

**JOAQUIN MIRANDA HERRERA**

**Diseño de una hidrogenera para repostar H2 a Camiones,  
Autobuses y VL, mediante equipos comerciales**

**Dirigido por el Dr. Joaquin Andres Rodriguez Carabias**

**Màster en Enginyeria Industrial**



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

**Tarragona**

**2023**

## Índice

1.	Introducción.....	3
1.1.	Antecedentes y justificación del estudio .....	4
1.2.	Objetivos del trabajo .....	9
1.3.	Metodología utilizada.....	10
1.3.1.	Descripción de los pasos seguidos en la metodología.....	10
1.3.2.	Descripción de las variables utilizadas en la metodología .....	10
1.3.3.	Criterios de funcionamiento de la estación .....	11
2.	Diseño y dimensionamiento de la estación de repostaje .....	12
2.1.1.	Definición del perfil demanda.....	12
2.1.2.	Definición del volumen de Hidrógeno en cada repostaje.....	15
2.1.3.	Determinación de la presión inicial de los depósitos: .....	16
2.1.4.	Definición del repostaje .....	17
2.1.5.	Cálculo de las etapas de repostaje .....	17
2.1.6.	Perfil de carga final .....	18
2.2.	Dimensionamiento del sistema de almacenaje.....	19
2.2.1.	Consideraciones del calculo .....	19
2.2.2.	Sistema de media presión [300 Bar].....	19
2.2.3.	Sistema de alta presión [500 Bar].....	22
2.3.	Dimensionado del sistema de producción .....	24
2.4.	Dimensionamiento del sistema de reserva .....	28
2.4.1.	Cálculo neto de necesidades de Hidrógeno .....	28
2.4.2.	Sistema de media presión.....	29
2.4.3.	<b>Sistema de alta presión.....</b>	<b>30</b>
2.5.	Selección de las tecnologías de producción y almacenamiento .....	31
2.5.1.	Selección de las tecnologías de producción .....	32
2.5.2.	Selección de la tecnología de almacenaje .....	34
2.6.	Selección de equipos y componentes de la estación de repostaje. ....	35
2.6.1.	Electrolizador .....	36
2.6.2.	Sistema de almacenaje 30 bar .....	38
2.6.3.	Sistema de compresión de alta presión.....	39
2.6.4.	Depósitos de alta presión.....	40
2.6.5.	Sistema de repostaje .....	41
2.7.	Sistema completo .....	43
2.8.	Definición de los sistemas auxiliares de la estación de repostaje .....	45
2.8.1.	Sistema de aguas .....	45
2.8.2.	Sistema de control integral de la estación de repostaje .....	50

---

2.8.3.	Sistema de seguridad de la estación de repostaje .....	52
3.	Estudio energético de los componentes principales de la estación.....	53
3.1.	Análisis de equipos y consumos.....	53
3.2.	Sistema de back up eléctrico .....	55
3.2.1.	Componentes del sistema de Back Up .....	56
3.2.2.	Dimensionamiento del sistema de Back Up.....	57
3.2.3.	Selección del equipo de fuel cell y dimensionamiento del consumo .....	58
4.	Reducción de emisión de contaminantes.....	60
4.1.	Conversión de demanda .....	60
4.2.	Ahorro de emisiones.....	61
5.	Análisis de costes .....	63
5.1.	Recopilación de equipos.....	63
5.2.	Análisis de costes directos.....	64
5.3.	Análisis de costes generales de la estación .....	65
5.4.	Viabilidad económica.....	65
5.4.1.	Coste por recarga.....	65
5.4.2.	Comparación con un vehículo diésel.....	68
5.4.3.	VAN y TIR .....	68
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	70
6.1.	Conclusiones .....	70
6.2.	Recomendaciones.....	71
7.	Bibliografía.....	72
8.	Anexos.....	74
8.1.	Cálculo del Gráfico de Distribución.....	74
8.2.	Cálculo del factor de compresibilidad.....	77
9.	Índices .....	79
9.1.	Índice de tablas.....	79
9.2.	Índice de ilustraciones.....	80

## 1. Introducción

En este proyecto se busca mostrar el dimensionamiento real de una hidrogenera que se pueda implementar hoy en día con equipamiento y tecnología del mercado. Según el contexto actual y de acuerdo con las hojas de ruta del hidrógeno en España establecidas por el PNIEC y el FIT FOR FIFTYFIVE de la Unión Europea, es necesario construir y generar una red de estaciones de servicio para vehículos propulsados con hidrógeno. Estos documentos reflejan el cambio de paradigma en la energía actual que debe reorientarse desde el punto actual, basado en combustibles fósiles, hacia un futuro basado en energías limpias.

Este cambio de paradigma se basa en dos factores cruciales: la energía renovable y el hidrógeno. Es importante aclarar cómo se debe generar este nuevo paradigma energético. El objetivo final no es basar el modelo de consumo de combustibles en hidrógeno de varias procedencias, como la electrólisis o el reformado, sino que se utilice en todos los niveles como un elemento "verde" y un vector energético cuyo fin es agilizar y diversificar la forma de consumo de energía renovable.

Esto significa que la generación de hidrógeno con energía no renovable no es un hito en este nuevo ámbito. Los objetivos se basan en la instalación de grandes cantidades de energía renovable que puedan transformarse en hidrógeno para descarbonizar más sectores y eliminar problemas como la temporalidad o el "courtainment" de las redes eléctricas. En base a esto, se pretende hacer un cambio profundo en el paradigma energético, tal y como se establece en el principio de este párrafo. No se busca producir hidrógeno a cualquier costo, sino que se pretende utilizar el hidrógeno como un conductor de grandes cantidades de energía para derivarla a diferentes usos.

En este proyecto, se pretende determinar los costos y la estructura que debería seguir una estación de servicio basada en hidrógeno en el contexto actual. Este tipo de instalaciones aún son muy incipientes en el panorama actual, pero podemos ver modestos ejemplos que empiezan a aparecer en España mientras que empiezan a ser frecuentes en el resto de Europa y son una realidad en otros países más lejanos con economías basadas en otros modelos energéticos como Japón y Corea del Sur.

Se intentará definir, configurar, dimensionar y diseñar un modelo básico de hidrogenera. Es importante destacar que, debido a la incipiente del hidrógeno, estos proyectos contienen características no normalizadas y difíciles de estandarizar, como el gran consumo de energía que pueden suponer y las altas presiones con las que deben trabajar. La falta de una presión estandarizada para el hidrógeno en modalidad viaria complica aún más esta definición. Si bien se establece por consenso general que la mayoría de los vehículos pesados deberán funcionar a medias presiones, como los 300 bar, los primeros vehículos configurados para la venta al público funcionan con depósitos presurizados a 700 bar. Esta discrepancia provoca inestabilidad y confusión a la hora de establecer parámetros de diseño.

## **1.1. Antecedentes y justificación del estudio**

En la actualidad, nos encontramos en un momento de profundos cambios en cuanto a los valores de las diferentes generaciones, los modelos energéticos en los que se sustentan, el cambio climático y la evolución de la tecnología, incluyendo las IA como nueva revolución. Todo ello evidencia un cambio general de paradigma respecto a los antiguos modelos de funcionamiento.

En este trabajo, nos enfocaremos en la evolución del modelo energético y su impacto en la movilidad. Como se mencionó anteriormente, los objetivos actuales requieren un nuevo modelo energético que se base en la energía sostenible y la movilidad inteligente. Esta nueva movilidad recibirá una gran herencia de la antigua, pero debemos entender esta herencia como una serie de costumbres o comodidades adquiridas derivadas de la tecnología de combustibles fósiles que se deberán adaptar a las nuevas tecnologías o que el conjunto de la población deberá olvidar por incompatibilidad de las mismas. Por lo tanto, en este trabajo se pretende mostrar el funcionamiento real de una nueva estación de repostaje, con sus ventajas y limitaciones, con el fin de destacar tanto los pros como los contras de esta nueva tecnología en el ámbito de la movilidad.

Es importante tener en cuenta que no se pretende mostrar un ideal basado en una tecnología que deberá sustituirse o extinguirse, como es la de los combustibles fósiles, sino que se busca representar las ventajas y desventajas de la nueva tecnología que deberá sustituirla.

En relación con el contexto expuesto, es fácil encontrar datos sobre la generación de CO<sub>2</sub> y estudios relacionados con el cambio climático que muestran la incompatibilidad del consumo de elementos fósiles con un futuro sostenible. Además, debemos tener en cuenta la posición de potencias emergentes como China e India, que aumentarán exponencialmente su generación de dichos contaminantes siguiendo el camino de la industrialización que muchos países desarrollados ya han recorrido. Esto acentúa la necesidad de desarrollar un camino alternativo y sostenible que agilice la evolución hacia una meta ya definida, energética y medioambientalmente viable.

Estas necesidades quedan reflejadas en la voluntad política de España y la unión europea haciendo de la transición energética, acentuada por los recientes eventos post-COVID, de uno de los principales focos y prioridades de gobierno para las próximas décadas.

Los principales objetivos derivados de estas políticas son los siguientes:

- Fomentar el uso de energía renovable
- Fomentar la eficiencia energética
- Fomentar la Movilidad sostenible
- Implementar la Independencia energética
- Implementar el almacenamiento de energía en las redes eléctricas
- La digitalización

Todos estos puntos se pretenden implementar mediante una política de definición de objetivos, cooperación y ayudas de financiamiento e inversión para todos los países de la unión.

España en este contexto ha establecido de estas políticas una prioridad y las ha adoptado como una oportunidad de crecimiento que juntamente con su privilegiada posición geográfica y previa estructura industrial la hacen uno de los grandes puntos de incidencia de estas nuevas tecnologías ya no solo en la unión europea sino también a nivel mundial.

Podemos ver las políticas y estrategias promovidas que lo reflejan:

### **España:**

- Plan Nacional integrador de energía y clima: Este plan establece una hoja de ruta para la transición energética en España, con el objetivo de alcanzar una economía baja en carbono y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 23% para 2030. Incluye medidas para el fomento de la energía renovable, la eficiencia energética, la movilidad sostenible y la digitalización del sistema energético.
- Estrategia de Movilidad Segura, Sostenible y Conectada 2030: Esta estrategia busca promover la movilidad sostenible en España, con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte en un 90% para 2050. Incluye medidas para el fomento del transporte público, la electrificación del transporte y la promoción de una conducción más eficiente.
- Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030: Este plan establece medidas para adaptar la economía española a los efectos del cambio climático, como la subida del nivel del mar o la desertificación. Incluye medidas para el fomento de la resiliencia climática en diferentes sectores, como la agricultura, la salud o el turismo.

### **Unión Europea:**

- Pacto Verde Europeo: El Pacto Verde es la hoja de ruta de la Unión Europea para alcanzar la neutralidad climática en 2050. Incluye medidas para el fomento de la energía renovable, la eficiencia energética, la movilidad sostenible, la economía circular y la restauración de la biodiversidad.
- Plan de Recuperación para Europa: Este plan establece un marco de recuperación económica tras la crisis del COVID-19 y se centra en la transición verde y digital. Incluye un fondo de recuperación de 750.000 millones de euros, que se destinará a proyectos que promuevan la transición energética y la digitalización.
- Estrategia de Movilidad Sostenible: Esta estrategia busca promover la movilidad sostenible y la digitalización del transporte en Europa, con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte en un 90% para 2050. Incluye medidas para el fomento del transporte público, la electrificación del transporte y la promoción de una conducción más eficiente.

El plan Fit for Fiftyfive como respuesta directa a la emergencia climática de la UE:

Este plan es un conjunto de medidas legislativas cuyo fin es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la unión europea hasta un mínimo de un 55% en el año 2030.

Los principales puntos de actuación que incluye el plan son los siguientes:

- Reducir las emisiones de los vehículos
- Establecer un umbral mínimo de un 40% de energía renovable en el total energético producido por la unión.
- Establece y amplía un sistema de comercio de emisiones
- Mejora de la eficiencia energética
- Objetivos para el desarrollo del Hidrógeno y combustibles verdes alternativos

En referencia a la parte que nos incumbe en este proyecto, el Hidrógeno es mencionado con notable importancia en muchos de estos planes, siendo para el caso de España de especial interés la mención que se hace en el PNIEC sobre la capacidad instalada de 4GW de electrolizadores para el año 2030, meta que una vez establecida y fijada ha sido reconocida por el gobierno Español como poco ambiciosa.

Por ello entendemos que la capacidad de producción de Hidrógeno será mayor que la establecida por el plan, teniendo en cuenta que este se estableció antes de la guerra de Ucrania y la crisis energética, muchas de sus metas energéticas quedaron como poco ambiciosas y deberán ser sobrepasadas notablemente en los años venideros.

En este ámbito resulta fundamental reevaluar el potencial real que tendrá el Hidrógeno en la transición energética en los próximos años y como este está destinado a contribuir en los diferentes objetivos de transición energética, movilidad y descarbonización.

El Hidrógeno está destinado a tener un papel prioritario en el almacenamiento, la independencia energética y la descarbonización como sectores clave como son la industria pesada y la movilidad.

En este sentido, se han desarrollado las primeras redes de hidrogeneras y se han presentado diferentes usos innovadores en cuanto a almacenamiento energético y re-electrificación, como se puede apreciar en los siguientes documentos:

- "Estrategia a largo plazo para una economía española moderna, competitiva y climáticamente neutra en 2050" del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
- "Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030" del Gobierno de España.
- "Estrategia Europea del Hidrógeno" de la Comisión Europea.
- "Hydrogen Roadmap Europe: A sustainable pathway for the European Energy Transition" de la Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking.

Tanto el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 del gobierno español como el Pacto Verde Europeo y la Estrategia de Movilidad Sostenible e Inteligente de la Unión Europea, hacen referencia a la transición energética y al hidrógeno como una de las tecnologías clave para la descarbonización de la economía.

En el caso del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 de España, se establece el objetivo de alcanzar una penetración del hidrógeno renovable en el consumo final de energía de entre el 2% y el 4% en 2030. Para ello, se promoverá el desarrollo de proyectos de producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno renovable, y se incentivará su uso en sectores como la industria, el transporte o la generación eléctrica.

Por su parte, el Pacto Verde Europeo de la Unión Europea establece el objetivo de convertir al hidrógeno en una fuente de energía clave para la descarbonización de la economía europea. Se prevé una inversión de 470.000 millones de euros en proyectos de hidrógeno renovable para 2050, con el objetivo de alcanzar una capacidad de producción de hidrógeno renovable de 10 millones de toneladas para ese mismo año.

En la Estrategia de Movilidad Sostenible e Inteligente de la Unión Europea se hace referencia al hidrógeno como una tecnología clave para la descarbonización del transporte, en particular para vehículos pesados y largas distancias. Se establece el objetivo de contar con al menos 40.000 estaciones de hidrógeno para 2030 y de desarrollar un mercado europeo de hidrógeno renovable.

En conclusión, tanto España como la Unión Europea han identificado al hidrógeno renovable como una tecnología clave para la transición energética y la descarbonización de la economía, y han establecido objetivos y planes de acción para su desarrollo y uso en diferentes sectores.

Comprobada la importancia del Hidrógeno en la transición energética y el futuro inminente de las redes energéticas y de movilidad de nuestro entorno es de primordial importancia revisar las diferentes tecnologías que implicaran su producción y uso a gran escala:

Las tecnologías de producción de Hidrógeno más prometedoras y que se encuentran alineadas con objetivos medioambientales son las siguientes:

- Electrolisis del agua: Siempre a partir de energía renovable
- A partir de biomasa: Gasificación o fermentación de biomasa
- Gasificación del carbón: con captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>
- A partir de Biometano: como producto secundario o a través de reformado

En España y Europa tiene especial importancia la electrolisis como vía directa de asociación entre la energía renovable y el Hidrógeno la electrolisis, eso no descarta las demás alternativas siendo de estas la gasificación del carbón con CCU la más desaconsejable medioambientalmente y la formación a partir de biometano la más incipiente.

