1	15	400	420	4	1400X850X1150	800
GZ2-15/13	15	atmósfera	1.3	400	400	4	1400X850X1150	800
GZ2-15/13-200	15	1.3	20	400	400	4	1400X850X1150	750
GZ2-40/4-30	40	0,4	3	400	400	4	1400X850X1150	800
GZ2-20/30-400	20	3	40	400	400	4	1400X850X1150	700
GZ2-100/80-200	100	8	20	600	400	7.5	1400X850X1150	700

El sistema de compresión deberá capturar el hidrógeno del sistema de baja presión (pasando de 30 bar a 10 bar luego de consumir el H_2), comprimirlo hasta 400 bar como mínimo, y direccionarlo hacia los tanques de almacenamiento de alta presión.

Considerando la relación de compresión 40/3, elegiremos un compresor similar a GZ2-20/30-400 de la marca Toplong Compressors.

5.4 Dispensador

La fase final del proceso se realiza en la unidad de dispensado, la cual surtirá de hidrógeno a los tanques de los buses de transporte.

El dispensador estará equipado con una boquilla, manguera de carga, pantalla interactiva y el sistema de control electrónico, e incluirá un sistema de control con que asegurará la correcta manipulación por parte del usuario.

El modelo sugerido es el siguiente, se la marca WOLFTANK, los cuales pueden operar tanto a 350 bar como a 700 bar:



Ilustración 36: Dispensador de hidrógeno, [53]

6 Diseño del sistema fotovoltaico

6.1 Irradiación disponible

El recurso solar disponible depende de la ubicación de la instalación; el Supermercado tiene las siguientes coordenadas: Latitud 40.511100° y Longitud -3.879115°.

Se considera irradiación sobre plano fijo debido a los bajos costos de implementación y costos de mantenimiento respecto a un sistema seguidor. La determinación de los datos de irradiancia los obtenemos de plataformas como PVGIS, obteniendo lo siguiente:

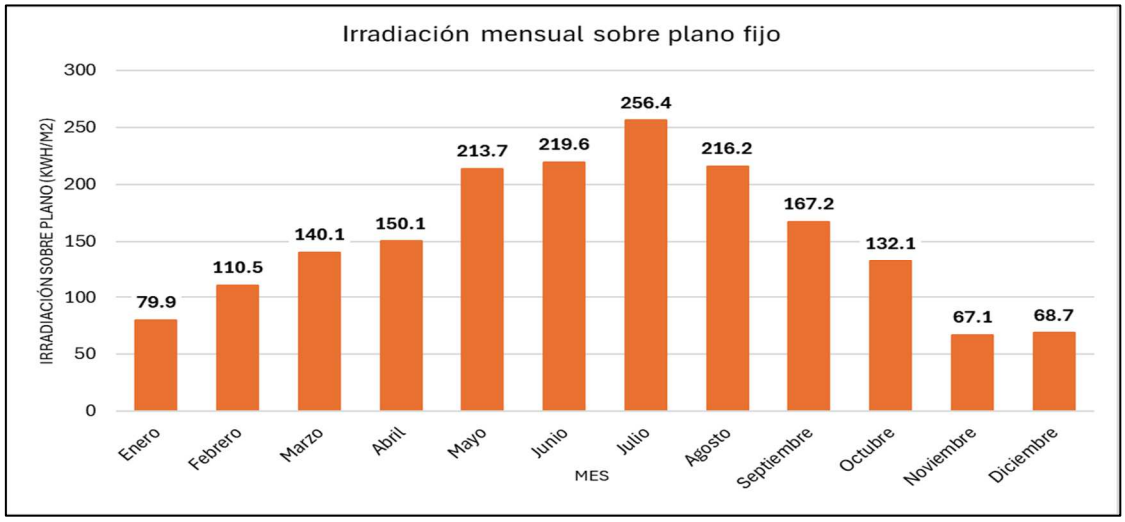


Ilustración 37: Irradiación mensual

Para obtener la irradiación diaria, dividiremos la irradiación mensual entre la cantidad de días de cada mes, obteniendo lo siguiente:

Tabla 13: Irradiación mensual y diaria

Mes	Irradiación (kWh/m2)	Irradiación diaria (kWh/m2)	Temp. (˚C)	Vel viento (m/s)
Enero	79.9	2.58	3.5	1.9
Febrero	110.5	3.95	7.3	1.93
Marzo	140.1	4.52	9	2.57
Abril	150.1	5	11.4	1.83
Mayo	213.7	6.89	18.6	2.2
Junio	219.6	7.32	21	2.01
Julio	256.4	8.27	25.4	2.3
Agosto	216.2	6.97	23	2.51
Septiembre	167.2	5.57	21.7	2.0
Octubre	132.1	4.26	17.6	1.7
Noviembre	67.1	2.24	9.2	2.22
Diciembre	68.7	2.22	4.1	1.99

Si consideramos que la eficiencia del sistema fotovoltaico es de 20%, unas pérdidas del 20%, un porcentaje de uso de área disponible del 70% (aproximadamente 2471 m2), se tiene un valor muy referencial de generación de energía de 720,188 kWh/año.

El área total disponible no será cubierta por paneles solares, pues se debe dejar espacios para la instalación de los equipos asociados al sistema fotovoltaico, además de los equipos de la planta de hidrógeno, entre otros asociados al aparcamiento de los vehículos.

6.2 Módulo fotovoltaico

La selección del módulo fotovoltaico fue realizada con el software PVSyst, en el cual, encontramos diferentes modelos genéricos. Se ha empleado modelos genéricos con la finalidad de tener un abanico de diferentes posibilidades que cumplan con los requerimientos mínimos identificados y definidos en el diseño.

6.2.1 Orientación

Conforme a la ubicación del lugar de emplazamiento, se recomienda que los paneles tengan la siguiente orientación:

- Azimut : 0˚
- Inclinación : entre 30˚ y 40˚

Sin embargo, dichos ángulos de orientación están definidos por las condiciones del lugar (ver figura siguiente), es decir, las zonas de aparcamiento en ubicación y orientación están definidas, por lo tanto, el azimut deberá obedecer a chicha orientación, mientras la inclinación será definida por el diseño del sistema parking de vehículos/panel fotovoltaico.



Ilustración 38: Vista en planta del Supermercado

6.2.2 Características del sistema parking de vehículos/módulo fotovoltaico

La selección de las características principales del módulo está ligada al área disponible de las zonas de aparcamiento, por lo tanto, el módulo deberá tener dimensiones tal que se optimice dicha área. Como área disponible para aparcamiento tenemos lo siguiente:

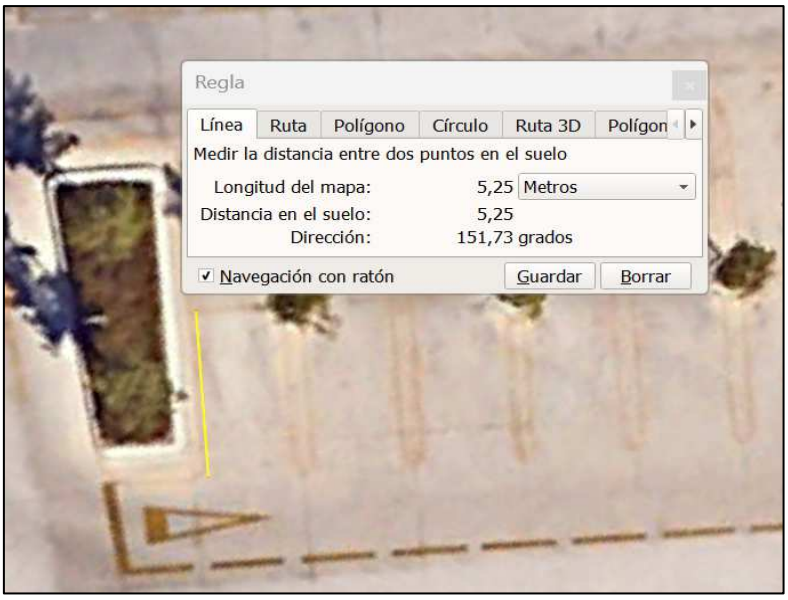


Ilustración 39: Zona típica de aparcamiento

Por lo tanto, las dimensiones de los paneles deberán optimizar el largo de las zonas de aparcamiento.

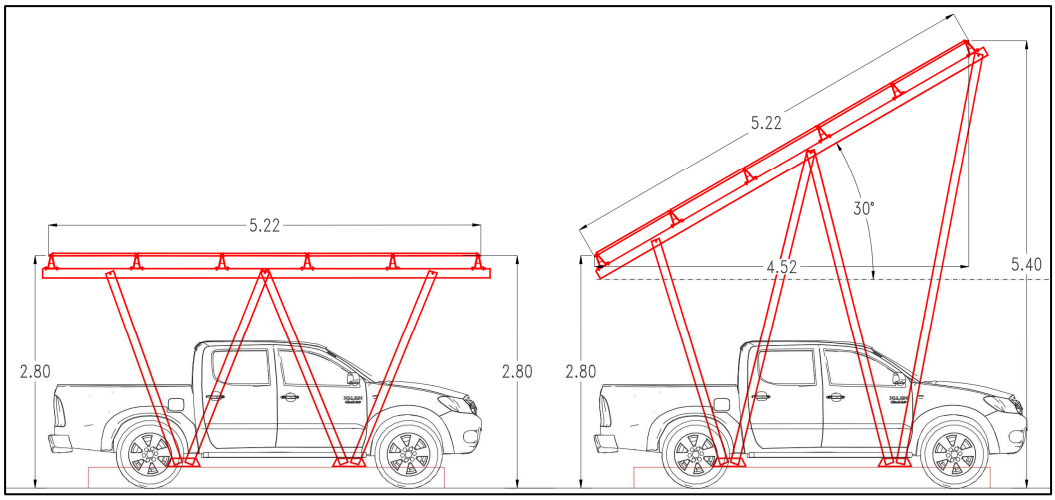


Ilustración 40: Esquema de paneles en aparcamientos

De la imagen anterior, se propone lo siguiente:

- Inclinación entre 0˚ y 30˚, considerando la practicidad de la solución, ya que mayores ángulos requerirían de diseños de soportes metálicos más complicados y robustos.