Definida las diferentes formas de generación de Hidrógeno y su relación con el texto político, es necesario estipular su importancia como elemento combustible o vector energético.

Actualmente el Hidrógeno es la base de producción de la industria de fertilizantes y un componente común en la industria química y metalúrgica general, por ello en esta fase incipiente, estos son los primeros usos del Hidrógeno que se trata de descarbonizar e implementar con tecnología Verde. Esta voluntad se puede ver en las convocatorias de los dos últimos PERTES del gobierno español de proyectos pioneros y singulares.

Paralelamente se fundamenten tecnológicamente otros usos derivados del Hidrógeno:

- Transporte: El hidrógeno se puede utilizar como combustible en vehículos de hidrógeno para propulsar motores eléctricos.
- Procesamiento de alimentos: El hidrógeno se utiliza en la hidrogenación de aceites y grasas.
- Fabricación de electrónica: El hidrógeno se utiliza en la fabricación de semiconductores y otros componentes electrónicos.

En este proyecto, nos centraremos en la aplicación concreta del uso de Hidrógeno como combustible para la movilidad, pero esta misma aplicación tiene derivados muy interesante y relevantes como son la re-electrificación estacionaria pesada, y su utilización como combustible en vehículos agrarios y redes aisladas.

Finalmente se siguen desarrollando aplicaciones para el Hidrógeno o sus derivados que podrían suponer un incremento de su importancia en el futuro del planeta, algunas de sus aplicaciones más prometedoras son las siguientes:

- Combustible para aviación: formato líquido o a través de subproductos
- Combustible para transporte marítimo: Formato líquido o Amoniaco
- Almacenamiento energético a gran escala

Para la aplicación escogida en este proyecto el Hidrógeno es un elemento que representa muchas ventajas como son su trasfondo renovable y su maleabilidad, pero también representa un desafío industrial y tecnológico en cuanto al desarrollo de redes a gran escala y su consumo energético.

El Hidrógeno también representa un reto en cuanto a formato heredado, en el contexto de combustible para movilidad, tiende a compararse o presentarse como el sucesor directo de los combustible fósiles y es necesario un gran ejercicio de pedagogía para presentarlo con todas sus ventajas pero también sus desventajas, como el elevado precio de los vehículos y la tecnología en el estado actual y la limitación que supone su almacenaje y producción en ubicaciones urbanas o semi urbanas como las que se trataran en este proyecto.

La creación de una red de estaciones de servicio de Hidrógeno supone un gran desafío debido a dos factores principales: el propio Hidrógeno y su tecnología, y el cambio de fisonomía de la movilidad en las grandes urbes y su relación con la movilidad eléctrica.

La movilidad eléctrica se presenta como el gran e inmediato subtitulo de la actual movilidad y es sin duda una solución eficaz y realista en grandes ciudades con muchos impedimentos y restricciones a la movilidad, así como en las distancias cortas.

En cambio, en su uso en la movilidad pesada y las grandes distancias se enfrenta a muchos obstáculos alguno, tecnológicamente difíciles de sobrellevar. La lentitud de carga de las grandes baterías, su peso y dificultad de interconexión eléctrica de gran potencia en algunas zonas genera una tecnología difícil de presentar como sustituta de los actuales combustibles en la movilidad pesada o de grandes distancias.

En esos mismos ámbitos es donde el Hidrógeno se presenta como una alternativa segura desde estas incipientes, si bien la producción de Hidrógeno requiere de la interconexión eléctrica de gran potencia o la ubicación de puntos de producción de energía renovable dedicados estos pueden ser solventados transportando el Hidrógeno como mismo vector o bien generándolo en las mismas estaciones a partir de dichas fuentes de energía renovable.

Así mismo el tiempo de carga de vehículos de Hidrógeno es mucho menor al eléctrico y presenta un formato ya familiar para los conductores.

El principal reto que se presenta al Hidrógeno en este ámbito es la falta o poca disponibilidad de almacenaje, si bien es posible tener una cantidad de Hidrógeno que se genera horariamente y un depósito de almacenaje notable es previsible que en situaciones de sobre uso las estaciones deban para de repostar por falta de materia prima ya que esta debe regenerarse.

Esto supone un cambio de formato importante respecto a los grandes depósitos de combustible para abastecer a nuestro vehículo a los que estamos acostumbrados y la practica infinidad de disponibilidad de energía eléctrica que presenta un punto de repostaje de vehículo eléctrico.

En conclusión, el Hidrógeno se presenta como una alternativa viable en ámbitos de movilidad, pero aún hay retos que solventar y desafíos a los que la tecnología debe enfrentarse, algunos de ellos se verán reflejados en este proyecto y otros deberán suponer un cambio de mentalidad o redefinición futura de las tecnologías.

## **1.2. Objetivos del trabajo**

El objetivo general de este proyecto es el dimensionamiento de una estación de servicio de Hidrógeno de 5MW de potencia con la tecnología y equipamiento actual que podemos encontrar en el mercado.

Los objetivos específicos que se pretenden conseguir son:

- Dimensionamiento numérico de la estación de repostaje
- Evaluación económica de los costos de inversión de la estación de repostaje
- Seleccionar y especificar los equipos necesarios para la implementación de la estación, incluyendo sistemas de almacenamiento y distribución de hidrógeno.
- Identificar y resolver problemas específicos de las estaciones de repostaje con Hidrógeno.
- Establecer una distribución de carga realista de vehículos basada en datos reales de demanda en estaciones de servicio
- Analizar los impactos ambientales de la estación de repostaje, midiendo la reducción de gases de efecto invernadero y otros contaminantes.

### **1.3. Metodología utilizada**

En este proyecto se utilizará una metodología basada en análisis de ingeniería y evaluación económica para el dimensionamiento de una estación de servicio de hidrógeno.

#### **1.3.1. Descripción de los pasos seguidos en la metodología**

- Fijación de un tamaño de potencia de electrolisis para la estación de repostaje: Se determinará una cantidad base de Hidrógeno a producir y la demanda que es posible dar salida con ella
- Determinación de la capacidad de hidrógeno generable: Una vez establecido el tamaño de la estación, se determinará la capacidad de producción de hidrógeno que se necesita para satisfacer la demanda prevista. Se evaluarán diferentes tecnologías de producción de hidrógeno, como la electrólisis del agua, y se seleccionará la más adecuada en función de los requisitos de la estación y los recursos energéticos disponibles.
- Análisis de distribución de la demanda de hidrógeno horaria: Se llevará a cabo un análisis de la demanda de hidrógeno a lo largo del día para determinar los patrones de uso y establecer un plan de distribución de carga que asegure una distribución equilibrada y eficiente de los recursos.
- Diseño de la estación: Con base en la demanda prevista y la capacidad de producción de hidrógeno, se diseñará la estación, dimensionando los principales componentes, como el sistema de almacenamiento de hidrógeno, el equipo de compresión, el sistema de refrigeración y el sistema de dispensación.
- Diseño de elementos auxiliares: Además de los componentes principales, se diseñarán los elementos auxiliares necesarios para el funcionamiento de la estación, como sistemas de seguridad y emergencia, sistemas de control y monitoreo y sistemas de tratamiento de agua.
- Evaluación económica: Finalmente, se realizará una evaluación económica de la estación de servicio de hidrógeno, incluyendo los costos de inversión y los costos operativos, para la situación financiera de esta tipología de proyectos a partir de la que se pueda elaborar un plan financiero viable.

#### **1.3.2. Descripción de las variables utilizadas en la metodología**

- Demanda de Hidrógeno
- Suministro de Hidrógeno
- Tamaño del almacenamiento
- Sistemas de compresión
- Equipo de dispensación
- Sistemas de almacenaje
- Sistema de refrigeración
- Sistema de Back up
- Costos de inversión
- Costos de operación

### **1.3.3. Criterios de funcionamiento de la estación**

- Capacidad de repostaje fija
- Reserva de H2 de 12 horas
- Reserva de Back Up eléctrico 12 horas
- Mínimo de 2 surtidores
- Presión de repostaje 350 Bar
- Capacidad para repostar transporte pesado

## 2. Diseño y dimensionamiento de la estación de repostaje

En este apartado se definirá técnicamente el dimensionamiento de la estación de repostaje, dicho dimensionamiento incluirá el análisis de tecnología, su elección, elección de los equipos industriales la definición de los parámetros de repostaje (producción, capacidad de suministro, etc.) y producción de la estación.

### 2.1.1. Definición del perfil demanda

Primero se debe establecer el perfil de demanda de Hidrógeno al que queremos dar salida en nuestra estación de repostaje.

Estos perfiles pueden ser muy variados según a que tipo de movilidad nos dirijamos y encontraremos perfiles de demanda específicos en determinados contextos.

En este proyecto el perfil de demanda lo extraeremos mediante un análisis de las medias de concurrencia encontradas en diferentes estaciones de repostaje en zonas industriales cercanas a Tarragona.

Estos perfiles de concurrencia son información abierta al público que facilitan las instalaciones a través de la información horaria proporcionada al consumidor por la plataforma Google Maps.

Google localiza el conjunto de personas o usuarios que usan un dispositivo con su plataforma de ubicación y documentan cuando este se encuentra en un establecimiento y nos facilita un perfil horario de concurrencia.

En este proyecto se han extraído dichos datos para un conjunto de estaciones de servicio de diferentes polígonos industriales de la zona de Tarragona.

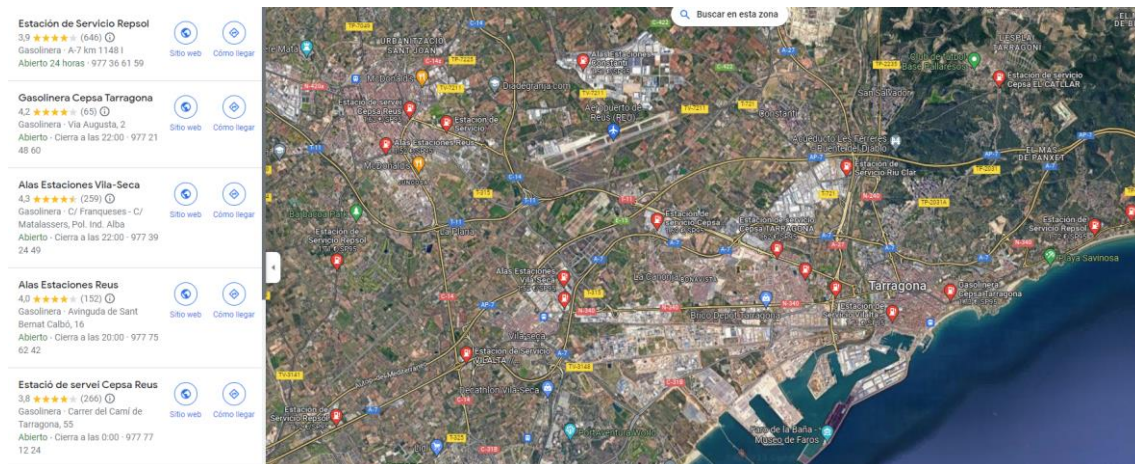


Ilustración 1: Imagen de las estaciones de repostaje del área de Tarragona y sus polígonos

De las cuales hemos podido extraer diferentes perfiles de concurrencia horarios:

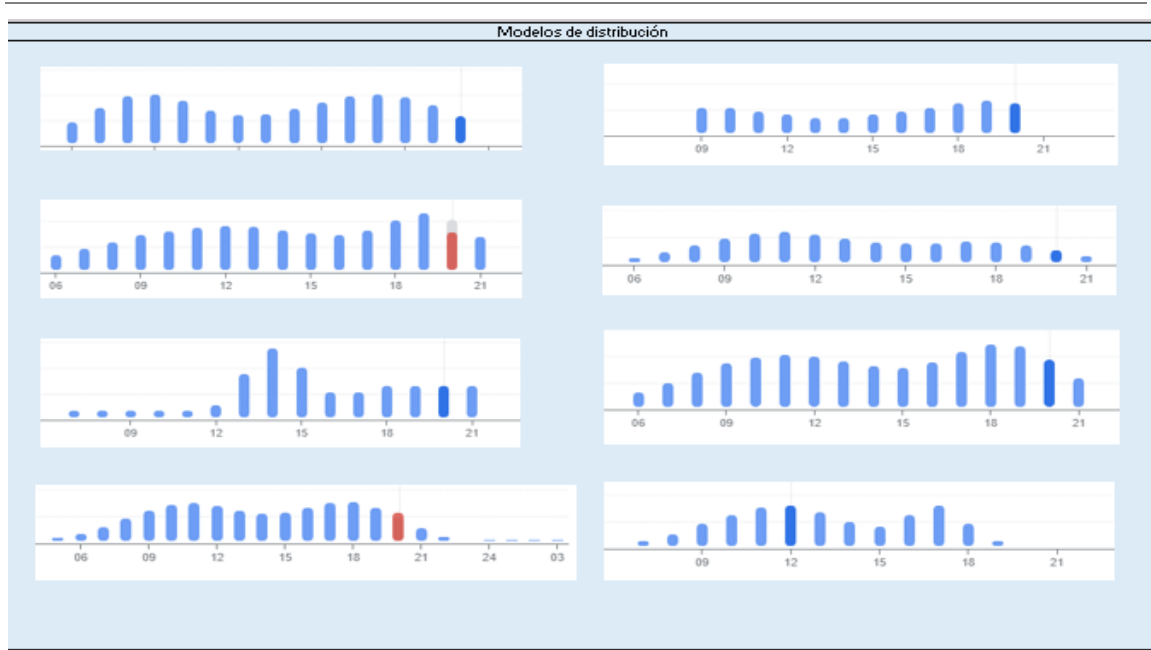


Ilustración 2: Perfiles de demanda extraídos de las estaciones de repostaje, mediante la información de Google

Utilizaremos estos perfiles para extraer un modelo “estándar” que podamos utilizar para cuantificar nuestra demanda horaria.

Para calcular dicho perfil se ha asignado a todas las estaciones anteriores un valor de 100 vehículos según los modelos de distribución de la Ilustración 2: Perfiles de demanda extraídos de las estaciones de repostaje, mediante la información de Google, sobre los cuales se ha realizado una media aritmética horaria. Esto permite establecer el perfil de consumo según porcentajes de demanda y ajustarlo para el número total de vehículos que concluyamos deberán repostar.



Ilustración 3: Perfil de repostaje modelo, realizado según el Anexo 8.1 Cálculo del gráfico de distribución

Este perfil se utilizará para calcular el número de vehículos a los que deberemos dar salida a fin de utilizar todo el Hidrógeno producido por el electrolizador que seleccionemos diariamente.

Juntamente con el perfil horario de demanda, debido que el Hidrógeno puede suministrarse en diferentes modalidades y para diferentes vehículos debemos también establecer el perfil de vehículo que utilizará nuestro consumidor, principalmente capacidad y presión de repostaje.

En este trabajo siguiendo la tendencia actual del Hidrógeno se entiende que las presiones de trabajo son una variable muy volátil y todavía no están normalizadas, por ello nos ceñiremos a las presiones que utilizan la mayoría de los vehículos de flota que podemos encontrar.

Definimos entonces un modelo de vehículo pesado estándar según un vehículo tipo:



Ilustración 4: Hyundai Xcient Fuel

El vehículo en cuestión es un camión de la marca Hyundai modelo Xcient, del que se han librado cientos de unidades y es uno de los primeros modelos utilizados a gran escala propulsado con Hidrógeno.