- Las dimensiones de los paneles deberán ocupar una longitud muy cercana a 5.22 m.

6.2.3 Módulo fotovoltaico

Con la finalidad de maximizar la generación de energía eléctrica de la instalación, se ha decidido evaluar distintos modelos de paneles fotovoltaicos que varían en potencia nominal y dimensiones físicas. Para esta evaluación, se han considerado la siguiente evaluación:

- Determinar la cantidad de módulos posibles a instalar considerando la limitante de indicada en la figura 39.
- Determinar el área ocupada por los módulos, considerando el área desperdiciada debido a la diferencia entre sus dimensiones y la limitante indicada en la figura 39.
- Determinar el indicador W/m2, seleccionando el módulo que presente el mayor valor.

Estos criterios permiten realizar una comparación objetiva del rendimiento espacial y eléctrico de cada opción. A continuación, se presentan las especificaciones de diferentes modelos encontrados en el mercado (Ver anexos):

Tabla 14: Selección de tamaño y potencia de módulos fotovoltaicos

Dato	un	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3		Modelo 4	
Potencia	Wp	500		550		600		650	
Alto	mm	2220		2384		2172		2384	
Ancho	mm	1102		1096		1303		1303	
Espesor	mm	35		35		35		35	
Peso	kg	27		29		31.5		35.5	
Largo disponible	mm	5250		5250		5250		5250	
Forma de instalación	-	Vert.	Horiz.	Vert.	Horiz.	Vert.	Horiz.	Vert.	Horiz.
Número de módulos	#	2	4	2	4	2	4	2	4
Área ocupada	m2	5.8	11.7	5.8	12.5	6.8	11.4	6.8	12.5
Criterio	W/m2	173	172	191	176	175	**210**	190	**208**

De la evaluación realizada, tenemos que los modelos 3 y 4, instalados de forma horizontal, presentan un mayor indicador W/m2 respecto a las demás alternativas, maximizando la densidad de generación eléctrica en el área disponible y asegurar un aprovechamiento eficiente del espacio.

Finalmente, se establece la instalación del Modelo 4 en lugar del Modelo 3, considerando que la diferencia entre indicadores tiene muy baja diferencia y además que al instalar el modelo 4, se tienen menor cantidad de módulos para la instalación, lo que optimiza los costos de transporte, montaje, además de costos de operación y mantenimiento.

En consecuencia, el módulo seleccionado deberá contar con las siguientes características técnicas::

- Potencia nominal : 650 Wp
- Corriente de cortocircuito : 18.39 A
- Tensión de circuito abierto : 45 V
- Punto de máxima potencia
  - Impp : 17.33 A
  - Vmpp : 37.5 V
- Dimensiones del módulo
  - Largo : 2384 mm
  - Ancho : 1303 mm
- Peso del módulo : 35.5 kg
- Número de células
  - En serie : 66
  - En paralelo : 2

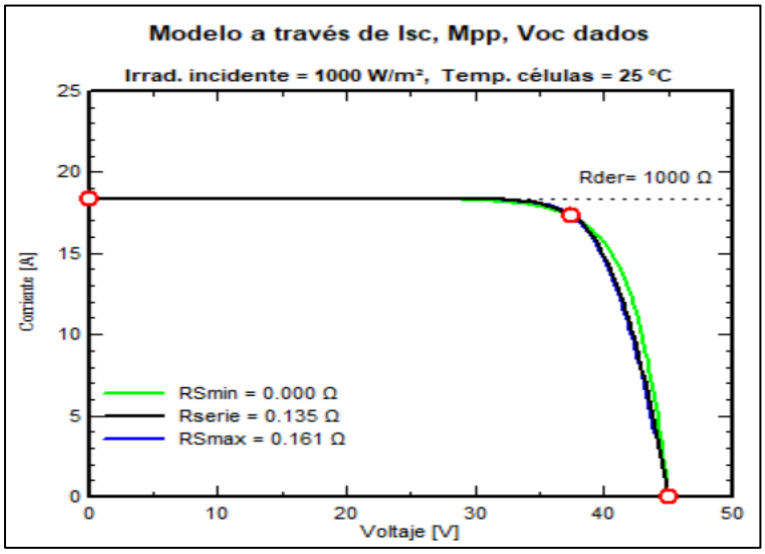


Ilustración 41: Curva tensión vs corriente, figura obtenida de PVSyst

Por lo tanto, se emplearán conjuntos de módulos en filas de 16 módulos (04 en vertical y 04 en horizontal), y dispuestos a lo largo de las zonas de aparcamiento, con el siguiente esquema:

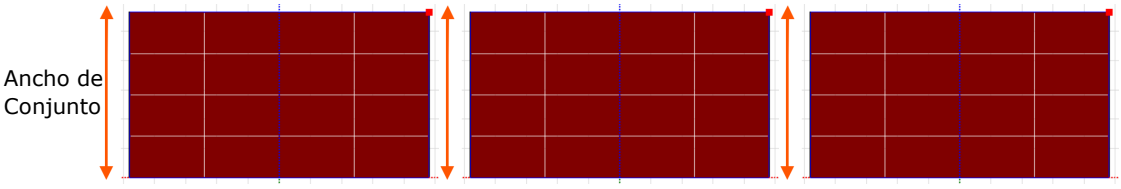


Ilustración 42: Agrupamiento de paneles

Con dicha disposición, se tiene un ancho del conjunto de 5.27 m, lo cual se ajusta bastante bien a nuestro esquema. El largo del conjunto dependerá del espacio disponible.

6.2.4 Disposición física

Considerando tres ubicaciones y orientaciones de paneles, indicadas en la figura siguiente, es posible determinar conforme a dicha disposición la inclinación más favorable para maximizar la producción de energía.

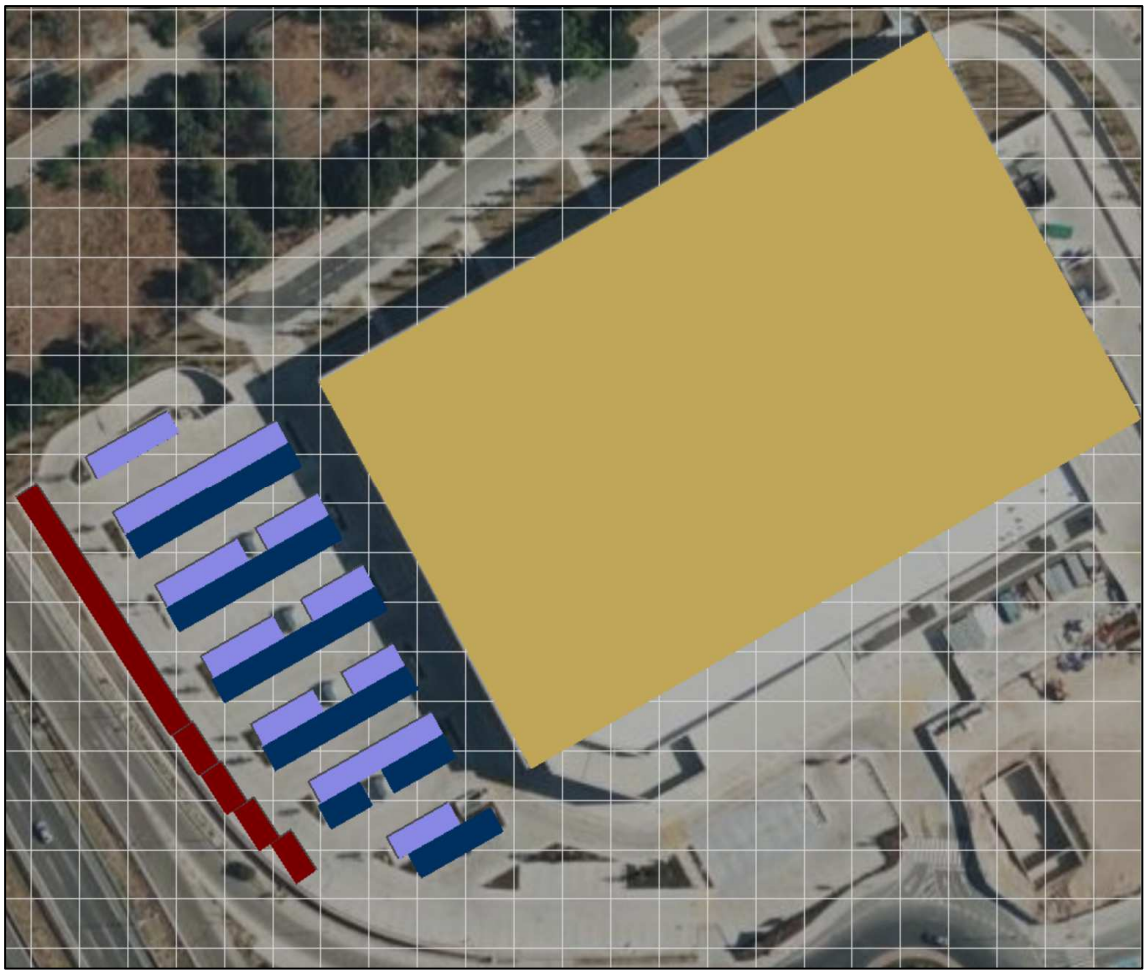


Ilustración 43: Esquema de paneles en aparcamientos

Las características de los bloques son como sigue:

- Bloque 1 : Color celeste, 320 módulos
- Bloque 2 : Color azul, 320 módulos
- Bloque 3 : Color rojo, 160 módulos

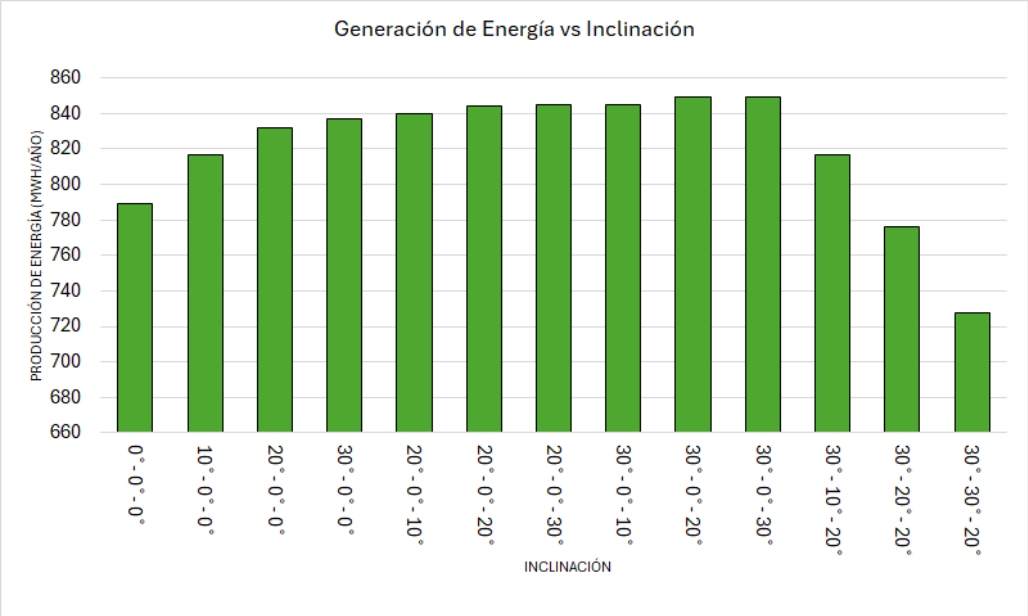


Ilustración 44: Generación de energía vs inclinación de paneles

De acuerdo con la imagen anterior, la máxima producción de energía se presenta cuando la inclinación de los paneles por bloque es como sigue:

- Bloque 1 : 30˚
- Bloque 2 : 0˚
- Bloque 3 : 20˚

Finalmente, se tiene el siguiente resumen de disposición física de módulos:

Tabla 15: Resumen de instalación de módulos fotovoltaicos

Bloque	Wp por módulo	# módulos	Potencia total kWp	# cadenas	# módulos por cadena	Inclinación
Bloque 1A	650	160	104	10	16	30˚
Bloque 1B	650	160	104	10	16	30˚
Bloque 2A	650	160	104	10	16	0˚
Bloque 2B	650	160	104	10	16	0˚
Bloque 3	650	160	104	10	16	20˚

6.2.5 Sombreado

Se ha considerado el efecto que tiene el edificio del supermercado sobre los paneles solares, lo cual impacta directamente sobre la producción de energía debido a las sombras generadas durante determinadas horas del día, en mayor o menor medida dependiendo del mes del año. Esta variación se debe principalmente a la inclinación del sol, que cambia según la estación, provocando que la proyección de sombra sea más extensa durante el invierno y más reducida en verano. Para cuantificar este efecto, se llevó a cabo una simulación anual del comportamiento solar con el software PVSyst con el objetivo de determinar las pérdidas de irradiancia sobre cada fila de paneles en

función de la posición del sol y la geometría del entorno construido tal como se observa en las siguientes figuras:

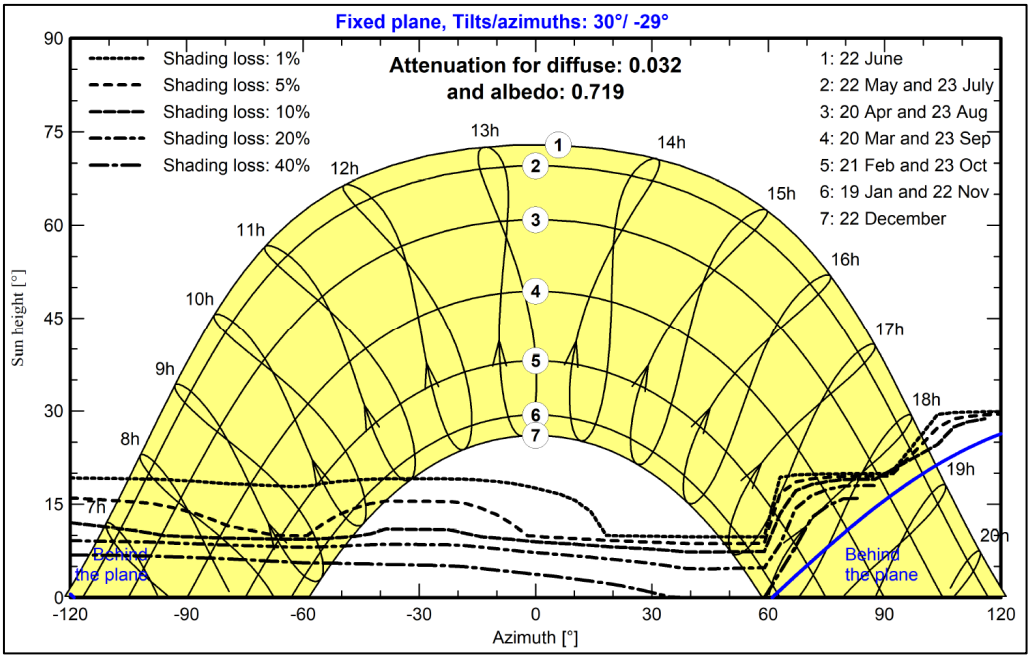


Ilustración 45: Diagrama solar del Bloque 1

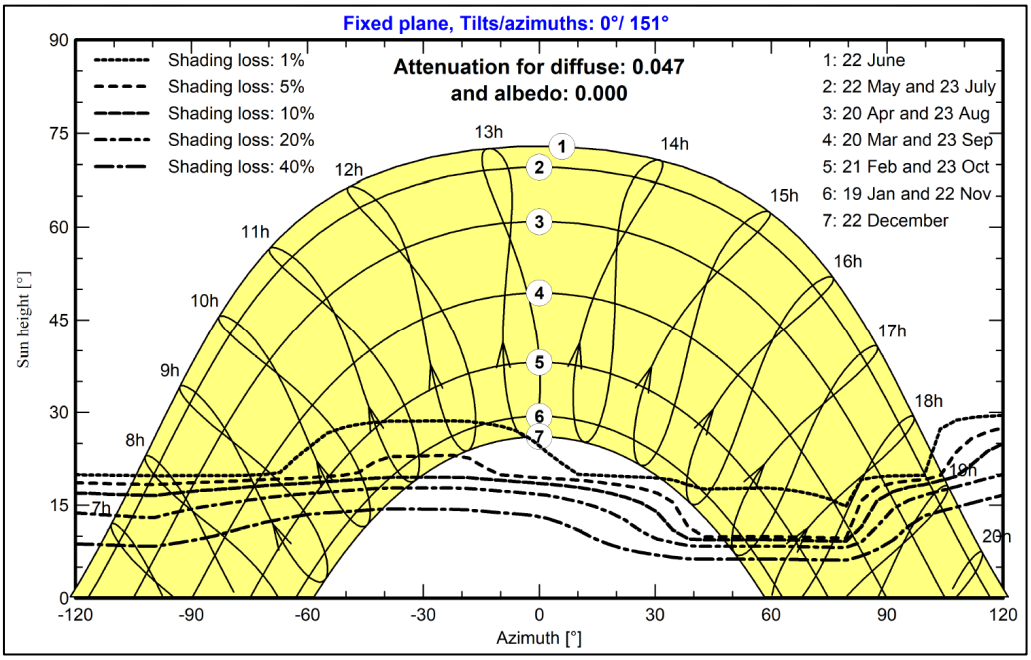


Ilustración 46: Diagrama solar del Bloque 2

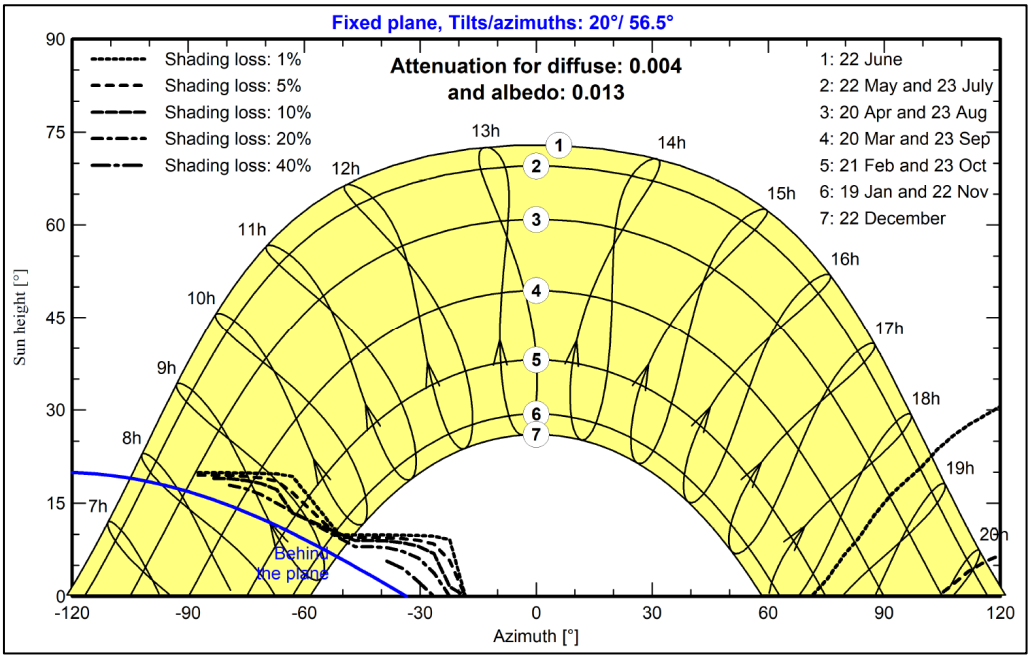


Ilustración 47: Diagrama solar del Bloque 3

6.3 Inversor

La selección del inversor deberá considerar el agrupamiento en bloques de los módulos fotovoltaicos, además de los siguientes parámetros:

- Potencia total DC : 520 kWp
- Potencia de bloque DC : 104 kWp (05 bloques)
- Entradas MPPT : ≥ 1
- Tensión de entrada : 600 V (por cantidad de módulos por cadena)
- Corriente de entrada : 173 A (por cantidad de cadenas)
- Salida trifásica : 380 – 220 VAC

Entre las marcas sugeridas para una instalación de tales características tenemos:

- Growatt MAX 100KTL3-X LV
- Sungrow SG110CX
- Huawei SUN2000-100KTL-M1

Considerando el balance entre costo y funcionalidad, seleccionaremos inversores Growatt, teniendo en cuenta que la confiabilidad del sistema queda cubierta al tener 5 inversores iguales. El inversor seleccionado cuenta con las siguientes características:

- Máxima tensión de entrada : 1100 V
- Tensión de arranque : 195 V
- Tensión nominal : 600 V
- Número de entradas : 10
- Máx. corriente por entrada : 40 A
- Potencia de salida : 110 kW

- Tensión de salida : 400 VAC trifásico
- Máx. corriente de salida : 174.6 A
- Dimensiones : 970/640/345mm (W, H, D)

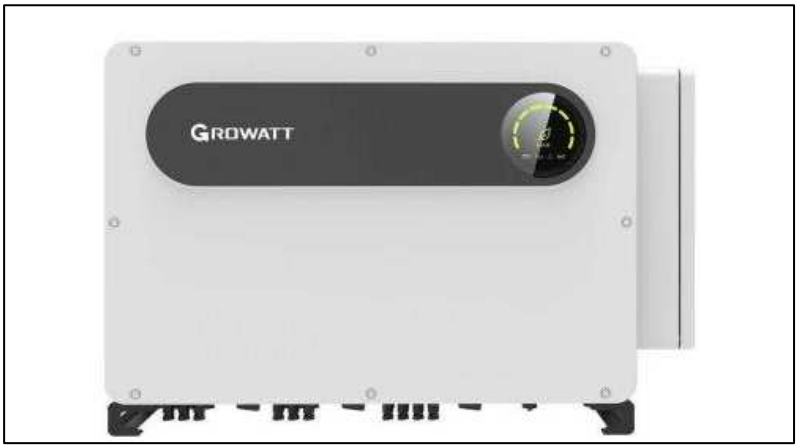


Ilustración 48: Inversor Growatt MAX 100KTL3-X LV, [55]

6.4 Producción de Energía

Con las definiciones previas, se tiene el siguiente resultado luego de realizar la simulación en el programa PVSyst. Para ello, se ingresaron los parámetros clave del sistema fotovoltaico, incluyendo la ubicación geográfica del proyecto, las características técnicas de los módulos y del inversor, la inclinación y orientación de los paneles, así como las pérdidas asociadas al sistema.

Tabla 16: Resumen de simulación

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	79.9	22.61	3.50	107.1	98.9	49.62	47.35	0.851
February	110.5	25.17	7.34	136.2	129.6	63.28	60.52	0.854
March	140.1	47.01	8.96	156.8	150.5	72.86	69.62	0.854
April	150.0	66.88	11.36	155.3	149.1	71.64	68.29	0.846
May	213.7	65.26	18.64	213.3	206.1	95.18	90.89	0.819
June	219.6	72.83	20.98	215.3	207.6	95.44	91.13	0.814
July	256.4	53.20	25.42	254.2	246.2	110.39	105.51	0.798
August	216.2	53.56	23.02	222.5	215.3	98.02	93.66	0.809
September	167.2	46.35	21.73	181.9	175.7	80.89	77.33	0.818
October	132.1	34.69	17.61	156.9	149.9	70.43	67.33	0.825
November	67.1	30.97	9.15	82.1	77.1	38.20	36.28	0.849
December	68.7	21.09	4.12	93.9	86.0	43.23	41.16	0.843
Year	1821.4	539.61	14.36	1975.4	1891.9	889.18	849.07	0.827

Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_Grid	Energy injected into grid
T_Amb	Ambient Temperature	PR	Performance Ratio
GlobInc	Global incident in coll. plane		
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings		

Asimismo, se modelaron con precisión los obstáculos cercanos, en particular la estructura del supermercado, para representar fielmente el comportamiento del

recurso solar a lo largo del año. La simulación entregó resultados mensuales y anuales de producción energética del sistema fotovoltaico.

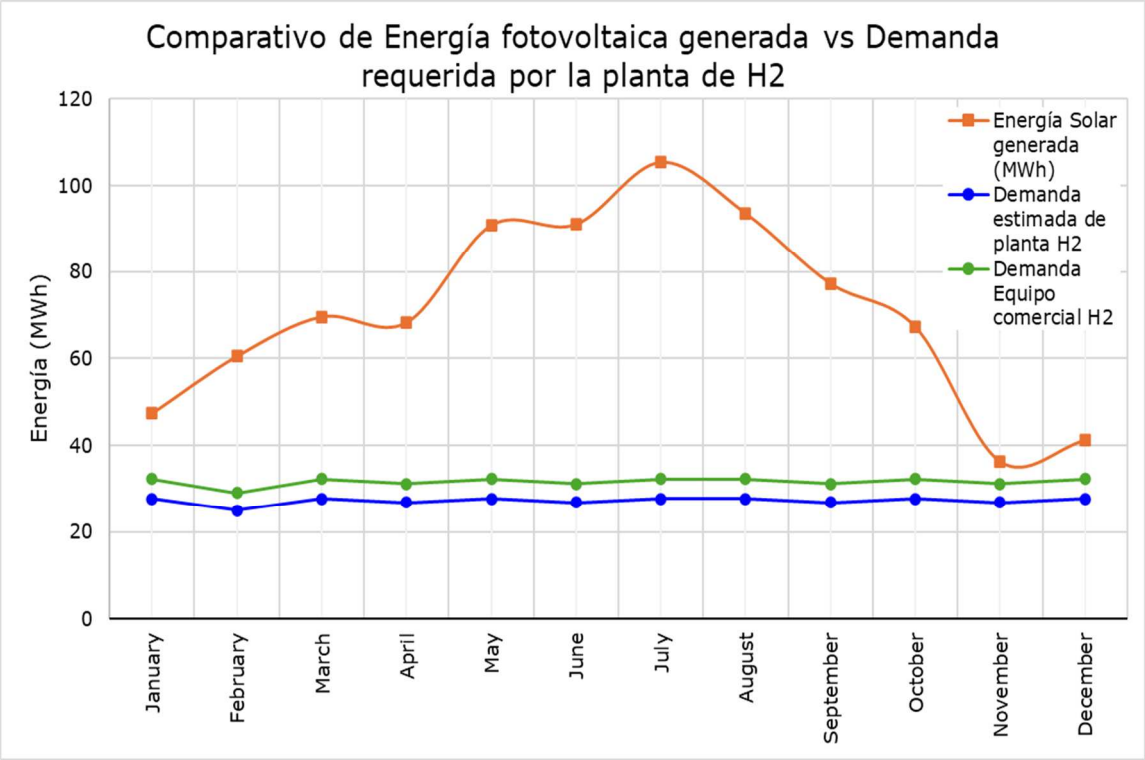


Ilustración 49: Energía generada por año vs demanda de la planta de H_2

Para el mes de noviembre, mes de menor producción, se espera lo siguiente:

- Energía generada : 36.28 MWh
- Cantidad de días : 30 días
- Energía diaria :1209 kWh/día

Considerando la energía requerida por el sistema de generación de hidrógeno, tenemos que la demanda estimada, así como la demanda de equipos comerciales, puede ser cubierta por el sistema fotovoltaico incluso durante el peor mes del año (noviembre). Esto se determinó tras una estimación de la carga diaria del electrolizador, los compresores y sistemas auxiliares, en conjunto con el perfil de consumo del supermercado y los datos de generación solar obtenidos mediante simulaciones horarias.

Cabe destacar que el diseño del sistema fotovoltaico fue dimensionado para cubrir la demanda de la planta de hidrógeno en la peor condición de generación, vertiendo los excedentes a la red del supermercado con la finalidad de cubrir parte de su demanda.