Las características de este vehículo juntamente con una autonomía de 400 km son:

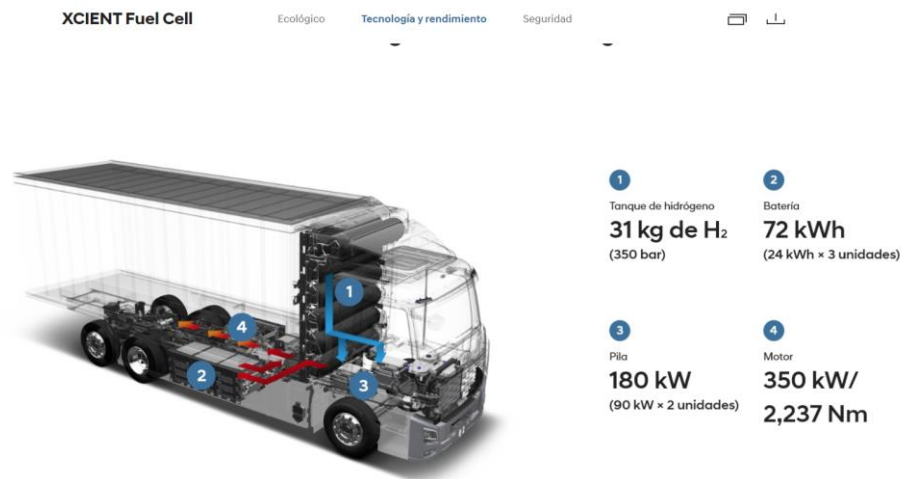


Ilustración 5: Características principales del Hyundai Xcient Fuel Cell

Este será el modelo utilizado para definir la demanda que tendremos en nuestra estación de repostaje, aunque una estación de estas características también podría suministrar Hidrógeno a una flota de vehículos Toyota Caetano, pues tienen una configuración muy similar a los modelos de Hyundai. Su única limitación sería suministrar Hidrógeno a vehículos con depósitos que funcionen a mayor presión, pues la estación sería incapaz de completar la carga total, esta se vería detenida a la presión a la que está diseñada los depósitos de estos vehículos (350 bar) sin completar la carga total de un depósito que funcione a una presión mayor.

Los vehículos que funcionan a mayor presión(700bar) son aquellos que en la actualidad tienen un uso de movilidad ligera de carácter privado, en el mercado actualmente solo podemos encontrar

los Hyundai Nexo y los Toyota Mirai. Estos vehículos siguen en completo desarrollo y solo son la base sobre la cual las marcas empiezan a experimentar y desarrollar sus flotas de Hidrógeno por lo que sus características aún son susceptibles de cambiar enormemente.

### 2.1.2. Definición del volumen de Hidrógeno en cada repostaje

Conocido el perfil de repostaje que al que debemos dar salida en nuestra estación fijamos ahora un volumen de vehículos diario a repostar que deberán seguir dicho perfil. Por ello decidimos que nuestra estación dará salida a un volumen diario de 71 vehículos, esto supondrá un total de 2200 kg de H2 por día o 800T de H2 por año.

Estos vehículos al encontrarse en la situación de repostaje no entraran con el depósito agotado totalmente, por ello, es necesario prever el volumen de Hidrógeno que estos contendrán en su depósito al inicio de la recarga.

Fijaremos dicho volumen en 4 kg de H2, en términos de autonomía de los vehículos utilizados en este proyecto este volumen de Hidrógeno es equivalente a 50 km.

El perfil de demanda obtenido mediante la superposición del perfil de repostaje y la cantidad de vehículos seleccionada será el establecido en la Tabla 1:

Tabla 1: Perfil de demanda numérico elaborado según los cálculos del anexo, apartado 8.1

Distribución	
Hora	Nº de vehículos [ud]
0:00:00	0
1:00:00	0
2:00:00	0
3:00:00	0
4:00:00	0
5:00:00	0
6:00:00	2
7:00:00	4
8:00:00	5
9:00:00	7
10:00:00	6
11:00:00	4
12:00:00	4
13:00:00	4
14:00:00	4
15:00:00	4
16:00:00	4
17:00:00	6
18:00:00	6
19:00:00	5
20:00:00	4
21:00:00	2
22:00:00	0

23:00:00

0

Es necesario en este punto detallar la recarga de los vehículos con precisión para determinar las necesidades posteriores de almacenamiento, compresión y producción de Hidrógeno.

Hemos tipificado que la recarga de los vehículos se dará con 4 kg de H2 por lo que será necesario recargar un total de 27kg de H2 en cada vehículo.

Deberemos ahora analizar los detalles de la recarga de vehículo partiendo de su volumen, presión inicial, e Hidrógeno recibido de los diferentes sistemas.

### **Búsqueda del volumen del depósito:**

A fin de realizar los diferentes cálculos debemos conocer el volumen real del depósito de los vehículos estudiados:

Fijamos:  $T_{ref}=25\text{ °C}$

$$V[m^3] = \frac{zn[mol]R\left[\frac{J}{mol} \cdot K\right]T[K]}{P[Bar]}$$

Donde:

$z_{350Bar} = 1,21936$  (Presión del Depósito completo)

$P = 350\text{ Bar}$

$$R = 8,314462 \left[ \frac{J}{mol} \cdot K \right]$$

$n = 31\text{kg de H}_2 = 15376,9\text{ Moles de H}_2$

Aplicamos la relación y obtenemos un volumen de depósito:

$[V = 1.33\text{ m}^3\text{ de depósito en los vehículos}]$

### **2.1.3. Determinación de la presión inicial de los depósitos:**

Debido a que anteriormente hemos fijado una cantidad determinada de Hidrógeno a la llegada de los vehículos a la estación de repostaje, significa que debemos conocer el estado de presión inicial de dichos depósitos para determinar la configuración del formato de recarga de Hidrógeno.

Utilizaremos la relación:

$$P[Bar] = \frac{zn[mol]R\left[\frac{J}{mol} \cdot K\right]T[K]}{V[m^3]}$$

Donde:

$T = T_{REF} = 298,16\text{ K}$

$z_{30Bar} = 1,02$  (Presión del depósito iterada)

$n = 4\text{ kg de H}_2 = 1984,1\text{ Moles de H}_2$

$$R = 8,314462 \left[ \frac{J}{mol} \cdot K \right]$$

$$V = 1,33 \text{ m}^3$$

Aplicamos la relación y obtenemos la presión del depósito a la llegada en la estación de repostaje:

$$[P = 37,88 \text{ Bar Al inicio del repostaje}]$$

Una vez son conocidas las condiciones del depósito calculamos la cantidad de Hidrógeno que recibirá de cada uno de los depósitos presurizados de nuestra instalación.

#### 2.1.4. Definición del repostaje

La metodología de recarga de los vehículos de Hidrógeno es mediante la cascada de presión, esto significa que se conectan dos elementos a presiones diferentes y se deja que la presión se iguale entre ambos, por ello hay que definir primero las presiones de recarga.

Utilizaremos para la recarga de los vehículos dos depósitos de Hidrógeno de 300 y 500 Bar respectivamente, asignamos una  $\Delta P$  mínima de la recarga entre depósito de repostaje y vehículo de 25 Bares.

Fijamos las condiciones de repostaje por depósito con las siguientes condiciones de presión:

- Depósito de 300 Bar: Hasta 175 Bar en el depósito del vehículo, con una presión mínimo en depósito de repostaje de 200 Bar.
- Depósito de 500 Bar: Hasta 350 Bar en el depósito del vehículo, con una presión mínima en depósito de repostaje de 375 Bar.

#### 2.1.5. Cálculo de las etapas de repostaje

Fijamos de acuerdo con la definición anterior que cargaremos el depósito del vehículo hasta 175 Bar mediante el depósito de baja presión.

Buscamos la cantidad de Hidrógeno (kg) que provendrán de este equipamiento y equivale a dicha presión.

Utilizaremos la relación:

$$n = \frac{P[\text{Bar}]V[\text{m}^3]}{zR \left[ \frac{J}{mol} \cdot K \right] \cdot T}$$

Donde:

$$T = T_{REF} = 298,16 \text{ K}$$

$$R = 8,314462 \left[ \frac{J}{mol} \cdot K \right]$$

$$z_{175\text{Bar}} = 1,02 \text{ (Presión del depósito iterada)}$$

$$P = 175 \text{ Bar}$$

$$V = 1,33 \text{ m}^3$$

Obtenemos la cantidad de Hidrógeno que podremos repostar del depósito de 300 Bar.

[ $n \approx 17 \text{ kg}$  cuando el depósito llegue a 175Bar]

De los cuales 4 kg pertenecen a la reserva que llevaba el vehículo a la llegada a la estación.

Por lo que se cargará 13 kg del depósito de 300 Bar, el resto del depósito, 14 kg de Hidrógeno deberán cargarse del depósito de 500 Bar.

La definición final de carga será:

- 4 kg en la reserva del vehículo a la llegada
- 13 kg de Hidrógeno del depósito de 300 Bar
- 14 kg de Hidrógeno del depósito de 500 Bar

### 2.1.6. Perfil de carga final

Conociendo la cantidad de Hidrógeno que aportamos con cada depósito y el perfil horario de demanda podemos obtener el perfil horario detallado de aportación de Hidrógeno y su proveniencia por depósito presurizado.

Tabla 2: Datos del perfil de carga y proveniencia de cada kg de Hidrógeno

Distribución		Hidrógeno para aportar		
Hora	Vehículos [ud]	Hidrógeno total a aportar [kg]	Depósito 300 Bar [kg]	Depósito 500 Bar [kg]
0:00:00	0	0	0	0
1:00:00	0	0	0	0
2:00:00	0	0	0	0
3:00:00	0	0	0	0
4:00:00	0	0	0	0
5:00:00	0	0	0	0
6:00:00	2	54	26	28
7:00:00	4	108	52	56
8:00:00	5	135	65	70
9:00:00	7	189	91	98
10:00:00	6	162	78	84
11:00:00	4	108	52	56
12:00:00	4	108	52	56
13:00:00	4	108	52	56
14:00:00	4	108	52	56
15:00:00	4	108	52	56
16:00:00	4	108	52	56
17:00:00	6	162	78	84
18:00:00	6	162	78	84
19:00:00	5	135	65	70

<b>20:00:00</b>	4	108	52	56
<b>21:00:00</b>	2	54	26	28
<b>22:00:00</b>	0	0	0	0
<b>23:00:00</b>	0	0	0	0

A partir de este perfil de necesidades de Hidrógeno se dimensionará el sistema de compresores y el tamaño de depósitos necesario para llevar a cabo las operaciones de recarga de Hidrógeno.

## 2.2. Dimensionamiento del sistema de almacenaje

En este apartado se dimensionará el sistema de almacenaje y compresión necesario para proveer el Hidrógeno que requiere la recarga de vehículos.

El sistema de almacenaje y compresión consta de dos compresores que tomaran Hidrógeno de un depósito de baja presión y alimentaran a su vez el Hidrógeno en los depósitos de media [300 Bar] y alta [500 Bar] presión.

### 2.2.1. Consideraciones del calculo

A fin de dimensionar este sistema hay que tener en cuenta las capacidades de los depósitos, los compresores y finalmente las presiones mínimas admisibles de cada Depósito definidas en el punto anterior Definición del repostaje.

- Depósito de 300 Bar: Presión mínima en depósito de repostaje de 200 Bar.
- Depósito de 500 Bar: Presión mínima en depósito de repostaje de 375 Bar.

### 2.2.2. Sistema de media presión [300 Bar]

Primero definimos los equipos de media presión y su comportamiento.

Este sistema constara de:

- Depósito de 350 kg de H2 a 300 Bar
- Compresor de Hidrógeno 30 a 300 Bar, con un caudal nominal de 60 kg de H2 por hora.

A partir de la tabla de necesidades de Hidrógeno a 300 Bar definidas en la Tabla 2 obtenida en el apartado anterior, dimensionamos el funcionamiento del sistema.

Este sistema funciona con la consideración adicional de que se encuentra siempre cargado en el momento de puesta en marcha de la estación de repostaje, y se simulara su funcionamiento mediante el programa de cálculo Excel para el perfil de cargas diarias:

Tabla 3: Movimiento horario del Hidrógeno desde el depósito de 300 Bar hasta el surtidor

Hora	Hidrógeno proporcionado por el surtidor [kg]	Estado de carga del depósito de media presión 300 bar [kg]	Compresor [kg]
Dia 1			
<b>0:00:00</b>	0	350	0

<b>1:00:00</b>	0	350	0
<b>2:00:00</b>	0	350	0
<b>3:00:00</b>	0	350	0
<b>4:00:00</b>	0	350	0
<b>5:00:00</b>	0	350	0
<b>6:00:00</b>	26	350	0
<b>7:00:00</b>	52	324	26
<b>8:00:00</b>	65	298	52
<b>9:00:00</b>	91	285	60
<b>10:00:00</b>	78	254	60
<b>11:00:00</b>	52	236	60
<b>12:00:00</b>	52	244	60
<b>13:00:00</b>	52	252	60
<b>14:00:00</b>	52	260	60
<b>15:00:00</b>	52	268	60
<b>16:00:00</b>	52	276	60
<b>17:00:00</b>	78	284	60
<b>18:00:00</b>	78	266	60
<b>19:00:00</b>	65	248	60
<b>20:00:00</b>	52	243	60
<b>21:00:00</b>	26	251	60
<b>22:00:00</b>	0	285	60
<b>23:00:00</b>	0	345	5

Podemos ver que el sistema es capaz de suplir y reabastecer todo el Hidrógeno que requiere la estación de repostaje para el depósito de media presión.

### Comprobación de las presiones de funcionamiento del sistema de 300 Bar

Si bien queda descrito el funcionamiento del sistema respecto al flujo de masas de Hidrógeno, ahora debemos comprobar que se cumpla la condición de presiones establecida.

- Pmin del sistema será igual o superior a 200 Bar.

Para ello aplicaremos la siguiente ecuación.

$$P[\text{Bar}] = \frac{zn[\text{mol}]R \left[ \frac{J}{\text{mol} \cdot K} \right] T[\text{K}]}{V[\text{m}^3]}$$

Para utilizar esta ecuación en nuestro sistema con presiones variables primero deberemos fijar el volumen del depósito de Hidrógeno, esto se realizará calculando el volumen para el estado de presión máxima del sistema 300 Bar.

Utilizaremos la expresión superior donde todas las variables excepto el volumen son conocidas:

$$T = T_{REF} = 298,16 \text{ K}$$

$$R = 8,314462 \left[ \frac{J}{mol} \cdot K \right]$$

$$z_{300Bar} = 1,18$$

$$P = 300 \text{ Bar}$$

$$n = 350kg$$

**Obtendremos un volumen de depósito de 17 m<sup>3</sup>.**

Una vez conocido el volumen de nuestro sistema deberemos calcular las presiones para cada estadio horario del depósito, hay que remarcar que para poder calcular dichas presiones es necesario iterar el sistema para el valor correcto de  $z$ <sup>1</sup> en cada franja horaria (esto se realiza mediante el programa de cálculo Excel).

Una vez iterado el sistema obtendremos las presiones reales para cada franja horaria del depósito de media presión [300 Bar].

*Tabla 4: Evolución horaria de la presión en el depósito de 300 Bar*

<b>Hora</b>	<b>Presión [Bar]</b>
<b>0:00:00</b>	299,51
<b>1:00:00</b>	299,51
<b>2:00:00</b>	299,51
<b>3:00:00</b>	299,51
<b>4:00:00</b>	299,51
<b>5:00:00</b>	299,51
<b>6:00:00</b>	299,51
<b>7:00:00</b>	274,54
<b>8:00:00</b>	250,01
<b>9:00:00</b>	237,91
<b>10:00:00</b>	209,48
<b>11:00:00</b>	198,27
<b>12:00:00</b>	200,45
<b>13:00:00</b>	207,67
<b>14:00:00</b>	214,94
<b>15:00:00</b>	222,24
<b>16:00:00</b>	229,59
<b>17:00:00</b>	236,98
<b>18:00:00</b>	220,41
<b>19:00:00</b>	204,05
<b>20:00:00</b>	199,55
<b>21:00:00</b>	206,77
<b>22:00:00</b>	237,91

<sup>1</sup> Se adjunta un anexo de cálculo de la variable  $z$  y sus interpolaciones

<b>23:00:00</b>	294,68
-----------------	--------

Comprobamos que la presión mínima del sistema es de 198,27 Bar y la máxima de 299,51 Bar. **Podemos establecer que este sistema es viable y cumple con las condiciones de presión mínimas**, de no ser así sería necesario recalcular el sistema para diferentes valores de caudal de compresión y volumen de depósito.