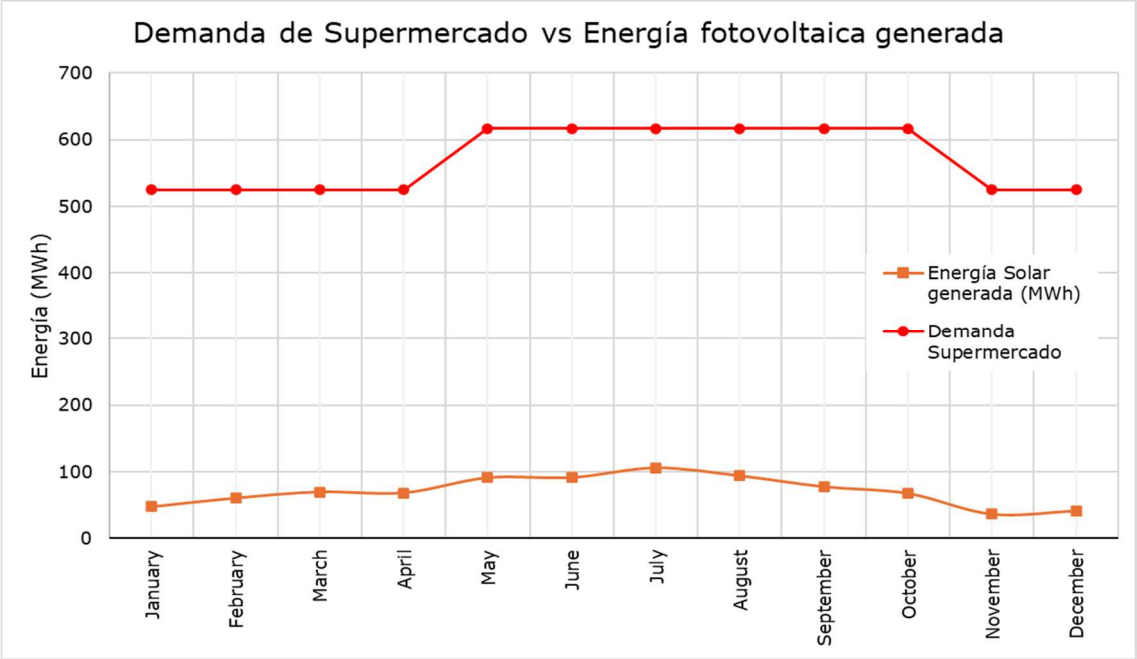


Ilustración 50: Demanda de Energía Supermercado vs Energía Fotovoltaica Generada

Del gráfico anterior se observa que la generación de energía del sistema fotovoltaico no podrá cubrir el total de la demanda del supermercado. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, los excedentes eléctricos una vez cubierta la demanda del sistema de generación de hidrógeno serán empleados para cubrir parte de la demanda del supermercado.

7 Interconexiones con instalaciones existentes

La filosofía de funcionamiento del sistema se basa en maximizar el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica generada para el funcionamiento del sistema de generación de hidrógeno, garantizando su operación con una fuente de energía renovable.

Puesto que la generación de energía eléctrica fotovoltaica excede la demanda del sistema de generación de hidrógeno, dichos excesos serán vertidos a la red del Supermercado para su autoconsumo, aprovechando el 100% del sistema de generación de energía.

Para tal fin, realizaremos conexiones hacia el tablero general del Supermercado, de forma que garanticemos el funcionamiento de los sistemas en base a la filosofía planteada.

El gráfico siguiente muestra las interconexiones eléctricas de los sistemas de generación fotovoltaica, sistemas de generación de hidrógeno con el tablero general del Supermercado.

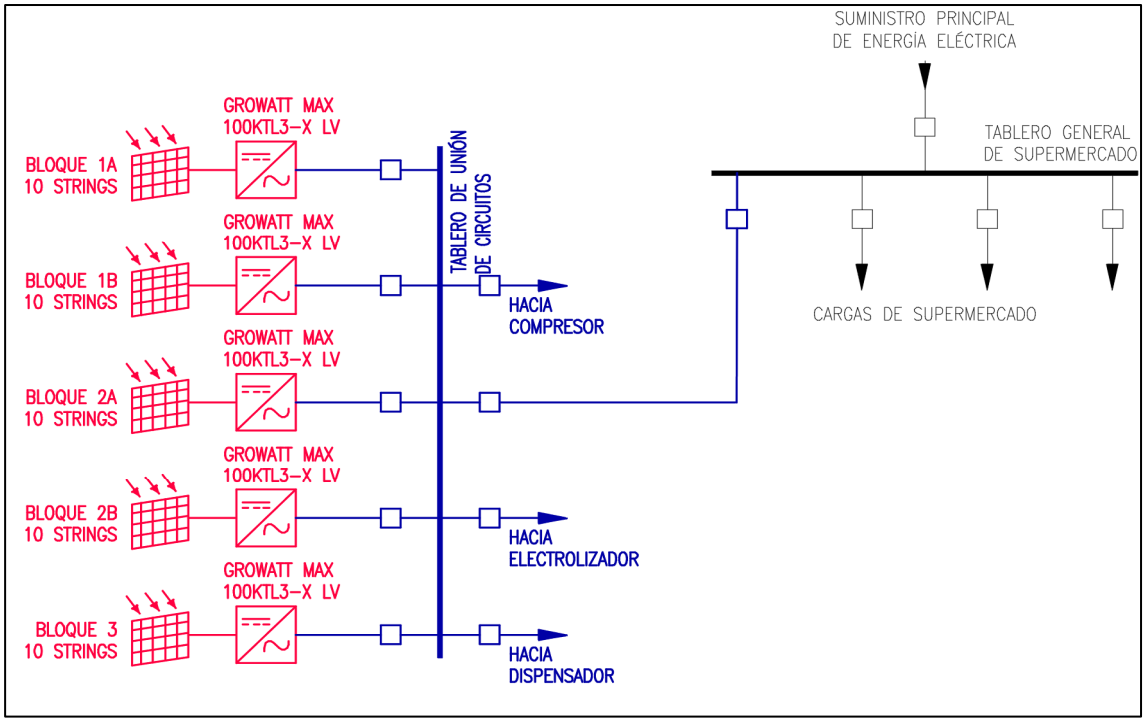


Ilustración 51: Esquema general de conexiones

El esquema unifilar general muestra los cinco bloques solares (Bloque 1A, 1B, 2A, 2B y 3), cada uno compuesto por 10 strings de paneles solares conectados a inversores GROWATT MAX 100KTL3-X. Estos inversores transforman la energía de corriente continua en corriente alterna y se interconectan a través de un “tablero de unión de circuitos”, el cual a su vez se conecta con el tablero general del Supermercado.

El sistema eléctrico está diseñado para atender de forma segura las cargas de generación de hidrógeno; a su vez, en caso de emergencia, el sistema de generación de hidrógeno podrá alimentarse desde el tablero general.

8 Evaluación técnica económica

8.1 Estimación de Costos

Con el fin de realizar la evaluación económica del proyecto, se han estimado los costos generales referenciales de los principales componentes, considerando la siguiente estructura:

- Estructura de costos:
  - Suministros.
  - Montaje.
  - Adecuaciones civiles.
- Porcentajes referenciales para el cálculo de montaje y adecuaciones:
  - Costos referenciales de electrolizador alcalino, 1000 €/kW
  - Costos de montaje estimado en 15% del costo del suministro para instalaciones de hidrógeno.
  - Costos de montaje estimado en 10% del costo del suministro para instalaciones fotovoltaicas.
  - Costos de adecuaciones de obras civiles estimado en 10% del costo del suministro.

Tabla 17: Resumen de costos de inversión

Item	Descripción	Costo €
1	**Sistema de Generación de Hidrógeno**	
1.10	Electrolizador 30 Nm3/h, 150 kW	150,000.00
1.20	Tanques de baja presión 25,000 lt, 2 und	30,000.00
1.30	Compresor 4 kW, relac 40/3	8,000.00
1.40	Tanques de alta presión 210 lt, 5 und	25,000.00
1.50	Montaje y otros accesorios	31,950.00
1.60	Adecuaciones civiles	21,300.00
	Costo Sistema 1	**266,250.00**
2	**Sistema Fotovoltaico**	
2.10	Módulos fotovoltaicos, 650 Wp, 800 und	80,000.00
2.20	Soportes metálicos para 16 mod, 50 und	37,500.00
2.30	Inversores 110 kW, 5 und.	17,500.00
2.40	Tablero eléctrico	5,000.00
2.50	Montaje y otros accesorios	14,000.00
2.60	Adecuaciones civiles	11,750.00
	Costo Sistema 2	**165,750.00**
	Total sin impuestos	**432,000.00**

Con el fin de facilitar la interpretación de la estructura de costos de cada sistema, se han elaborado los siguientes gráficos circulares que muestran la distribución porcentual de los principales componentes de inversión. Esta representación permite identificar de forma visual los elementos con mayor peso relativo dentro de cada sistema de costes.

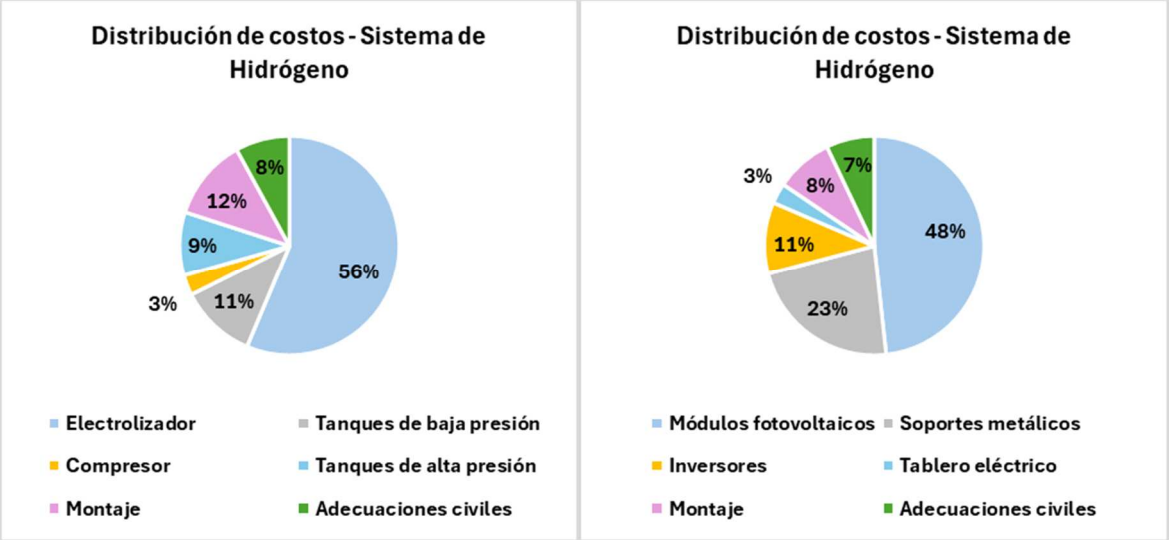


Ilustración 52: Distribución de costos

- Costos de Operación y Mantenimiento (O&M): Se estima un costo anual de operación y mantenimiento equivalente al 2,5% y 1,5 % del costo total de inversión para los sistemas de hidrógeno y fotovoltaico.