### 2.2.3. Sistema de alta presión [500 Bar]

Repetiremos el proceso de cálculo para el sistema de alta presión [500 Bar] ya que tienen una composición y funcionamiento casi idénticas.

Este sistema constará de:

- Depósito de 550 kg de H2 a 500 Bar
- Compresor de Hidrógeno 30 a 500 Bar, con un caudal nominal de 65 kg de H2 por hora.

A partir de la tabla de necesidades de Hidrógeno a 500 obtenida en el apartado anterior dimensionamos el funcionamiento del sistema.

Este sistema funciona con la consideración adicional de que se encuentra siempre cargado en el momento de puesta en marcha de la estación de repostaje, se simula para las cargas horarias.

Tabla 5: Movimiento horario del Hidrógeno desde el depósito de 500 Bar hasta el surtidor

Hora	Hidrógeno proporcionado al surtidor [kg]	Estado de carga del depósito de media presión 500 bar [kg]	Compresor [kg]
Dia 1			
<b>0:00:00</b>	0	550	0
<b>1:00:00</b>	0	550	0
<b>2:00:00</b>	0	550	0
<b>3:00:00</b>	0	550	0
<b>4:00:00</b>	0	550	0
<b>5:00:00</b>	0	550	0
<b>6:00:00</b>	28	550	0
<b>7:00:00</b>	56	522	28
<b>8:00:00</b>	70	494	56
<b>9:00:00</b>	98	480	65
<b>10:00:00</b>	84	447	65
<b>11:00:00</b>	56	428	65
<b>12:00:00</b>	56	437	65
<b>13:00:00</b>	56	446	65
<b>14:00:00</b>	56	455	65
<b>15:00:00</b>	56	464	65
<b>16:00:00</b>	56	473	65
<b>17:00:00</b>	84	482	65
<b>18:00:00</b>	84	463	65
<b>19:00:00</b>	70	444	65

<b>20:00:00</b>	56	439	65
<b>21:00:00</b>	28	448	65
<b>22:00:00</b>	0	485	65
<b>23:00:00</b>	0	550	0

Podemos ver que el sistema es capaz de suplir todo el Hidrógeno que requiere la estación de repostaje para esta presión.

### Comprobación de las presiones de funcionamiento del sistema de 500 Bar

Si bien queda descrito el funcionamiento del sistema respecto al flujo de masas de Hidrógeno, ahora debemos comprobar que se cumpla la condición de presiones establecida anteriormente.

- P<sub>min</sub> del sistema será igual o superior a 375 Bar.

Para ello deberemos aplicaremos la siguiente ecuación:

$$P[\text{Bar}] = \frac{zn[\text{mol}]R \left[ \frac{J}{\text{mol}} \cdot K \right] T[\text{K}]}{V[\text{m}^3]}$$

Para utilizar esta ecuación en nuestro sistema con presiones variables primero deberemos fijar el volumen del depósito de Hidrógeno, esto se realizará calculando el volumen necesario para la presión máxima del sistema 500 Bar.

Donde:

$$T = T_{REF} = 298,16K$$

$$z_{500Bar} = 1,31784 \text{ (Presión del depósito iterada)}$$

$$P = 500 \text{ Bar}$$

$$R = 8,314462 \left[ \frac{J}{\text{mol}} \cdot K \right]$$

$$n = 550kg$$

**Obtendremos un volumen de depósito de 17 m<sup>3</sup>.**

Una vez conocido el volumen de nuestro sistema deberemos calcular las presiones para cada estadio horario del depósito, hay que remarcar que para poder calcular dichas presiones es necesario iterar el sistema para el valor correcto de z en cada franja horaria (esto se realiza mediante el programa de cálculo Excel).

Una vez iterado el sistema obtendremos las presiones reales para cada franja horaria del depósito de media presión [500 Bar].

Tabla 6: Evolución de la presión Horaria en el depósito de 500 Bar

<b>Hora</b>	<b>Presión [Bar]</b>
<b>0:00:00</b>	498,08
<b>1:00:00</b>	498,08

<b>2:00:00</b>	498,08
<b>3:00:00</b>	498,08
<b>4:00:00</b>	498,08
<b>5:00:00</b>	498,08
<b>6:00:00</b>	498,08
<b>7:00:00</b>	467,83
<b>8:00:00</b>	438,11
<b>9:00:00</b>	423,45
<b>10:00:00</b>	389,40
<b>11:00:00</b>	373,13
<b>12:00:00</b>	379,23
<b>13:00:00</b>	388,38
<b>14:00:00</b>	397,59
<b>15:00:00</b>	406,85
<b>16:00:00</b>	416,16
<b>17:00:00</b>	425,53
<b>18:00:00</b>	405,82
<b>19:00:00</b>	386,34
<b>20:00:00</b>	381,26
<b>21:00:00</b>	390,42
<b>22:00:00</b>	428,67
<b>23:00:00</b>	498,08

Comprobamos que la presión mínima del sistema es de 373,13 Bar y la máxima de 498,08 Bar. **Podemos establecer que este sistema es viable y cumple con las condiciones de presión mínimas**, de no ser así sería necesario recalcular el sistema para diferentes valores de caudal de compresión y dimensión de depósito.

### 2.3. Dimensionado del sistema de producción

Se ha decidido que los sistemas de alta y media presión se alimentarán ambos de un buffer de Hidrógeno de baja presión abastecido directamente por el electrolizador, como ya conocemos las salidas de Hidrógeno podemos dimensionar el sistema de almacenaje mediante la siguiente tabla de necesidades netas.

Tabla 7: Hidrógeno horario que debe aportar el buffer de baja presión

<b>Hora</b>	<b>Vehículos [Ud]</b>	<b>Hidrógeno total a aportar [kg]</b>
<b>0:00:00</b>	0	0
<b>1:00:00</b>	0	0
<b>2:00:00</b>	0	0
<b>3:00:00</b>	0	0
<b>4:00:00</b>	0	0
<b>5:00:00</b>	0	0
<b>6:00:00</b>	2	54

<b>7:00:00</b>	4	108
<b>8:00:00</b>	5	135
<b>9:00:00</b>	7	189
<b>10:00:00</b>	6	162
<b>11:00:00</b>	4	108
<b>12:00:00</b>	4	108
<b>13:00:00</b>	4	108
<b>14:00:00</b>	4	108
<b>15:00:00</b>	4	108
<b>16:00:00</b>	4	108
<b>17:00:00</b>	6	162
<b>18:00:00</b>	6	162
<b>19:00:00</b>	5	135
<b>20:00:00</b>	4	108
<b>21:00:00</b>	2	54
<b>22:00:00</b>	0	0
<b>23:00:00</b>	0	0
<b>Total [kg de H2]</b>	1917	

Las necesidades netas de Hidrógeno del sistema son de 1917 kg de H2 por día, si tenemos en cuenta que 1 MW de electrolisis produce de media 400 kg de H2 por día, obtendremos una potencia necesaria de electrolisis de 4,8 MW que redondearemos a la unidad entera mayor de 5MW.

Como nuestro electrolizador funcionara continuamente será necesario un depósito que pueda almacenar el Hidrógeno realizando la función de buffer y evitar una caída de presión en la toma de los compresores, por ello dimensionamos el depósito inicial con 1300 kg aproximadamente un 70% de la producción diaria.

Analizamos su comportamiento durante el día:

Tabla 8: Análisis horario del primer día. Movimiento de Hidrógeno entre los equipos contando su generación

<b>Hora</b>	<b>Compresor de media 300 Bar [kg]</b>	<b>Compresor de alta 500 Bar [kg]</b>	<b>Estado de carga del depósito de baja presión 30 bar [kg]</b>	<b>Electrolizador [kg]</b>
<b>0:00:00</b>	0	0	1300	0
<b>1:00:00</b>	0	0	1300	0
<b>2:00:00</b>	0	0	1300	0
<b>3:00:00</b>	0	0	1300	0
<b>4:00:00</b>	0	0	1300	0
<b>5:00:00</b>	0	0	1300	0
<b>6:00:00</b>	0	0	1300	0
<b>7:00:00</b>	26	28	1300	0
<b>8:00:00</b>	52	56	1246	54
<b>9:00:00</b>	60	65	1192	91
<b>10:00:00</b>	60	65	1158	91
<b>11:00:00</b>	60	65	1124	91

<b>12:00:00</b>	60	65	1090	91
<b>13:00:00</b>	60	65	1056	91
<b>14:00:00</b>	60	65	1022	91
<b>15:00:00</b>	60	65	988	91
<b>16:00:00</b>	60	65	954	91
<b>17:00:00</b>	60	65	920	91
<b>18:00:00</b>	60	65	886	91
<b>19:00:00</b>	60	65	852	91
<b>20:00:00</b>	60	65	818	91
<b>21:00:00</b>	60	65	784	91
<b>22:00:00</b>	60	65	750	91
<b>23:00:00</b>	5	0	716	91

En el segundo día, el electrolizador necesitara las 6 primeras horas recuperar el volumen de Hidrógeno máximo y seguir con el mismo proceso.

El funcionamiento del sistema el segundo día sería el siguiente:

*Tabla 9: Análisis horario del segundo día. Movimiento de Hidrógeno entre los equipos contando su generación*

<b>Hora</b>	<b>Compresor de media 300 Bar [kg]</b>	<b>Compresor de alta 500 Bar [kg]</b>	<b>Estado de carga del depósito de baja presión 30 bar [kg]</b>	<b>Electrolizador [kg]</b>
<b>0:00:00</b>	0	0	807	91
<b>1:00:00</b>	0	0	898	91
<b>2:00:00</b>	0	0	989	91
<b>3:00:00</b>	0	0	1080	91
<b>4:00:00</b>	0	0	1171	91
<b>5:00:00</b>	0	0	1262	38
<b>6:00:00</b>	0	0	1300	0
<b>7:00:00</b>	26	28	1300	0
<b>8:00:00</b>	52	56	1246	54
<b>9:00:00</b>	60	65	1192	91
<b>10:00:00</b>	60	65	1158	91
<b>11:00:00</b>	60	65	1124	91
<b>12:00:00</b>	60	65	1090	91
<b>13:00:00</b>	60	65	1056	91
<b>14:00:00</b>	60	65	1022	91
<b>15:00:00</b>	60	65	988	91
<b>16:00:00</b>	60	65	954	91
<b>17:00:00</b>	60	65	920	91
<b>18:00:00</b>	60	65	886	91
<b>19:00:00</b>	60	65	852	91

<b>20:00:00</b>	60	65	818	91
<b>21:00:00</b>	60	65	784	91
<b>22:00:00</b>	60	65	750	91
<b>23:00:00</b>	5	0	716	91

Las horas en que el equipo para se pueden utilizar para realizar mantenimiento, también es posible regular el caudal de producción en dicho intervalo para mantener un funcionamiento armonizado.

Podemos analizar la presión del sistema igual que en los casos anteriores, a fin de verificar que esta no cae por debajo de la presión mínima de captación de los equipos de compresión 15 Bar.

*Tabla 10: Evolución de la presión del Hidrógeno en el buffer de baja presión*

<b>Dia 1</b>	
<b>Hora</b>	<b>Presión [Bar]</b>
<b>0:00:00</b>	30,00
<b>1:00:00</b>	30,00
<b>2:00:00</b>	30,00
<b>3:00:00</b>	30,00
<b>4:00:00</b>	30,00
<b>5:00:00</b>	30,00
<b>6:00:00</b>	30,00
<b>7:00:00</b>	30,00
<b>8:00:00</b>	28,75
<b>9:00:00</b>	27,51
<b>10:00:00</b>	26,72
<b>11:00:00</b>	25,94
<b>12:00:00</b>	25,15
<b>13:00:00</b>	24,37
<b>14:00:00</b>	23,58
<b>15:00:00</b>	22,80
<b>16:00:00</b>	22,02
<b>17:00:00</b>	21,23
<b>18:00:00</b>	20,45
<b>19:00:00</b>	19,66
<b>20:00:00</b>	18,88
<b>21:00:00</b>	18,09
<b>22:00:00</b>	17,31
<b>23:00:00</b>	16,52

## 2.4. Dimensionamiento del sistema de reserva

En este punto podemos considerar que el sistema funciona correctamente pero no está preparado para encontrarse ningún inconveniente en su desempeño. Por ello se plantea crear una reserva de Hidrógeno o sobredimensionamiento de los equipos de almacenaje, para que la estación pueda funcionar con normalidad si el electrolizador permanece parado durante un día.

Este sobredimensionamiento se realizará mediante la ampliación de depósitos de Hidrógeno, su llenado deberá realizarse en periodos previos a la obertura comercial de la estación o de baja demanda, pues no deberían llegar nunca a vaciarse en el transcurso normal de la actividad, este sobredimensionamiento de depósitos también provocará que la estación funcione a presiones mayores, disminuyendo la variación de la presión durante los repostajes cotidianos. Este factor también permitirá hacer frente a incrementos de demanda puntuales.

### 2.4.1. Cálculo neto de necesidades de Hidrógeno

Primero verificamos las necesidades netas de Hidrógeno que deberemos proveer para cada depósito.

Esta cantidad de Hidrógeno será el total que se consume durante el transcurso de un día de funcionamiento normal.

Utilizamos la tabla 11 y fijamos las cantidades de Hidrógeno que deberemos tener en reserva en cada sistema presurizado, hay que tener en cuenta que este Hidrógeno deberá estar previamente comprimido y no provendrá de los compresores ya que su función es responder a imprevistos sobre todo de carácter eléctrico.

Tabla 11: Cantidades horarias de Hidrógeno que se extraen de cada depósito

<b>Hora</b>	<b>Depósito 300 Bar [kg]</b>	<b>Depósito 500 Bar [kg]</b>
<b>0:00:00</b>	0	0
<b>1:00:00</b>	0	0
<b>2:00:00</b>	0	0
<b>3:00:00</b>	0	0
<b>4:00:00</b>	0	0
<b>5:00:00</b>	0	0
<b>6:00:00</b>	26	28
<b>7:00:00</b>	52	56
<b>8:00:00</b>	65	70
<b>9:00:00</b>	91	98
<b>10:00:00</b>	78	84
<b>11:00:00</b>	52	56
<b>12:00:00</b>	52	56
<b>13:00:00</b>	52	56
<b>14:00:00</b>	52	56
<b>15:00:00</b>	52	56
<b>16:00:00</b>	52	56
<b>17:00:00</b>	78	84

<b>18:00:00</b>	78	84
<b>19:00:00</b>	65	70
<b>20:00:00</b>	52	56
<b>21:00:00</b>	26	28
<b>22:00:00</b>	0	0
<b>23:00:00</b>	0	0
<b>Total</b>	923	994

Ahora debemos buscar la cantidad de Hidrógeno necesaria en cada depósito a fin de que estos no bajen nunca de las presiones mínimas de recarga que se han fijado en el apartado anterior.

### 2.4.2. Sistema de media presión

El sistema de media presión deberá dar 923 kg de H2 al surtidor y mantener una presión mínima en el depósito de 200 Bar.