Tabla 18: Resumen de costos de inversión

Descripción	Costo €
OyM de Sistema de Hidrógeno	6,902.63
OyM de Sistema Fotovoltaico	2,486.25
Costo total de OyM por año	9,388.88

El OyM del sistema de hidrógeno considera el consumo de agua del electrolizador para generar la cantidad de hidrógeno demandada, considerando un ratio de consumo de 20 lt de agua por cada kg de hidrógeno generado (18.8 kg de H_2).

Tabla 19: Resumen de costos de inversión

Consumo de agua (20 lt/kg H2)	375.0	lt-día
Consumo de agua por año	136.9	m3-año
Costo por m3 de agua	1.8	€/m3-mes
Costo por consumo de agua	**246.38**	**€/año**

8.2 Estimación de Beneficios

La ejecución del proyecto generará beneficios económicos en dos áreas principales:

- **Ingresos por venta de H_2 para buses**. El hidrógeno verde producido por la planta reemplazará el consumo de combustible fósil en la flota de transporte público. La estimación de este beneficio se fundamenta en:
    - Recorrido diario de los buses (km), de acuerdo con el dimensionamiento de la planta de hidrógeno.
    - Precio de venta promedio del hidrógeno, el cual fue estimado a partir de la información de la *European Hydrogen Observatory*. (**6.6 €/kg**)
- Ahorro por autoconsumo de energía eléctrica, como consecuencia de la diferencia de la energía eléctrica generada y el consumo de la planta de hidrógeno. El beneficio se estima como sigue:
    - Diferencia entre Energía anual generada por el sistema fotovoltaico y Energía anual consumida por el sistema de hidrógeno.
    - Costo anual promedio de la energía en €/MWh.

Tabla 20: Resumen de beneficios

Descripción	valor	unidad
Hidrógeno generado por día	18.8	kg día
Hidrógeno generado por año	6843.8	kg año
Costo por kg de H2 verde	6.6	€/kg
Venta de Hidrógeno	**45,237.19**	**€/año**
Autoconsumo	459.43	MWh/año
Costo energía	65.00	€/MWh
Ahorro por autoconsumo	**29,863.11**	**€/año**

8.3 Evaluación económica

Este análisis económico busca evaluar la viabilidad del proyecto y cuantificar su rentabilidad en base a indicadores clave como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), el periodo de recuperación de la inversión (payback) y el análisis de sensibilidad ante posibles variaciones en las condiciones del mercado para un periodo de 20 años y una tasa de evaluación del 12%.

Con el fin de determinar su viabilidad, la evaluación incluye el análisis de los costos iniciales, gastos operativos y beneficios proyectados determinados anteriormente.

Tabla 21: Resumen de Costos y beneficios en el tiempo

Tiempo años	Costo OyM + Agua €	Benef x H2 €	Benef x Autoc. €	Flujo de caja €	Amortización €
0	(432,000.00)	-	-	(432,000.00)	(432,000.00)
1	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	(373,329.08)
2	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	(320,944.34)
3	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	(274,172.24)
4	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	(232,411.45)
5	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	(195,125.02)
6	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	(161,833.57)
7	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	(132,109.05)
8	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	(105,569.31)
9	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	(81,873.11)
10	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	(60,715.79)
11	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	(41,825.33)
12	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	(24,958.84)
13	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	(9,899.48)
14	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	3,546.38
15	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	15,551.61
16	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	26,270.57
17	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	35,841.07
18	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	44,386.15
19	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	52,015.69
20	(9,388.88)	45,237.19	29,863.11	65,711.43	58,827.78

Considerando la tabla anterior, obtenemos los siguientes indicadores económicos para el escenario base.

- VAN : 58,827.78 €
- TIR : 14.1%
- Tiempo de pago : 14 años

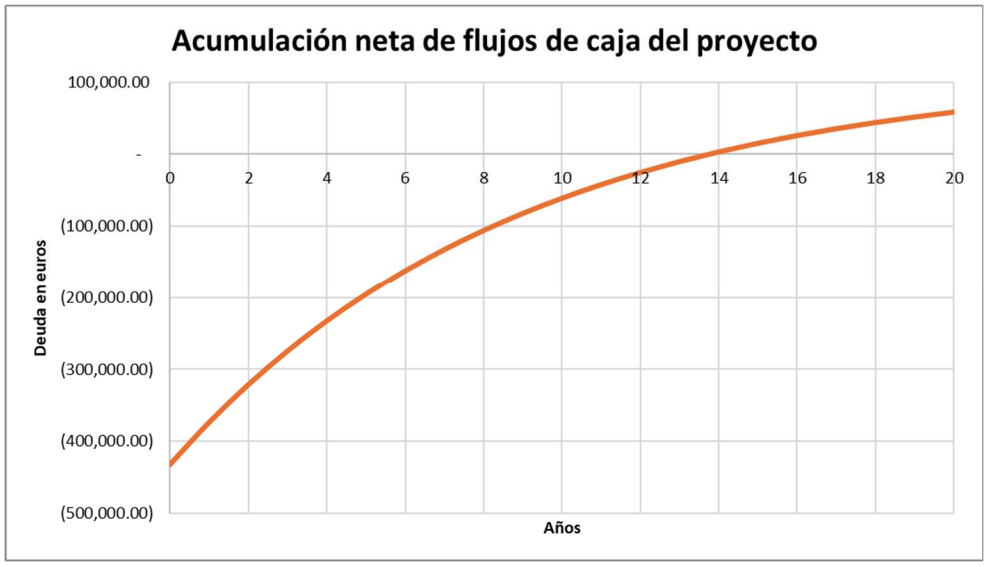


Ilustración 53: Acumulación neta de flujos de caja en el tiempo

Los escenarios de sensibilidad considerados serán los siguientes:

- Escenario 1: Incremento del 5% del costo de inversión.
- Escenario 2: Incremento del 20% del costo de OyM anual.
- Escenario 3: Reducción del 10% en la generación de hidrógeno.
- Escenario 4: Reducción del 10% de precio de venta de hidrógeno.
- Escenario 5: Reducción del 20% del costo promedio de energía.

Tabla 22: Resumen de indicadores económicos

Escenario	VAN (Miles €)	TIR %	Pago (años)
Base	58.83	14.1%	14
Escenario 1	20.81	12.7%	17
Escenario 2	32.87	13.2%	16
Escenario 3	25.04	12.9%	17
Escenario 4	25.04	12.9%	17
Escenario 5	14.22	12.5%	18

El resultado de la sensibilidad es un proyecto viable, con indicadores positivos ante los diferentes escenarios planteados.

Finalmente, en caso de considerar para la ejecución del proyecto un esquema de financiamiento en el cual el 70% del CAPEX será cubierto mediante un préstamo bancario, con una tasa de interés del 6% anual y un plazo de 10 años. Este mecanismo permite mantener cuotas constantes durante el periodo de repago, facilitando la planificación financiera y garantizando la cobertura del desembolso inicial sin comprometer en exceso la liquidez del proyecto.

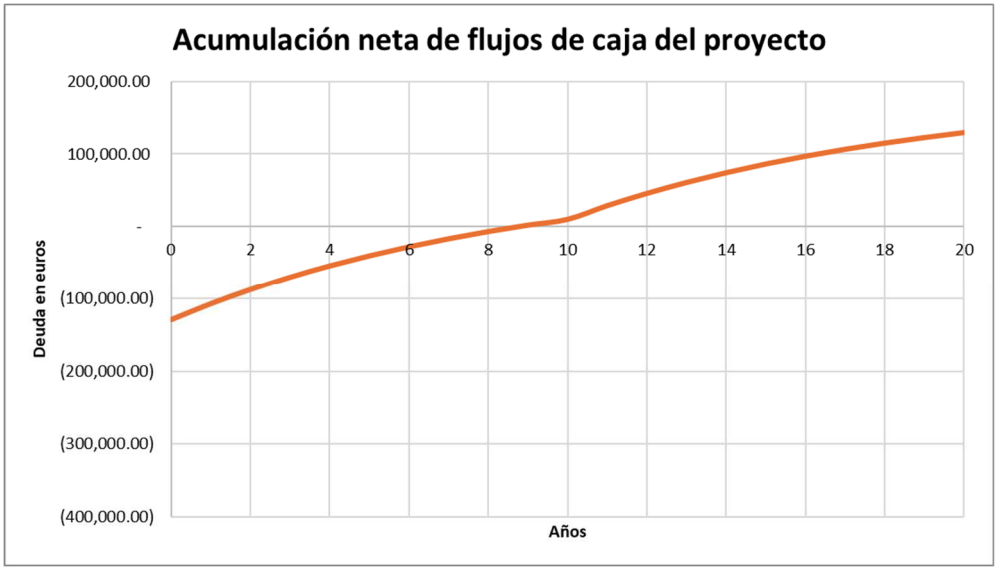


Ilustración 54: Acumulación neta de flujos de caja en el tiempo considerando financiación

Considerando lo anterior, podemos tener un tiempo de recuperación de la inversión de 9 años, mejorando la TIR del proyecto, haciéndolo más atractivo para inversionistas.

Tabla 23: Flujo de caja de proyecto con financiamiento

Tiempo años	Flujo de caja sin Financ. €	Financiamiento	Flujo de caja con Financ. €	Amortización €
	,000.00)	302,400.00	(129,600.00)	(129,600.00)
	,711.43	(41,086.47)	24,624.95	(107,613.43)
2	65,711.43	(41,086.47)	24,624.95	(87,982.57)
3	65,711.43	(41,086.47)	24,624.95	(70,455.01)
4	65,711.43	(41,086.47)	24,624.95	(54,805.41)
5	65,711.43	(41,086.47)	24,624.95	(40,832.55)
6	65,711.43	(41,086.47)	24,624.95	(28,356.78)
7	65,711.43	(41,086.47)	24,624.95	(17,217.70)
8	65,711.43	(41,086.47)	24,624.95	(7,272.10)
9	65,711.43	(41,086.47)	24,624.95	1,607.91
10	65,711.43	(41,086.47)	24,624.95	9,536.48
11	65,711.43		65,711.43	28,426.95
12	65,711.43		65,711.43	45,293.44
13	65,711.43		65,711.43	60,352.80
14	65,711.43		65,711.43	73,798.66
15	65,711.43		65,711.43	85,803.89
16	65,711.43		65,711.43	96,522.85
17	65,711.43		65,711.43	106,093.34
18	65,711.43		65,711.43	114,638.43
19	65,711.43		65,711.43	122,267.97
20	65,711.43		65,711.43	129,080.06

9 Conclusiones y recomendaciones

Como resultado de la implementación de los sistemas de generación fotovoltaica, generación de hidrógeno, y aprovechamiento de áreas disponibles en el Supermercado, se obtienen las siguientes conclusiones y recomendaciones derivadas de este estudio:

- El presente proyecto se enmarca en el contexto de la transición energética y la necesidad de reducir las emisiones de CO_2 asociadas al uso intensivo de combustibles fósiles, incorporando soluciones sostenibles como la generación renovable y el hidrógeno verde.
- En este estudio se lleva a cabo el dimensionamiento de una planta en el aparcamiento de un supermercado, orientada a cubrir su demanda eléctrica, permitir la carga de vehículos de hidrógeno y optimizar el uso del suelo mediante cubiertas solares, complementando el autoconsumo con la inyección de excedentes.
- Para ello, se instalarán los siguientes:
    - Planta fotovoltaica 520 kWp, con inversores 5x110 kW.

    - Planta de hidrógeno con electrolizador de 150 kW, almacenamiento de 5 días (93.8 kg de H_2), sistema de compresión hasta 400 bar y dispensador.
- La inversión inicial del proyecto es de 432 mil €, los cuales pueden provenir de capital propio de la empresa o mediante el financiamiento de una parte de la inversión inicial.
- El análisis económico muestra la viabilidad financiera del proyecto considerando capital propio, con un **VAN de 58.827,78 €, una TIR del 14,1 % y un periodo de recuperación de 14 años**, sin considerar financiamiento alguno.
- Considerando escenarios de sensibilidad menos favorables (aumento de inversión, mayores costos de O&M o menor demanda de hidrógeno), los indicadores permanecen positivos.
- Ante un posible financiamiento de hasta el 70% del capital de inversión, con un tiempo de pago de 10 años a una tasa del 6%, se obtiene una mejora de los indicadores financieros del proyecto, obteniendo **un VAN de 129.080,06 €, una TIR del 22,3 % y un periodo de recuperación de 9 años**.
- El proyecto genera sinergia con el entorno, al utilizar áreas infrautilizadas sin interferir en la operación del supermercado, y otorga valor añadido mediante la producción de energía limpia destinada tanto al autoconsumo como a la movilidad con hidrógeno.
- Desde el punto de vista técnico, se evidencia una integración eficiente entre energía fotovoltaica, hidrógeno y transporte público, optimizando la infraestructura existente y asegurando la sostenibilidad operativa.
- Desde el punto de vista económico, la rentabilidad es atractiva, y la inclusión de incentivos públicos para proyectos sostenibles podría mejorar aún más los indicadores financieros.
- La implementación del proyecto otorga beneficios reputacionales, al alinearse con los objetivos de sostenibilidad, innovación y transición energética, reforzando la imagen corporativa del supermercado y generando un impacto positivo en la comunidad
- Recomendación – Monitoreo y mantenimiento inteligente: Luego de la implementación del proyecto y dependiendo de la necesidad de reducir los costos de operación y mantenimiento, es posible realizar en el sistema orientados a dicho fin, por lo tanto, es posible recomendar el uso de un sistema de monitoreo en tiempo real tanto de la planta fotovoltaica como de la producción y consumo de hidrógeno, optimizando la eficiencia operativa y prevenir posibles averías.
- El mayor aprovechamiento de áreas infrautilizados como lo son muchas veces zonas de parqueos de vehículos es una realidad en muchos Supermercados. La implementación de un proyecto que hace un mejor uso del área, además de generar energía limpia, tanto eléctrica como en hidrógeno, va alineado con la sostenibilidad, innovación y transición energética, lo que puede generar beneficios reputacionales, por lo tanto, se recomienda la instalación de sistemas de generación de energía renovable en zonas de parqueo u otros espacios

infrautilizados dentro de los supermercados fomentando la producción de energía limpia, contribuyendo a la sostenibilidad, innovación y transición energética.

10 Referencias

[1] Ember. (2024, mayo). Global Electricity Review 2024. Ember. https://ember-energy.org/app/uploads/2024/05/ES_Global-Electricity-Review-2024.pdf

[2] Zeyen, E., Kalweit, S., Victoria, M., & Brown, T. (2025, 5 de febrero). Shifting burdens: How delayed decarbonisation of road transport affects other sectoral emission reductions. https://arxiv.org/abs/2502.02809

[3] Redacción EFEverde. (2024, 18 de diciembre). Las emisiones de gases de efecto invernadero crecieron 1% en España en 2024. EFEverde. https://efeverde.com/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-crecieron-un-1-en-espana-en-2024/

[4] Moncada, M. (19 de marzo de 2025). Casi el 57 % de toda la electricidad que generó España en 2024 fue de origen renovable. Energías Renovables. https://www.energias-renovables.com/panorama/casi-57-generacion-renovable-espana-20250318

[5] Pérez, R. (2025, 29 de abril). La matriz de Red Eléctrica alertó hace dos meses del riesgo de desconexiones severas por el aumento de las renovables. El País. https://elpais.com/economia/2025-04-29/la-matriz-de-red-electrica-alerto-hace-dos-meses-del-riesgo-de-desconexiones-severas-por-el-aumento-de-las-renovables.html

[6] Otovo. (2025, 1 de abril). Un nuevo estudio cuantifica el ahorro que las baterías solares ofrecen a los propietarios. pv magazine España. https://www.pv-magazine.es/comunicados/un-nuevo-estudio-cuantifica-el-ahorro-que-las-baterias-solares-ofrecen-a-los-propietarios/

[7] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2025). Primera convocatoria de ayudas para proyectos innovadores de almacenamiento energético cofinanciadas con Fondos FEDER 21-27 (versión v1) [PDF]. IDAE. https://sede.idae.gob.es/sites/default/files/documentos/2025/Almacenamiento/faqs_pinalm.v1.pdf

[8] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2020). Código Técnico de la Edificación (CTE). España. https://www.codigotecnico.org

[9] National Fire Protection Association – NFPA. (2023). NFPA 2: Código de Tecnologías de Hidrógeno. Quincy, MA, Estados Unidos.

[10] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD). (2020). Hoja de Ruta del Hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno verde. Gobierno de España. https://www.miteco.gob.es/es/prensa/hoja-ruta-hidrogeno.aspx.

[11] Gobierno de España. (2021). Real Decreto-ley 29/2021, de 21 de diciembre, por el que se adoptan medidas urgentes en el ámbito energético para el fomento de la movilidad eléctrica, el autoconsumo y el despliegue de energías renovables. Boletín Oficial del Estado (BOE). https://www.boe.es/eli/es/rdl/2021/12/21/29.

[12] Hurtado Mayén, F. J. (2024, febrero 19). ¿Qué es el NFPA 2 y por qué es importante para la industria del hidrógeno? Publicado en LinkedIn. https://www.linkedin.com/pulse/qu%C3%A9-es-el-nfpa-2-y-por-importante-para-la-industria-hurtado-may%C3%A9n-f9cbf/

[13] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD). Sitio web del hidrógeno. https://www.miteco.gob.es/es/energia/hidrocarburos-nuevos-combustibles/hidrogeno.html

[14] Baltimore Aircoil Company. Producción de hidrógeno verde. https://www.baltimoreaircoil.eu/es/soluciones/produccion-de-hidrogeno-verde

[15] Universidad Europea. (s. f.). Figura sobre Sistemas de Almacenamiento Energético [Figura obtenida de presentación]. Universidad Europea.

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

[17] Fertiberia. (s. f.). Puertollano: proyecto H2F, planta de hidrógeno, amoníaco y fertilizantes bajos en carbono. https://www.fertiberia.com/amoniacoverde/puertollano-proyecto-h2f-planta-de-hidrogeno-amoniaco-y-fertilizantes-bajos-en-carbono/

[18] Iberdrola España. (12 de septiembre de 2024). bp e Iberdrola España anuncian decisión final de inversión para la mayor planta de hidrógeno verde de España.