Para cumplir estos requisitos iteramos la relación:

$$P[\text{Bar}] = \frac{zn[\text{mol}]R \left[ \frac{J}{\text{mol}} \cdot K \right] T[\text{K}]}{V[\text{m}^3]}$$

Deberemos iterar la expresión para distintos valores de volumen [V] y n [moles de H2] con la condición de Pmin= 200 Bar y la z dependiente de la P. Donde:

$$R = 8,314462 \left[ \frac{J}{\text{mol}} \cdot K \right]$$

Este cálculo igual que el apartado anterior se realiza con el programa Excel y encontramos los siguientes valores de respuesta:

$$V = 70 \text{ m}^3$$

$$n = 2150 \text{ kg de H2}$$

La evolución del sistema durante el día autónomo de funcionamiento será el siguiente:

Tabla 12: Evolución del Hidrógeno que proveerá el sistema de media presión; cantidad [kg] y presión [Bar]

<b>Hora</b>	<b>Estado de carga del depósito de media presión [kg]</b>	<b>Presión el depósito [Bar]</b>
<b>0:00:00</b>	2150	394,79
<b>1:00:00</b>	2150	394,79
<b>2:00:00</b>	2150	394,79
<b>3:00:00</b>	2150	394,79
<b>4:00:00</b>	2150	394,79
<b>5:00:00</b>	2150	394,79

<b>6:00:00</b>	2150	394,79
<b>7:00:00</b>	2124	389,23
<b>8:00:00</b>	2072	378,17
<b>9:00:00</b>	2007	364,46
<b>10:00:00</b>	1916	345,47
<b>11:00:00</b>	1838	329,38
<b>12:00:00</b>	1786	318,74
<b>13:00:00</b>	1734	308,18
<b>14:00:00</b>	1682	297,70
<b>15:00:00</b>	1630	287,30
<b>16:00:00</b>	1578	276,97
<b>17:00:00</b>	1526	266,72
<b>18:00:00</b>	1448	251,49
<b>19:00:00</b>	1370	236,43
<b>20:00:00</b>	1305	224,01
<b>21:00:00</b>	1253	214,16
<b>22:00:00</b>	1227	209,27
<b>23:00:00</b>	1227	209,27

Podemos ver que, para que este sistema funcione, será necesario un depósito que sea capaz de admitir presiones de funcionamiento de 400 Bar.

### 2.4.3. Sistema de alta presión

Para dimensionar este sistema seguiremos los mismos pasos que en el apartado anterior

El sistema de alta presión deberá dar 994 kg de H2 al surtidor y mantener una presión mínima en el depósito de 375 Bar.

Para cumplir estos requisitos iteramos la relación:

$$P[\text{Bar}] = \frac{zn[\text{mol}]R \left[ \frac{\text{J}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \right] T[\text{K}]}{V[\text{m}^3]}$$

Deberemos iterar la expresión para distintos valores de volumen [V] y n [moles de H2] con la condición de Pmin= 375 Bar y la z dependiente la P. Dónde:

$$R = 8,314462 \left[ \frac{\text{J}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \right]$$

Este cálculo igual que el apartado anterior se realiza con el programa Excel y encontramos los siguientes valores de respuesta:

$$V = 60 \text{ m}^3$$

$$n = 2550 \text{ kg de H2}$$

La evolución del sistema durante el día autónomo de funcionamiento será el siguiente:

Tabla 13: Evolución del Hidrógeno que proveerá el sistema de alta presión; cantidad [kg] y presión [Bar]

<b>Hora</b>	<b>Estado de carga del depósito de alta presión [kg]</b>	<b>Presión el depósito [Bar]</b>
<b>0:00:00</b>	2550	695,98
<b>1:00:00</b>	2550	695,98
<b>2:00:00</b>	2550	695,98
<b>3:00:00</b>	2550	695,98
<b>4:00:00</b>	2550	695,98
<b>5:00:00</b>	2550	695,98
<b>6:00:00</b>	2550	695,98
<b>7:00:00</b>	2522	686,44
<b>8:00:00</b>	2466	667,49
<b>9:00:00</b>	2396	644,04
<b>10:00:00</b>	2298	611,65
<b>11:00:00</b>	2214	584,30
<b>12:00:00</b>	2158	566,27
<b>13:00:00</b>	2102	548,42
<b>14:00:00</b>	2046	530,73
<b>15:00:00</b>	1990	513,21
<b>16:00:00</b>	1934	495,86
<b>17:00:00</b>	1878	478,68
<b>18:00:00</b>	1794	453,22
<b>19:00:00</b>	1710	428,15
<b>20:00:00</b>	1640	407,54
<b>21:00:00</b>	1584	391,24
<b>22:00:00</b>	1556	383,15
<b>23:00:00</b>	1556	383,15

Igual que en el caso anterior a fin de cumplir con los requisitos de presión del sistema deberemos utilizar un depósito que pueda soportar hasta 700 Bar de presión.

## **2.5. Selección de las tecnologías de producción y almacenamiento**

En este apartado se abordará la selección de las tecnologías de producción y almacenamiento que serán utilizadas en el proyecto. Se llevará a cabo un análisis de los parámetros técnicos generales de las tecnologías más relevantes y actualmente disponibles en el mercado, con el fin de justificar la elección de los equipos principales.

### 2.5.1. Selección de las tecnologías de producción

Las tecnologías de producción para el Hidrógeno verde pueden ser muy variadas, en el caso de este proyecto destinado a la producción de Hidrógeno basada en energía de red, nos centraremos en definir una tipología de tecnología de electrolisis. Por ello nos centraremos en la selección del electrolizador adecuado para el contexto del proyecto.

El resto de las tecnologías de producción de Hidrógeno (Electrocatalisis, reformado, etc.) no serían adecuadas para la producción en espacios pequeños y compactos como los que se pretende emular en esta solución, en entornos abiertos con espacio suficiente, la incorporación de un campo solar generador de energía directamente conectado al electrolizador o la electrocatalisis serian las opciones principales.

Para poder seleccionar la tecnología de electrolisis que más nos conviene se requiere del estudio de los parámetros principales de las tecnologías y sus costes.

Tabla 14: Características principales de los electrolizadores según su tecnología de funcionamiento. Tabla extraída del reporte "The Future of Hydrogen" preparado por el IEA para el G20, Japón – 2019, June

	Alkaline electrolyser			PEM electrolyser			SOEC electrolyser		
	Today	2030	Long term	Today	2030	Long-term	Today	2030	Long term
Electrical efficiency (% LHV)	63–70	65–71	70–80	56–60	63–68	67–74	74–81	77–84	77–90
Operating pressure (bar)	1–30			30–80			1		
Operating temperature (°C)	60–80			50–80			650		
Stack lifetime (operating hours)	60 000	90 000	100 000	30 000	60 000	100 000	10 000	40 000	75 000
	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Load range (% relative to nominal load)	10–110			0–160			20–100		
Plant footprint (m <sup>2</sup> /kW <sub>e</sub> )	0.095			0.048					

	Alkaline electrolyser			PEM electrolyser			SOEC electrolyser		
	Today	2030	Long term	Today	2030	Long-term	Today	2030	Long term
Electrical efficiency (% LHV)	63–70	65–71	70–80	56–60	63–68	67–74	74–81	77–84	77–90
CAPEX (USD/kW <sub>e</sub> )	500	400	200	1 100	650	200	2 800	800	500
	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	1400	850	700	1 800	1 500	900	5 600	2 800	1 000

Una vez conocidos estos, los contrastamos con los requisitos de nuestra planta, los cuales no son estrictos. Es importante mantener temperaturas de funcionamiento apropiadas, inferiores a los 100°C, y evitar sistemas que requieran grandes inercias. Esto se debe a que se pretende que el sistema funcione principalmente con una respuesta ágil, y se extienda la producción tanto como

sea posible durante el día. No se necesitan cambios y reajustes rápidos, pero si tiempos de respuesta horarios.

Esto simplificará enormemente la elección de la tecnología del electrolizador, podemos ver que las 3 tecnologías principales, PEM, Alcalina y SOC cumplen esta función.

Analizando la tabla superior definimos que las tecnologías más ventajosas para nuestros usos son la PEM y la alcalina, como estas no presentan significativamente variaciones entre ellas, de acuerdo con la función que debemos darle en nuestra estación, elegiremos la que sea más rentable económica y técnicamente.

Primero revisamos sus principales características.

Electrolizador alcalino:

- Electrolito: Utiliza una solución acuosa de hidróxido de potasio o hidróxido de sodio.
- Temperatura de funcionamiento: Funciona a temperaturas relativamente altas, generalmente entre 60 y 80 grados Celsius.
- Presión de funcionamiento: Opera a presión atmosférica o ligeramente superior.
- Eficiencia: Tiene una alta eficiencia energética y es adecuado para la producción a gran escala de hidrógeno.
- Aplicaciones: Utilizado principalmente en aplicaciones industriales, como la producción de hidrógeno para refinerías y plantas químicas.

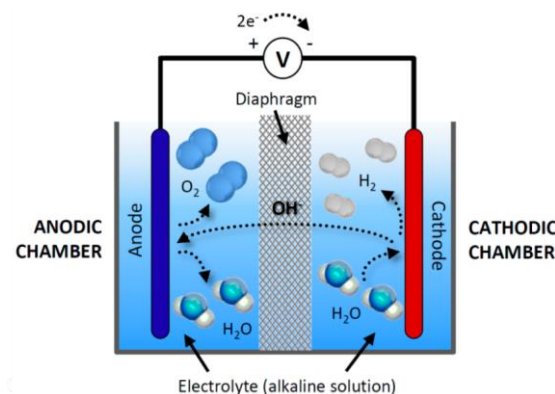


Ilustración 6: Composición interna de un electrolizador Alcalino

Electrolizador PEM:

- Electrolito: Utiliza una membrana de intercambio de protones como electrolito.
- Temperatura de funcionamiento: Funciona a temperaturas más bajas, generalmente entre 50 y 80 grados Celsius.
- Presión de funcionamiento: Opera a presiones más altas, generalmente entre 15 y 30 bar.
- Eficiencia: Tiene una respuesta más rápida y una eficiencia energética ligeramente mayor en comparación con el electrolizador alcalino.
- Aplicaciones: Utilizado en aplicaciones de menor escala, como sistemas de almacenamiento de energía renovable.

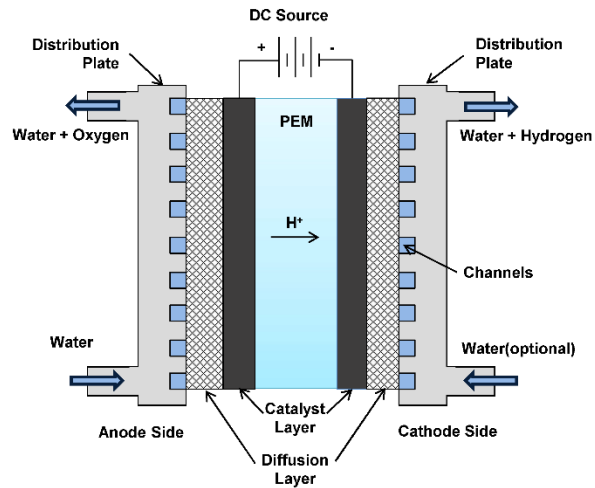


Ilustración 7: Composición interna de un electrolizador PEM

En resumen, las principales diferencias entre un electrolizador alcalino y uno PEM radican en el tipo de electrolito utilizado, la temperatura y la presión de funcionamiento, la eficiencia y las aplicaciones para las que son más adecuados.

Definimos por tanto que utilizaremos la **tecnología Alcalina** o una variación de esta para nuestra planta de producción de Hidrógeno a mediana escala, ya que no dependemos de energía renovable.

### 2.5.2. Selección de la tecnología de almacenaje

Para la definición de los equipos de almacenamiento con Hidrógeno debemos tener en cuenta que su tipología va ligada principalmente a la presión a la que almacenaran el Hidrógeno, de acuerdo con las presiones que pueden soportar organizaremos la tipología de almacenajes en Hidrógeno en:

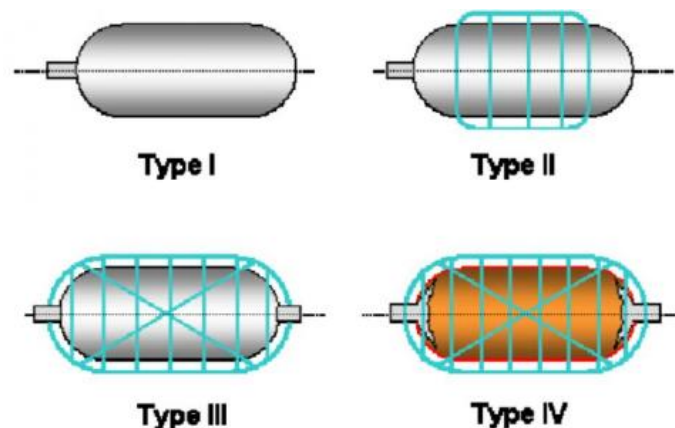


Ilustración 8: Estructura y armazón de los diferentes tipos de depósitos de Hidrógeno

Tabla 15: Características principales de los diferentes tipos de depósitos de Hidrógeno según su categoría

Tipo	Presión máxima [bar]	Material	Aplicación
I	175	Aluminio y acero	Estático
II	700 o 1000	Acero con refuerzos de fibra de carbono	Estático
III	700	Aluminio recubierto con materiales compuestos	Transporte por carretera
IV	700	Forro interno de plástico reforzado con fibras de carbono y recubierto con fibra de vidrio	Movilidad

En nuestra composición, deberemos usar una combinación de estas tipologías de depósitos, por ello se definirán depósitos de tipo 1 para el almacenaje de baja presión de salida del electrolizador y depósitos de tipo dos para el almacenaje de media y alta presión.

## 2.6. Selección de equipos y componentes de la estación de repostaje.

En este apartado se definirán todos los equipos que formarán parte de la estación de repostaje.

Antes de poder definir todos los equipos se establecerá un pequeño esquema de funcionamiento para mostrar el funcionamiento completo de la estación y los diferentes equipos que intervendrán y como interactuarán entre ellos.

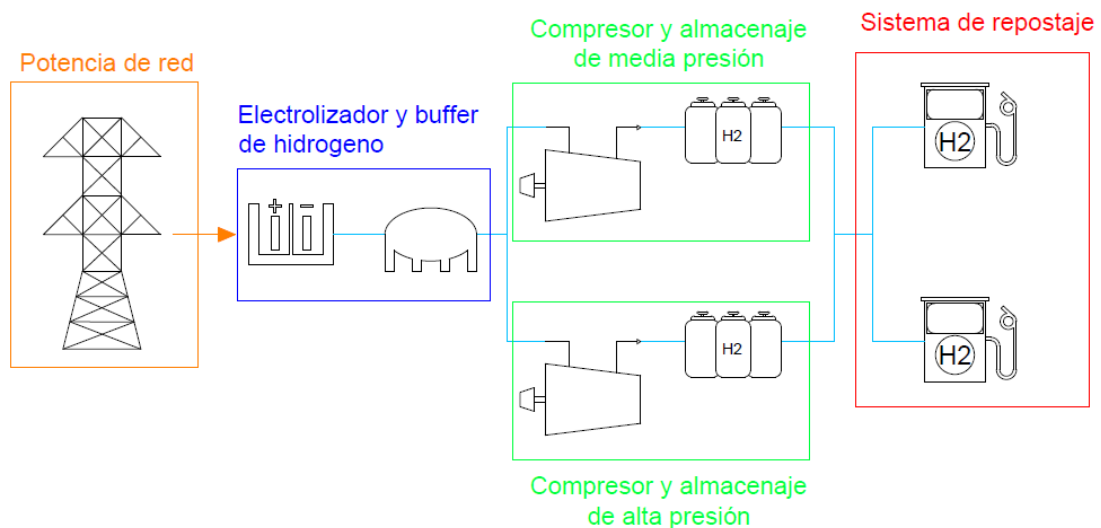


Ilustración 9: Esquema de la planta de repostaje

### 2.6.1. Electrolizador

Como conocemos la capacidad de electrolisis necesaria y la cantidad de Hidrógeno que debemos proveer, en este trabajo se definirá que electrolizador en estado comercial es capaz de satisfacer dicha necesidad y cuáles son sus características.

Siguiendo la justificación establecida en el apartado 2.5.1 elegiremos un electrolizador de tecnología alcalina.

El electrolizador elegido es manufacturado por CPH<sub>2</sub> mediante tecnología alcalina, este electrolizador utiliza una tecnología de separación criogénica para separar el Hidrógeno y el oxígeno eliminando así la necesidad de una membrana.

Este equipo en escala industrial solo se manufactura en unidades de 1 MW, pero es posible acumular 5 unidades a fin de que sean más compactos (Sometidos estos a ingeniería de detalle sería viable juntar dichos equipos y ahorrar costes construyendo instalaciones auxiliares compartidas, pero esto queda fuera de la escala de este proyecto más generalista).



*Ilustración 10: Imagen del electrolizador en container de CPH<sub>2</sub>*



Ilustración 11: Imagen interior del electrolizador de CPH2

Las características de este equipo son las mostradas en la tabla siguiente:

Tabla 16: Características y coste del electrolizador presentados por CPH2

Parameter	Units	Min Value	Max Value
<b>Technología</b>	-	Alkalina sin Membrana	
<b>Total power (BOL)</b>	MW	1,2	
<b>System Design lifetime</b>	Years	25	
<b>Stack lifetime</b>	hours	219000	
<b>Hydrogen production</b>	Nm <sup>3</sup> / hrs		220
	Nm <sup>3</sup> / day		5280
	kg / hrs		18,75
	kg / day		450
<b>Water consumption (approximation)</b>	l / kg(H2)		11,2
	l / hrs		210
	l/Nm <sup>3</sup> H2		0,95
<b>Water type</b>	-	Potable water	
<b>Design pressure</b>	bar <sub>g</sub>		40
<b>Hydrogen supply pressure</b>	bar <sub>g</sub>	10	34
<b>Load control</b>	%	10	100
<b>Startup time from Off state</b>	minutes		5
<b>cold startup time to 100%</b>	minutes		
<b>Cold start from off (to 75%)</b>	minutes		5
<b>Cold Start Time</b>	minutes		5
<b>Hot startup time to 100%</b>	seconds		
<b>Warm start from pause (to 75%)</b>	seconds		30
<b>Startup Time (from Stand by)</b>	seconds		30
<b>Hydrogen purity</b>	%	99,999	
<b>Ambient temperature (maximum)</b>	C°		35
<b>Ambient temperature (minimum)</b>	C°		-10

<b>Design temperature range††</b>	C°	-10	40
<b>Total power</b>	MW		1,2
<b>Power Consumption (BOP + Stack)</b>	kWh/Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub>		5,755496781
	kWh/kg H <sub>2</sub>		64

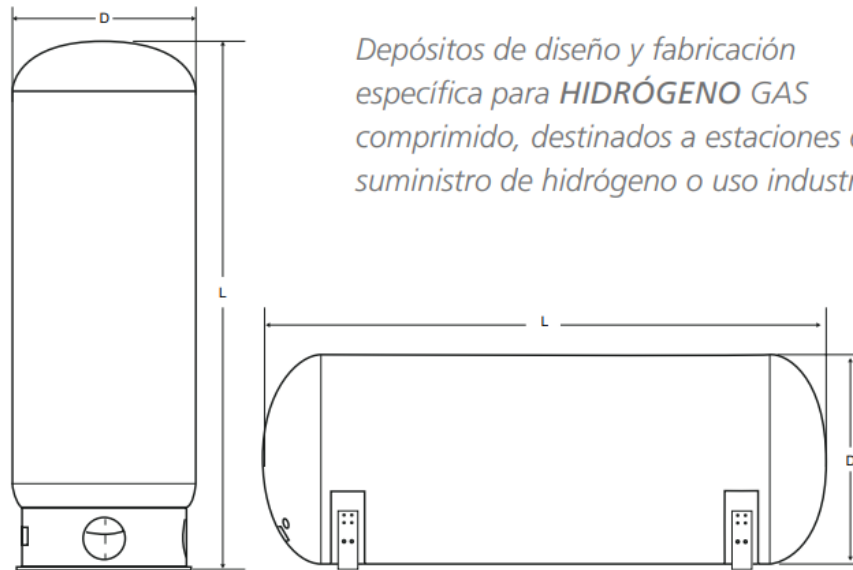
### 2.6.2. Sistema de almacenaje 30 bar

El sistema de almacenaje de 30 Bar será un depósito de categoría 1 manufacturado por un fabricante español, Lapesa.



Ilustración 12: Imagen de un depósito horizontal de Hidrógeno fabricado por Lapesa S.A.

# lapesa | Almacenamiento de **HIDRÓGENO GAS**



*Depósitos de diseño y fabricación específica para **HIDRÓGENO GAS** comprimido, destinados a estaciones de suministro de hidrógeno o uso industrial.*

## MODELOS Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

MODELOS HORIZONTALES	LH 10H	LH 25H	LH 50H	LH 100H	LH 145H	LH 200H
Volumen nominal (m <sup>3</sup> )	10	25	50	100	145	200
Diámetro exterior D (mm)	1.500	2.200	2.450	3.000	3.000	3.500
Longitud total L (mm)	5.950	7.350	11.550	15.350	21.850	22.300
Peso en vacío (Ton)	3,5	8,9	18,2	34,7	48,3	66,8
Peso contenido de H <sub>2</sub> (kg) <sup>1</sup>	36	90	180	360	522	720

MODELOS VERTICALES	LH 10V	LH 25V	LH 50V	LH 100V	LH 145V	LH 200V
Volumen nominal (m <sup>3</sup> )	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
Peso contenido de H <sub>2</sub> (kg) <sup>1</sup>	36	90	180	360	522	720

*Ilustración 13: Características estandarizadas de los depósitos de Hidrógeno fabricados por Lapesa*

Serán necesarias 2 unidades de 720 kg de H<sub>2</sub> de capacidad, estos depósitos pueden colocarse a la intemperie y son la misma tipología de depósito (en mayor tamaño) que los que se pueden encontrar en diferentes instalaciones industriales conteniendo GNL, también es posible ver versiones refrigeradas de estos en complejos médicos conteniendo Oxígeno u otros gases.

### 2.6.3. Sistema de compresión de alta presión

Una vez se ha determinado el almacenamiento de baja presión, hay que establecer que dicho equipo funcionara como un almacenamiento primario y un buffer para el sistema de compresión que alimentara los depósitos de alta y media presión.

Hay dos posibilidades en formato para dichos compresores y depósitos,

- Un sistema de compresor y depósito en línea. Donde el compresor de alta presión se alimentará de un depósito de media de 300 bar y el compresor de media será el que se alimentará del depósito de baja presión.
- Un sistema en paralelo, donde ambos compresores se alimentan del depósito de baja presión y estos son independientes.

En nuestro caso como se muestra en el esquema inicial y en los cálculos previos utilizaremos un sistema en paralelo, por ello serán necesarios dos equipos de compresión independientes.

- Compresor de media presión [30 a 400 Bar]
- Compresor de alta presión [30 a 700 Bar]

Los equipos seleccionados para dicha función son los compresores fabricados por una empresa española, Hiperbaric.

Estos equipos de compresión pueden incorporar un sistema de refrigeración industrial que impide que el gas se caliente por encima del margen de seguridad mientras se deposita en los depósitos de media y alta presión.

Estos equipos son aptos para comprimir Hidrógeno en un rango de 30 a 1000 Bar, por lo que son válidos para dar salida al Hidrógeno de ambos depósitos.

Aunque sea el mismo equipo la configuración del sistema de frío y gasto energético no será el mismo, por lo que serán unidades independientes no intercambiables las que realizarán el trabajo.



*Ilustración 14: Compresor Hiperbaric*

#### **2.6.4. Depósitos de alta presión**

Igual que el caso de los compresores, deberemos procurar dos unidades de depósitos que definiremos:

- Depósito de media presión 400 Bar
- Depósito de alta presión 700 Bar



*Ilustración 15: Imagen de un rack de depósitos de H2*

Estos depósitos tendrán las características intrínsecas mencionadas anteriormente en el apartado 2.5.2 en la tipología de depósito "Categoría II" y se realizarán prescritos para el proyecto, por lo que el tamaño de ambos se establecerá en el dimensionamiento técnico de la hidrogenera y se adaptará a las posibilidades de manufactura específica.

El formato de ambos depósitos será el establecido en la imagen, grandes racks de botellas de Hidrógeno interconectadas cuya cantidad a almacenar depende del dimensionamiento del rack en sí y su tolerancia a la presión puede variar según prescripciones entre los 0 y 1000 Bar.

### **2.6.5. Sistema de repostaje**

Finalmente, el sistema de repostaje, este es el equipamiento que actualmente podríamos relacionar con un surtidor convencional de combustible. Sin embargo, al realizar un repostaje con gas, debemos tener en cuenta que contendrá más elementos de los habituales y deberá cumplir con criterios de seguridad más estrictos.

La complejidad del surtidor es la misma, independientemente de la tipología de recarga. El factor que principalmente determina la necesidad de equipamiento adicional está relacionado con la velocidad de recarga. A mayor velocidad de carga, mayor es el incremento de temperatura que experimenta el depósito y la conexión con el surtidor. Este factor es especialmente importante en dos ámbitos: recargas a altas presiones (700 bares) o como en nuestro caso, recargas de cantidades significativas de hidrógeno.

Estas recargas podrían llevarse a cabo en tiempos más amplios y eliminar dicha problemática. Sin embargo, debido a que una de las principales ventajas de operar vehículos con hidrógeno es su tiempo de recarga limitado, es más prudente equipar dichos surtidores con un sistema de refrigeración. Al igual que en el caso de los compresores, este sistema actúa refrigerando el hidrógeno durante su paso por el surtidor antes de depositarlo en el vehículo. Esto permite recargas rápidas en movilidad pesada (alrededor de 4 o 5 minutos) y recargas rápidas y seguras, similares a las que estamos acostumbrados con los depósitos de combustibles licuados para la movilidad ligera.


El equipamiento que deberá incluir dicho surtidor es el siguiente:

- Buffer interno de H2 de alta presión
- Sistema de refrigeración de recarga
- Lector de temperatura por infrarrojos en el conector de descarga

Este es el equipamiento recomendado para estos equipos y es el que generalmente encontraremos en las ofertas de equipos comerciales, si realizamos una gran cantidad de recargas en lugares especialmente cálidos probablemente se recomiende un soporte extra o ampliación del sistema de refrigeración.

Un ejemplo de sistema de refrigeración incorporado en dichos surtidores sería el mostrado en la imagen siguiente manufacturado por la empresa Alpha Laval:

**Alfa Laval HyBloc™**  
– The ideal pre-cooler for dispenser unit in hydrogen refuelling stations



**PowerDense**  
Maximum sustainability under maximum pressures

**ReFuel+**  
Higher back-to-back throughput for increased profitability

- The Alfa Laval HyBloc™ range
  - Printed circuit heat exchangers
  - Highly efficient, well-proven solution for pre-cooling in HRS
  - Ultra-compact unit
  - Minimize filling times
  - Reduce space requirements
  - Reduces installation costs
- Wide range developed for both car/bus and truck/HDV needs

Technical data	
Core:	Diffusion welded 316 or 304 stainless steels
Headers and connections:	304, 316, Duplex, Super Duplex stainless steels
Codes:	ASME VIII Div. 1 and PED 2014/68/EU + applicable national codes
Design pressure:	Full vacuum to 1,250 bar (18,125 psi)
Design temperature:	-196°C to 800°C (-321°F to 1,472°F)

**For car:**  
– Fit into existing space  
– Dry weight: 152 kg  
– Plot size: 400 x 250 x 224 mm

**For truck:**  
– New application  
– Dry weight: 318 kg  
– Plot size: 376 x 480 x 237

Ilustración 16: Características del sistema de refrigerio que la empresa Alfa Laval proporciona a los fabricantes para incluir en los equipos de repostaje de H2

El sistema de repostaje elegido es el siguiente:



Ilustración 17: Imagen del surtidor de H2 confeccionado por Calvera S.A.

Este es un sistema de repostaje que fabrica la empresa Calvera S.A, este equipamiento está diseñado para recargas a 350 Bar y controlar la temperatura y tiempo de recarga.

## 2.7. Sistema completo

En este apartado se mostrará el sistema final y su funcionamiento, en el podremos ver todos los sistemas y la interacción que los diferentes elementos deben tener entre ellos.

El sistema de generación de Hidrógeno se verá compuesto del electrolizador y el buffer de Hidrógeno, este sistema contempla la entrada de potencia de red y del subsistema de purificación primario de agua (explicado en el apartado 2.8.1). Este es el sistema primario de generación de la estación y controlará mediante la refrigeración incorporada en la producción de Hidrógeno la temperatura a la que se encuentra el tanque de Hidrógeno a baja presión o buffer principal, este elemento es de baja peligrosidad por las bajas presiones a las que se encuentra normalmente almacenado el gas, pero sigue siendo un contenedor de un elemento inflamable ubicado en intemperie que debe ser monitorizado en todo momento.

A partir del sistema principal dos tomas salen del buffer de baja presión y se separan los dos sistemas de compresión principales, a través del compresor de media presión se alimentará el depósito de media presión y el compresor de alta presión realizará la misma maniobra con los depósitos de alta presión. Ambos compresores llevan incorporados sistemas de frío que deberá monitorizar tanto la temperatura interna del compresor como la temperatura a la que Hidrógeno llega a sus respectivos depósitos. Estos sistemas de frío se encuentran situados antes de la etapa de compresión y su función es bajar la temperatura del Hidrógeno previa compresión a fin de que este llegue al depósito a la temperatura correcta, estos sistemas también incluyen un sistema de refrigeración propio en el compresor para evitar que este elemento se sobrecaliente durante su funcionamiento y trabaje siempre a las condiciones óptimas recomendadas por el fabricante.

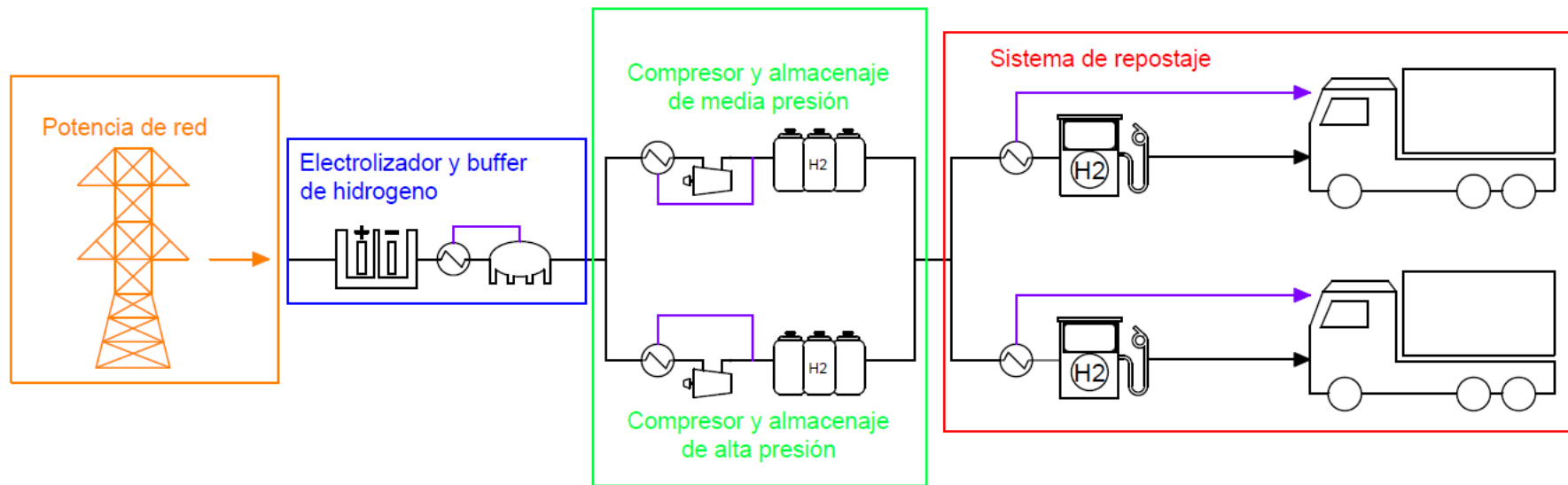
Finalmente encontramos el sistema de repostaje que tomara Hidrógeno de ambos depósitos de alta y medio presión para surtir el vehículo, este sistema debe cumplir diversos cometidos.