[19] Gómez, R. (29 de noviembre de 2024). Prueba final superada para el tren español de hidrógeno envidiado en toda Europa. El HuffPost España. https://www.huffingtonpost.es/economia/prueba-final-superada-tren-espanol-hidrogeno-envidiado-toda-europa.html

[20] Madrileña Red de Gas. (1 de diciembre de 2023). En marcha la primera caldera de hidrógeno verde en Madrid para generar calefacción sostenible. https://www.madrilena.es/en-marcha-la-primera-caldera-de-hidrogeno-verde-en-madrid-para-generar-calefaccion-sostenible/

[21] Pronor. (10 de octubre de 2024). Primer hidrogenoducto de España que inyectará hidrógeno verde en la red de gas natural. https://pronor.es/primer-hidrogenoducto-de-espana-que-inyectara-hidrogeno-verde-en-la-red-de-gas-natural/

[22] IDEA TSG. (s. f.). SOFC4GREENGRID: tecnologías para producir energía a partir de hidrógeno verde. https://ideatsg.com/idea-green/sofc4greengrid-tecnologias-para-producir-energia-a-partir-de-hidrogeno-verde/

[23] ICEX-Invest in Spain. (1 de abril de 2025). Deutz inaugura la primera planta piloto de hidrógeno verde en España. https://www.investinspain.org/content/icex-invest/es/noticias-main/2025/deutz.html

[24] Repsol. (actualizado a julio de 2025). Hidrógeno renovable: qué es y beneficios para la movilidad. https://www.repsol.com/es/conocenos/nuestra-actividad/industrial/hidrogeno-renovable/index.cshtml

[25] Asociación Española del Hidrógeno (AeH2). (julio de 2023). Informe: Censo de Proyectos (Fase I). https://www.aeh2.org/wp-content/uploads/2023/07/AeH2_Informe-Censo-de-Proyectos.pdf

[26] Cossent, R., Figuerola-Ferretti, I. C., Sanz, F. J., & Serna, S. (febrero de 2025). Informe anual Cátedra de Estudios sobre el Hidrógeno: Hidrógeno renovable: quo vadis? Cátedra de Estudios sobre el Hidrógeno, Universidad de Comillas (ICAI-ICADE). https://files.griddo.comillas.edu/20250312-informe-anual-catedra-hidrogeno.pdf

[27] Fundación Renovables. (marzo de 2025). Proyectos de H_2: ¿El tamaño importa? [Documento PDF]. https://fundacionrenovables.org/wp-content/uploads/2025/03/Proyectos-de-H2_compressed.pdf

[28] 3M México. (s. f.). Celdas de combustible de hidrógeno. En Tecnología del hidrógeno – Aplicaciones. https://www.3m.com.mx/3M/es_MX/hidrogeno/aplicaciones/celdas-de-combustible-de-hidrogeno/

[29] Asociación Española del Hidrógeno (AeH2). (s. f.). Censo de proyectos de hidrógeno. https://aeh2.org/censo-de-proyectos-de-hidrogeno/

[30] Cátedra de Estudios sobre el Hidrógeno, Universidad Pontificia Comillas. (s. f.). Mapa de proyectos en España. https://www.comillas.edu/catedras-de-investigacion/catedra-de-estudios-sobre-el-hidrogeno/mapa-de-proyectos-en-espana/

[31] Stargate Hydrogen. (s. f.). European made alkaline electrolysers for enabling the industry of tomorrow. https://stargatehydrogen.com/

[32] Stargate Hydrogen. (s. f.). Turn-key alkaline electrolysers and systems for green hydrogen production. https://stargatehydrogen.com/

[33] Hygreen Energy. (s. f.). Leading electrolyzer manufacturer for green hydrogen solutions. https://www.hygreenenergy.com/

[34] Hygreen Energy. (s. f.). Leading electrolyzer solutions for green hydrogen production. https://www.hygreenenergy.com/

[35] Advait Energy Transitions Limited. (s. f.). Alkaline electrolysers (página web). https://www.advaitgroup.co.in/renewable-energy/alkaline-electrolyser/

[36] Hefei Sinopower Technologies Co., Ltd. (s. f.). Hydrogen production equipment, hydrogen fuel cell systems, alkaline and PEM electrolyzers, energy storage solutions https://www.hfsinopower.com/

[37] Hefei Sinopower Technologies Co., Ltd. (s. f.). Hydrogen production equipment, hydrogen fuel cell systems, alkaline and PEM electrolyzers, energy storage solutions https://www.hfsinopower.com/

[38] Piel by McPhy. (s. f.). Hydrogen solutions for your industrial processes. https://piel.it/en/

[39] Nel Hydrogen. (s. f.). PEM Electrolyser – C Series [Página de producto]. https://nelhydrogen.com/product/c-series-electrolyser/

[40] Cummins. (octubre de 2023). Electrolyzer brochure [Folleto PDF]. Cummins. https://www.cummins.com/sites/default/files/2023-10/electrolyzer-brochure.pdf

[41] Toyota España. (2021). Catálogo Toyota Mirai (2025). https://www.toyota.es

[42] Hyundai Motor España. (s. f.). NEXO Pila Combustible de Hidrógeno: alta autonomía y rendimiento. https://www.hyundai.com/es/es/modelos/nexo.html

[43] Costco España. Localizador de tiendas. https://www.costco.es/store-finder

[44] TotalEnergies. (21 de diciembre de 2021). ¿Cuánto se paga de luz en un local comercial?. https://www.totalenergies.es/es/pymes/blog/gasto-luz-local-comercial#:~:text=El%20gasto%20en%20energ%C3%ADa%20de,de%20las%20dimensiones%20del%20establecimiento

[45] Tasou, S. A., Ge, Y., Hadawey, A., & Evans, J. Energy Consumption and Conservation in Food Retailing. (s.f.).

[46] BSE Renovables. (2024–2025). Catálogo de estructuras para parking con paneles solares. Edición comercial.

[47] Suptanont, S. (s. f.). Planta de energía de hidrógeno: producción de sistema de ecología de energía verde con diagrama de celda solar isométrica [Ilustración vectorial]. Vecteezy. https://es.vecteezy.com/arte-vectorial/13336526-planta-de-energia-de-hidrogeno-produccion-de-sistema-de-ecologia-de-energia-verde-con-diagrama-de-celda-solar-isometrica-vector-aislado-sobre-fondo-blanco

[48] Consorcio Regional de Transportes de Madrid (CRTM). (s. f.). Tu transporte público https://www.crtm.es/tu-transporte-publico/

[49] DatosMundial.com. (octubre de 2018–agosto de 2025). Amanecer y atardecer en España. https://www.datosmundial.com/europa/espana/puesta-del-sol.php

[50] Lapesa Grupo Empresarial. (s. f.). Ingeniería, desarrollo y fabricación de depósitos y recipientes a presión desde 1964. https://www.lapesa.com/

[51] Hefei Sinopower Technologies Co., Ltd. (s. f.). Tanque de hidrógeno de 140 L y 350 bar para automóviles. https://es.hfsinopower.com/140l-350bar-hydrogen-tank-for-automobiles

[52] High-Pressure Compressors. (s. f.). 350 bar Industrial Bottling Hydrogen Make-Up Gas Diaphragm Compressor. https://www.high-pressure-compressors.com/es/product/350bar-industrial-bottling-hydrogen-make-up-gas-diaphragm-compressor.html

[53] Wolftank Group. (s. f.). Hydrogen Smart Fueller (HSF): energizing the future. https://wolftankgroup.com/mediapool/2023/09/Wolftank-Group-Hydrogen-Smart-Fueler.pdf

[54] Growatt. (s. f.). Datasheet MAX 100–125KTL3-X LV. https://cdn.autosolar.es/pdf/datasheet-growatt-MAX-100-125KTL3-X-LV.pdf

11 Anexos

Modelos de módulos fotovoltaicos.

500 Wp

MECHANICAL DATA

Solar cells	Monocrystalline
Cell configuration	150 cells (5×15+5×15)
Module dimensions	2220×1102×35mm
Weight	27±1kg
Superstrate	High Transmission, Low Iron, Tempered ARC Glass
Substrate	White Back-sheet
Frame	Anodized Aluminium Alloy type 6005-2T6, Silver Color
J-Box	Potted, IP68, 1500VDC, 3 Schottky bypass diodes
Cables	4.0mm² (12AWG), Positive(+)350mm, Negative(-)350mm (Connector Included)
Connector	Risen Twinsel PV-SY02, IP68

550 Wp

MECHANICAL DATA

Solar cells	Monocrystalline
Cell configuration	110 cells (5×11+5×11)
Module dimensions	2384×1096×35mm
Weight	29kg
Superstrate	High Transmission, Low Iron, Tempered ARC Glass
Substrate	White Back-sheet
Frame	Anodized Aluminium Alloy type 6005-2T6, Silver Color
J-Box	Potted, IP68, 1500VDC, 3 Schottky bypass diodes
Cables	4.0mm² (12AWG), Positive(+)350mm, Negative(-)350mm (Connector Included)
Connector	Risen Twinsel PV-SY02, IP68

600 Wp

MECHANICAL DATA

Solar cells	Monocrystalline
Cell configuration	120 cells (6×10+6×10)
Module dimensions	2172×1303×35mm
Weight	31.5kg
Superstrate	High Transmission, Low Iron, Tempered ARC Glass
Substrate	White Back-sheet
Frame	Anodized Aluminium Alloy type 6005-2T6, Silver Color
J-Box	Potted, IP68, 1500VDC, 3 Schottky bypass diodes
Cables	4.0mm² (12AWG), Positive(+)350mm, Negative(-)350mm (Connector Included)
Connector	Risen Twinsel PV-SY02, IP68

650 Wp

MECHANICAL DATA

Solar cells	Monocrystalline
Cell configuration	132 cells (6×11+6×11)
Module dimensions	2384×1303×35mm
Weight	35.5kg
Superstrate	High Transmission, Low Iron, Tempered ARC Glass
Substrate	White Back-sheet
Frame	High strength alloy steel
J-Box	Potted, IP68, 1500VDC, 3 Schottky bypass diodes
Cables	4.0mm² (12AWG), Positive(+)350mm, Negative(-)230mm (Connector Included)
Connector	Risen Twinsel PV-SY02, IP68