- Monitorizar la temperatura del depósito del vehículo a su llegada. Esto se realiza mediante un lector de temperatura infrarroja en la toma de la boquilla del surtidor.
- Monitorizar la carga y la presión de Hidrógeno que contiene el vehículo a su llegada.
- Anclar la toma del surtidor al vehículo.

El sistema de repostaje incluye un sistema de refrigeración propio, que igual que en el caso del compresor, refrigera el Hidrógeno antes de su vaciado al vehículo monitorizando constantemente la temperatura a la cual se encuentra el depósito de este. En caso de que el sistema de refrigeración no pueda refrigerar la temperatura lo suficiente el surtidor ralentizar la recarga del vehículo, en caso contrario la acelerará.

El usuario una vez iniciada la descarga no podrá liberar la toma del surtidor del vehículo, que quedará bloqueada completamente hasta que se complete la recarga o el usuario la cancele. Este equipamiento incorpora un sistema de venteo de manguera que tiene como objetivo evitar que el Hidrógeno se libere en las inmediaciones del vehículo y del usuario una vez finalizada la carga.

En la ilustración siguiente se muestra el esquema completo de la estación:



■ Sistema de control de temperatura

Ilustración 18: Esquema completo de la estación de repostaje

## **2.8. Definición de los sistemas auxiliares de la estación de repostaje**

Este apartado se centrará en definir los sistemas complementarios que serán necesarios para el correcto funcionamiento de la estación:

- Sistema de filtrado de agua
- Sistema de tratamiento de agua
- Sistema de control integral de la estación de repostaje
- Sistema de seguridad de la estación

En este apartado solo se mostrarán estos sistemas pues la mayoría de ellos dependerá enormemente de las condiciones del entorno, tales como la ubicación, la temperatura, densidad de población, espacio, etc.

Aun con esta consideración estos sistemas tienen una gran importancia en el contexto de estos proyectos y algunos de ellos pueden ser determinantes respecto su viabilidad, es importante definirlos de antemano y son como en el caso de los sistemas de agua, criterios de descarte para la ubicación de estos complejos.

### **2.8.1. Sistema de aguas**

Para obtener el hidrógeno de alta pureza necesario para los vehículos y conseguir rendimiento óptimo en el electrolizador, es fundamental contar con sistemas de tratamiento tanto previo como final del agua empleada en el proceso.

En primer lugar, el tratamiento previo del agua es esencial para prepararla antes de su utilización en la producción de hidrógeno. El agua suele contener impurezas y compuestos no deseados que pueden afectar negativamente el rendimiento de los equipos y catalizadores utilizados en el proceso de generación de hidrógeno y en su consumo. Por lo tanto, se deben aplicar técnicas de purificación y filtración para eliminar minerales, partículas suspendidas, contaminantes químicos y microorganismos, garantizando un agua de alta calidad que no cause daños en los equipos y asegure la eficiencia del proceso.

Los equipos de electrolisis generalmente llevan incorporado un sistema interno de tratamiento de agua, pero este tratamiento solo es útil para acabar de refinar y verificar la calidad de del agua, es por tanto necesario cerciorarse en cualquier instalación de producción de Hidrógeno de la calidad del agua disponible, será necesario un mínimo de calidad de agua potable en la entrada del electrolizador e idealmente utilizar agua filtrada o purificada. Por ello es necesario planificar con cuidado el sistema de filtrado y captación inicial de agua. Este sistema interno funciona como una protección extra para proteger el equipo de contaminantes ajenos.

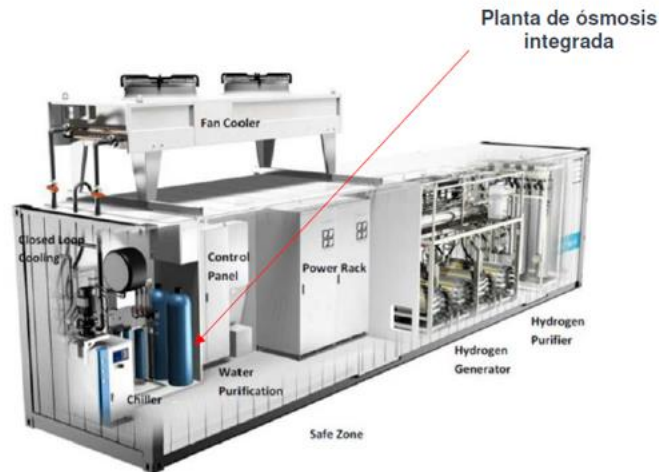


Ilustración 19: Ubicación del sistema de filtrado de agua en un electrolizador

Por otro lado, el tratamiento final del agua está enfocado en el manejo adecuado de los efluentes generados durante la producción de hidrógeno. Durante este proceso, el agua residual puede contener elementos que, de no ser tratados correctamente, podrían tener un impacto negativo en el medio ambiente y la salud pública. Por tanto, se deben implementar sistemas de tratamiento y depuración que permitan eliminar cualquier residuo químico o contaminante presente en el agua antes de ser devuelta al entorno.

En conclusión, el tratamiento de agua previo y final en una estación de producción de hidrógeno es un aspecto crítico que afecta tanto a la eficiencia del proceso como al impacto ambiental del mismo. Asegurar la pureza del agua utilizada en la generación de hidrógeno y gestionar adecuadamente los efluentes producidos son elementos fundamentales para impulsar la viabilidad y sostenibilidad de esta importante tecnología energética en el camino hacia un futuro más limpio y renovable.

### **Sistema de filtrado de agua**

Para poder definir el sistema de filtrado inicial primero deberemos definir la producción inicial de Hidrógeno del electrolizador y la relación de consumo de agua real entre el equipo y el sistema de filtrado.

Por ello definiremos primero el funcionamiento y la tecnología empleada en el sistema de filtrado de agua:

El sistema de filtrado de agua normalmente se realizará con un sistema mediante la técnica de osmosis inversa, deberemos tener en cuenta una excepción importante, siempre que el agua llegue en condiciones no aptas para un tratamiento de osmosis inversa, por ejemplo, con una gran cantidad de sólidos, partículas orgánicas o elementos en suspensión. En estos casos deberemos hacer un tratamiento previo a la entrada al sistema de osmosis. En este proyecto actuaremos bajo el supuesto que el agua llega en condiciones aceptables, como la que podríamos encontrar fluyendo libremente por canales de riego. Definiremos directamente el filtrado mediante el sistema de osmosis inversa.

El sistema de filtrado de agua por ósmosis inversa es una tecnología avanzada de purificación que utiliza una membrana semipermeable para eliminar impurezas, contaminantes y partículas indeseadas del agua. Este proceso se basa en el principio de ósmosis inversa, que consiste en

forzar el agua a través de una membrana con poros muy pequeños, lo que permite que solo las moléculas de agua pasen, dejando atrás contaminantes y otras sustancias.

El sistema de filtrado de ósmosis inversa generalmente se compone de los siguientes elementos:

- Pre-filtro: Es el primer paso de la purificación, y su función es eliminar partículas más grandes como sedimentos, arena, óxido y otros sólidos en suspensión. Esto protege la membrana de ósmosis inversa de posibles obstrucciones y alarga su vida útil.
- Membrana de ósmosis inversa: Es el corazón del sistema y la etapa clave de purificación. La membrana es una barrera semipermeable con poros extremadamente pequeños que permiten el paso exclusivo de las moléculas de agua, bloqueando compuestos más grandes como sales, minerales, contaminantes químicos, microorganismos y otros contaminantes disueltos en el agua.
- Tanque de almacenamiento: Después de pasar por la membrana de ósmosis inversa, el agua purificada se almacena en un tanque especial para su uso posterior. Este tanque asegura que siempre haya agua limpia y purificada disponible cuando se necesite.
- Post-filtro: Esta etapa es opcional y puede incluir un filtro adicional para mejorar aún más la calidad del agua antes de su consumo. Algunos sistemas de ósmosis inversa utilizan filtros de carbón activado para eliminar sabores, olores y residuos de cloro, mejorando así el sabor y la pureza del agua.

El proceso de ósmosis inversa es altamente eficiente para eliminar una amplia gama de contaminantes, incluyendo bacterias, virus, metales pesados, pesticidas, herbicidas, fluoruros y sales disueltas. Este sistema de filtrado es ampliamente utilizado en el tratamiento de agua potable, así como en aplicaciones industriales y comerciales que requieren agua de alta pureza.

Es importante destacar que, aunque la ósmosis inversa es muy efectiva en la purificación del agua, también puede generar un cierto desperdicio de agua, ya que el proceso implica el rechazo de una corriente de agua concentrada con los contaminantes eliminados. Sin embargo, los avances tecnológicos han permitido reducir el desperdicio y aumentar la eficiencia de estos sistemas, lo que los convierte en una opción confiable y efectiva para la obtención de agua limpia y segura.

Por ello el flujo de agua de nuestra instalación será el mostrado en la figura siguiente:

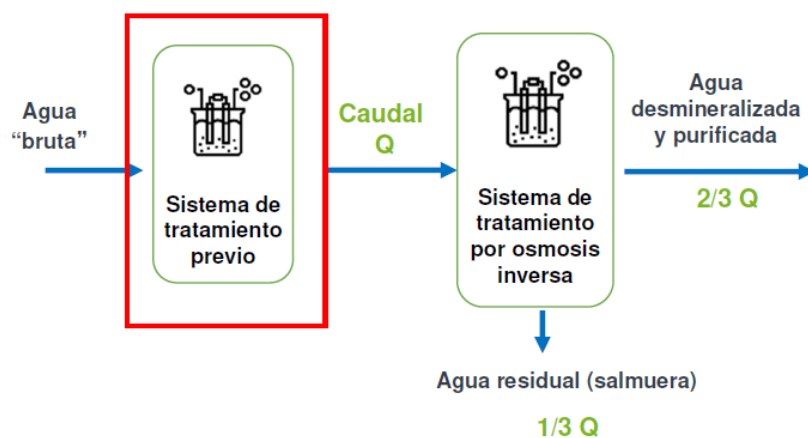


Ilustración 20: Esquema de flujo del agua

Podemos ver que la figura se muestra el caudal y los porcentajes en que este se distribuye, el porcentaje exacto de agua perdida dependerá en última instancia de la calidad de esta en la captación, pero mediante un sistema de osmosis común la mayoría de los fabricantes trabajan y dimensionan los equipos con un supuesto de pérdida de 1/3 del Caudal original por concentración de salmuera.

Estos equipos de osmosis también son utilizados como tratamiento generalizado de toda el agua del sistema de electrolisis e incluso de muchas industrias, por ello es común la instalación de un gran equipo de osmosis inversa en la entrada de flujo de agua y posteriormente repartir el flujo de agua purificada entre diferentes equipos.

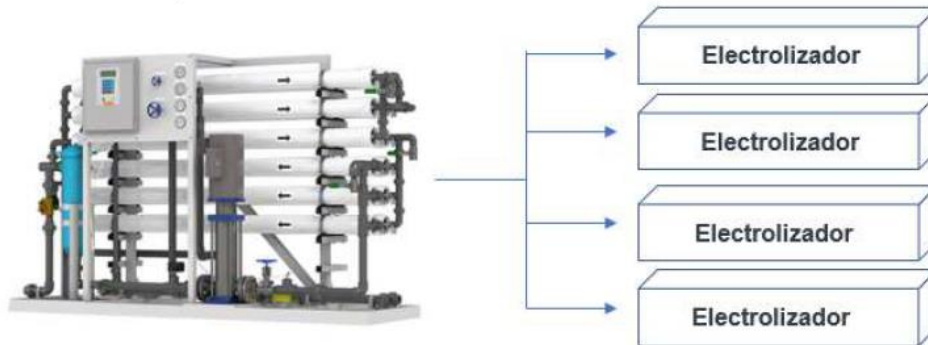
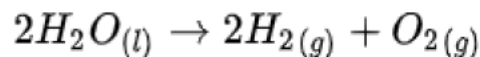


Ilustración 21: Sistema de abastecimiento de agua múltiple.

Una vez definimos el caudal perdido a fin de conseguir agua pura debemos determinar la cantidad de agua pura necesaria para formar 1kg de Hidrógeno.

Esto lo realizaremos mediante las relaciones estequiométricas:

Reacción global de la electrolisis:



Donde tendremos en cuenta los siguientes datos:

- Peso molecular del H [M(H)] = 1 g/mol; Peso molecular del O [M(O)] = 16 g/mol
- Densidad del agua = 997 gramos por litro.
- Considerar una reacción química perfecta

Obteniendo:

$$1 \text{ kg } H_2 * \frac{1 \text{ kmol } H_2}{2 \text{ kg } H_2} = 0,5 \text{ kmol } H_2$$

$$0,5 \text{ kmol } H_2 * \frac{2 \text{ kmol } H_2O}{2 \text{ kmol } H_2} = 0,5 \text{ kmol } H_2O$$

$$0,5 \text{ kmol } H_2O * \frac{18 \text{ kg } H_2O}{1 \text{ kmol } H_2O} = 9 \text{ kg } H_2O$$

$$9 \text{ kg } H_2O * \frac{1 \text{ m}^3}{997 \text{ kg } H_2O} = 0,009 \text{ m}^3 = 9 \text{ litros}$$

**Por lo que serán necesarios 9 litros de agua pura para generar 1kg Hidrógeno mediante electrolisis.**

Ahora bien, como hemos visto anteriormente aproximadamente un tercio del Caudal inicial total de la osmosis se perderá como salmuera, como ya hemos mencionado que dicha pérdida se producirá mayormente dependiendo de la calidad del agua que encontremos se estima que se necesitan entre **13 y 18 litros de agua “bruta” en captación por kg de Hidrógeno.**

### **Sistema de depuración de agua**

Este sistema será el encargado de la depuración del Caudal de agua rechazado por el proceso de osmosis, este caudal debe ser catalogado como salmuera y es potencialmente nocivo y no puede ser desechado de forma inconsciente, por ello es necesario planificar de antemano su disposición final.

Hay diferentes opciones que podemos utilizar a fin de tratar este elemento, estas opciones dependerán del caudal final de salmuera y las condiciones del entorno específico que rodee nuestra estación:

- Vertido directamente al medio

Este tipo de vertidos están regulados por el Real decreto legislativo 1/2016 de 16 de diciembre y dependen en segunda instancia de la legislación autonómica

- Gestión de la salmuera mediante evaporadores

Se centra en la utilización de Evaporadores para la eliminación del caudal de salmuera, serán necesario también la recogida de los residuos sólidos generados.



*Ilustración 22: Imagen de un Evaporador*

- Gestión de la salmuera mediante evaporación en balsa, esta opción requiere del dimensionamiento de una balsa de evaporación, así como un clima notablemente cálido a fin de que esta pueda llevar a cabos su cometido. Igual que en el caso de los evaporadores es necesario realizar un mantenimiento regular y recoger los residuos sólidos generados con cierta periodicidad.



Ilustración 23: Imagen de una balsa de evaporación

- Gestión de la salmuera mediante vertido a cauce. Esta opción depende de la ubicación donde se instaure la estación de repostaje, los vertidos en diferentes medios requerirán de la autorización administrativa de los diferentes organismos competentes.

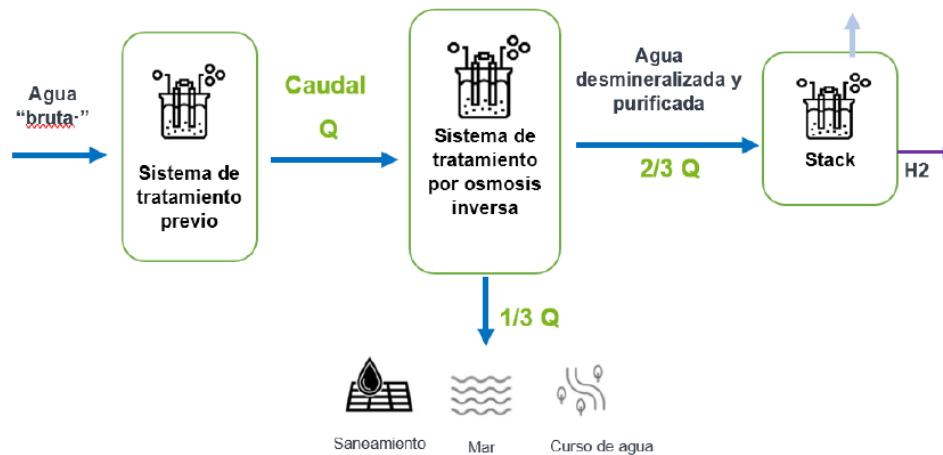


Ilustración 24: Esquema del flujo de agua vertido a cauce

Este vertido también puede realizarse a la red de alcantarillado municipal o una EDAR previa autorización y cumpliendo los valores máximos de contaminación establecidos por la legislación vigente.

Si se realiza un vertido a cualquier otro tipo de cauce; río, mar, etc. Será necesario realizar un estudio medioambiental de las consecuencias de dicho vertido y de la idónea dilución de este en la zona liberada.

### 2.8.2. Sistema de control integral de la estación de repostaje

El control integral de una estación de repostaje de hidrógeno es un elemento crucial para garantizar el funcionamiento seguro, eficiente y confiable de esta infraestructura. Una estación de repostaje de hidrógeno es un punto de suministro donde los vehículos impulsados por celdas de combustible de hidrógeno pueden recargar su combustible, lo que requiere una

gestión cuidadosa y avanzada para asegurar un flujo constante de hidrógeno de alta pureza a los vehículos.

El control integral de una estación de repostaje de hidrógeno abarca varios aspectos fundamentales que se describen a continuación:

- **Control de Procesos:** Esta área se enfoca en el control y supervisión de los procesos de producción, almacenamiento y dispensación de hidrógeno. Se requiere un sistema de control automatizado que garantice la operación óptima de los componentes de la estación. La precisión en la medición del flujo, la temperatura y la presión del hidrógeno es fundamental para mantener el suministro adecuado y seguro.
- **Seguridad:** La seguridad es una prioridad en las estaciones de repostaje de hidrógeno debido a la alta inflamabilidad del gas. Un sistema de control integral debe incluir protocolos de seguridad para la detección temprana de fugas de hidrógeno, apagado de emergencia, ventilación y sistemas de extinción de incendios. La integración de sistemas de monitoreo y control para garantizar el cumplimiento de estándares de seguridad es imprescindible.
- **Gestión de Inventarios:** Un control adecuado del inventario de hidrógeno es esencial para garantizar la disponibilidad continua de combustible para los vehículos. Un sistema de control debe llevar un registro preciso del nivel de almacenamiento de hidrógeno y anticipar la necesidad de reposición para evitar interrupciones en el servicio. Este control se ve incrementado por el valor añadido que puede producir la justificación correcta de la producción de Hidrógeno “verde”, esto requiere de garantías de origen y justificación temporal exacta en su producción.
- **Comunicación y Supervisión Remota:** Una estación de repostaje de hidrógeno puede formar parte de una red más amplia de estaciones de hidrógeno. Por lo tanto, el control integral debe permitir la comunicación y supervisión remota desde una ubicación central para optimizar la gestión y el mantenimiento de la infraestructura, estas infraestructuras están altamente automatizadas y deben ser capaces de operar en continuo sin personal humano mediando en su funcionamiento diario.
- **Eficiencia Energética:** Un aspecto relevante en el control integral es la búsqueda de la máxima eficiencia energética en la producción y suministro de hidrógeno. Esto incluye la optimización del consumo energético de los procesos y el uso de fuentes de energía renovable siempre que sea posible para la generación de hidrógeno.
- **Mantenimiento Predictivo:** La implementación de sistemas de control avanzados puede facilitar el mantenimiento predictivo, permitiendo la detección temprana de posibles fallos en los equipos y minimizando el tiempo de inactividad de la estación.

En conclusión, el control integral de una estación de repostaje de hidrógeno es un factor determinante para el éxito y la viabilidad de esta infraestructura clave en la transición hacia una movilidad y una generación de energía más sostenible. Un sistema de control automatizado, seguro y eficiente garantiza una operación fluida, la seguridad de los usuarios y el cumplimiento de los estándares ambientales, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

### **2.8.3. Sistema de seguridad de la estación de repostaje**

La seguridad en una estación de repostaje de hidrógeno es una preocupación primordial debido a la naturaleza altamente inflamable del gas de hidrógeno. Un sistema de seguridad integral es esencial para garantizar un entorno seguro tanto para los usuarios de los vehículos de hidrógeno como para el personal operativo y el público en general. En este apartado, analizaremos los componentes clave del sistema de seguridad en una estación de repostaje de hidrógeno y las medidas necesarias para mitigar riesgos potenciales.

- **Detección y Prevención de Fugas de Hidrógeno:** La detección temprana de fugas de hidrógeno es un componente crucial del sistema de seguridad. Se deben instalar sensores de detección de fugas en áreas críticas, como conexiones de mangueras, válvulas, tuberías y equipos de almacenamiento. Estos sensores deben ser capaces de detectar incluso pequeñas cantidades de hidrógeno en el aire y activar procedimientos de emergencia en caso de detección de una fuga. Además, es esencial realizar inspecciones periódicas y mantener el equipo y las conexiones en perfectas condiciones para prevenir fugas potenciales.
- **Apagado de Emergencia:** Un sistema de apagado de emergencia (o sistema de parada de emergencia) debe estar disponible en la estación de repostaje de hidrógeno. Este sistema permite cortar el suministro de hidrógeno en caso de detectar una fuga o cualquier otra situación de emergencia. Los procedimientos de apagado deben ser rápidos y confiables para minimizar el riesgo en caso de incidentes.
- **Ventilación y Sistemas de Extinción de Incendios:** Una estación de repostaje de hidrógeno debe contar con sistemas de ventilación adecuados para mantener el aire libre de concentraciones peligrosas de hidrógeno en caso de fuga. Además, se deben instalar sistemas de extinción de incendios apropiados, como rociadores de agua o sistemas de extinción de incendios de hidrógeno específicos, para controlar rápidamente cualquier incendio que pueda ocurrir.
- **Formación y Capacitación del Personal:** El personal que opera la estación de repostaje de hidrógeno debe recibir una formación exhaustiva sobre los procedimientos de seguridad y la manipulación segura del hidrógeno. Es crucial que estén familiarizados con los protocolos de emergencia y que sepan cómo reaccionar ante situaciones de riesgo.
- **Señalización y Equipamiento de Seguridad:** La estación de repostaje debe contar con una señalización clara y visible que indique la presencia de hidrógeno y las precauciones de seguridad necesarias. Además, se deben proporcionar equipos de seguridad adecuados, como extintores portátiles y equipos de protección personal, para que el personal pueda responder rápidamente en caso de emergencia.
- **Cumplimiento de Normativas y Estándares:** La estación de repostaje de hidrógeno debe cumplir con todas las normativas y estándares de seguridad establecidos por las autoridades competentes y organizaciones internacionales. Esto incluye el cumplimiento de códigos y reglamentos específicos para infraestructuras de hidrógeno y sistemas de almacenamiento y distribución.

En conclusión, el sistema de seguridad en una estación de repostaje de hidrógeno es fundamental para asegurar la confiabilidad y la aceptación pública de esta tecnología emergente. Mediante la implementación adecuada de sistemas de detección, prevención y respuesta a emergencias, así como la capacitación del personal y el cumplimiento de estándares, una estación de repostaje de hidrógeno puede operar de manera segura y contribuir significativamente a la promoción de una movilidad sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

### 3. Estudio energético de los componentes principales de la estación

Una vez conocido el funcionamiento y los equipos concretos que formaran parte de la estación es posible analizar el consumo de todos los elementos de la estación.

El dimensionamiento del consumo energético horario de la estación permitirá estudiar la conexión a red necesaria para el correcto funcionamiento de la estación y el sistema de back up necesario para proporcionar energía a la planta en caso de caída de la red.

Este análisis no incluirá los equipos auxiliares, esto es debido a que su consumo es por un lado marginal y depende de la configuración exacta de los mismos y dicha definición queda fuera de este proyecto.

#### 3.1. Análisis de equipos y consumos

Para determinar el consumo de la estación de repostaje primero realizaremos un sumario con los distintos equipos principales seleccionados de la estación juntamente con los datos de consumo eléctrico que nos ofrece el fabricante para las condiciones en las que trabajaran.

Este sumario nos permitirá conocer las demandas de cada sistema.

Tabla 17: Características de los equipos principales que forman parte de la estación de repostaje

Equipo	Consumo [kW]
Electrolizador	6000
Grupo de compresión de media presión	100
Grupo de compresión de Alta presión	175
Grupo de refrigeración de compresión de media presión	62
Grupo de refrigeración de compresión de Alta presión	57
Sistema de repostaje	174

Una vez conocidas las exigencias por equipamiento implementamos una tabla horaria para ver el consumo horario de la estación en el primer día segregado por cada equipamiento.

Tabla 18: Consumo energético horario desglosado de la estación de repostaje

		Consumo horario de los diferentes equipos por cada hora del día en [kWh]								
		Compresor alta presión		Compresor de media presión		Energía utilizada en el repostaje	Energía de los elementos auxiliares	Electrolizador	Energía total sin electrolizador [kWh]	Energía total con electrolizador [kWh]
		C.A.Compresión	C.A.Refrigeración	C.M.Compresión	C.M.Refrigeración					
Dia 1	0:00:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0,00	0,00
	1:00:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0,00	0,00
	2:00:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0,00	0,00
	3:00:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0,00	0,00
	4:00:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0,00	0,00
	5:00:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0,00	0,00
	6:00:00	0,00	0,00	0,00	0	49,6	7,44	0	49,60	57,04
	7:00:00	0,00	0,00	0,00	0	99,2	14,88	0	99,20	114,08
	8:00:00	75,60	26,60	42,90	24,7	124	18,6	0	293,80	312,40
	9:00:00	151,20	53,20	85,80	49,4	173,6	26,04	0	513,20	539,24
	10:00:00	175,50	61,75	99,00	57	148,8	22,32	3456	542,05	4020,37
	11:00:00	175,50	61,75	99,00	57	99,2	14,88	5824	492,45	6331,33
	12:00:00	175,50	61,75	99,00	57	99,2	14,88	5824	492,45	6331,33
	13:00:00	175,50	61,75	99,00	57	99,2	14,88	5824	492,45	6331,33
	14:00:00	175,50	61,75	99,00	57	99,2	14,88	5824	492,45	6331,33
	15:00:00	175,50	61,75	99,00	57	99,2	14,88	5824	492,45	6331,33
	16:00:00	175,50	61,75	99,00	57	99,2	14,88	5824	492,45	6331,33
	17:00:00	175,50	61,75	99,00	57	148,8	22,32	5824	542,05	6388,37
	18:00:00	175,50	61,75	99,00	57	148,8	22,32	5824	542,05	6388,37
	19:00:00	175,50	61,75	99,00	57	124	18,6	5824	517,25	6359,85
	20:00:00	175,50	61,75	99,00	57	99,2	14,88	5824	492,45	6331,33
	21:00:00	175,50	61,75	99,00	57	49,6	7,44	5824	442,85	6274,29
	22:00:00	175,50	61,75	99,00	57	0	0	5824	393,25	6217,25
	23:00:00	175,50	61,75	99,00	57	0	0	5824	393,25	6217,25

Este consumo puede disgregarse en dos tipologías principales, el consumo mayoritario, producido por el electrolizador, el consumo de todos los elementos auxiliares.

Tabla 19: Consumo de la estación de repostaje por usos

Uso	Consumo [kWh]
<b>Consumo total máximo</b>	6388,4
<b>Consumo máximo del electrolizador</b>	5824
<b>Consumo máximo de los elementos auxiliares</b>	542

Utilizando el consumo general podemos dimensionar el punto de conexión a red de la estación que deberá ser de aproximadamente 6,5 MW.

### 3.2. Sistema de back up eléctrico

En el contexto de una hidrogenera, donde se busca proporcionar hidrógeno como fuente de energía limpia para vehículos, la implementación de un sistema de back up eléctrico adquiere una importancia crucial. Este sistema tiene como objetivo garantizar la continuidad de la operación de la estación, incluso en situaciones en las que se produzca una interrupción en el suministro eléctrico de la red principal. Si bien no se plantea suplir la potencia necesaria para el funcionamiento del electrolizador, el sistema de back up permitirá alimentar los consumos eléctricos de los sistemas auxiliares durante un día de funcionamiento.

La necesidad de contar con un sistema de back up eléctrico se debe a la importancia de mantener la disponibilidad del hidrógeno como combustible alternativo para los vehículos. En caso de que se produzca una caída en el punto de conexión a la red eléctrica, ya sea por problemas técnicos, cortes de energía o cualquier otro evento imprevisto, la estación no podrá suministrar hidrógeno a los vehículos, lo que afectaría su funcionamiento y la confianza de los usuarios en esta tecnología.

La instalación de un sistema de back up eléctrico permitirá superar estos obstáculos y asegurar el suministro constante de hidrógeno. Este sistema estará diseñado para alimentar los consumos eléctricos de los sistemas durante al menos 12 horas funcionamiento, lo que incluye la iluminación, los sistemas de control y monitorización, así como los equipos de seguridad. Si bien no se contempla suplir la potencia necesaria para el funcionamiento del electrolizador y los compresores, se garantizará que los sistemas críticos de la estación sigan funcionando, brindando un ambiente seguro y operativo.

La implementación de un sistema de back up eléctrico no solo asegura la continuidad de la operación de la hidrogenera, sino que también ofrece tranquilidad y confiabilidad a los usuarios y a los actores involucrados en el desarrollo de la infraestructura del hidrógeno. Además, este sistema brinda una mayor resiliencia ante posibles eventos adversos, como cortes de energía o fallas en la red eléctrica, minimizando el impacto en la prestación del servicio y en la reputación de la estación.

En este apartado, se explorarán en detalle las características y requisitos necesarios para la implementación del sistema de back up eléctrico en la hidrogenera, así como los beneficios y consideraciones que se deben tener en cuenta para garantizar su correcto funcionamiento y la continuidad de la operación.

### 3.2.1. Componentes del sistema de Back Up

En este apartado, se detallarán los componentes necesarios para la implementación del sistema de back up basado en hidrógeno en la propia hidrogenera. Dado que el objetivo es utilizar el hidrógeno disponible en la estación, evitando el uso de combustibles fósiles, se aprovechará una de las muchas aplicaciones de este vector energético.

El sistema de back up se basará en una pila de combustible o fuel cell, que será capaz de satisfacer todas las necesidades auxiliares de la estación, incluyendo el repostaje de vehículos durante un período de un día, el tiempo que están dimensionadas las reservas de Hidrógeno a presión para durar. Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten directamente la energía química del hidrógeno y el oxígeno en electricidad, sin generar emisiones contaminantes. Esta tecnología es ideal para respaldar la operación de la estación y garantizar el suministro continuo de energía.

El sistema se alimentará directamente del buffer de baja presión que se ha definido en la estación. Dado que estos sistemas pueden ser alimentados con hidrógeno a baja presión en un rango de 9 a 30 bares, se aprovechará el almacenamiento de hidrógeno en la estación y se utilizará el buffer de baja presión como fuente de suministro para la pila de combustible. Esto permitirá utilizar el hidrógeno disponible en la estación de manera eficiente y evitará la necesidad de introducir otros combustibles o elementos en el sistema de back up.

Al utilizar una pila de combustible como componente principal del sistema de back up, se logrará una solución energéticamente eficiente y respetuosa con el medio ambiente. La pila de combustible generará electricidad de manera continua y silenciosa, sin producir emisiones contaminantes ni generar residuos. Además, al aprovechar el hidrógeno almacenado en la estación, se promoverá la utilización de este vector energético limpio y se evitará la dependencia de combustibles fósiles.

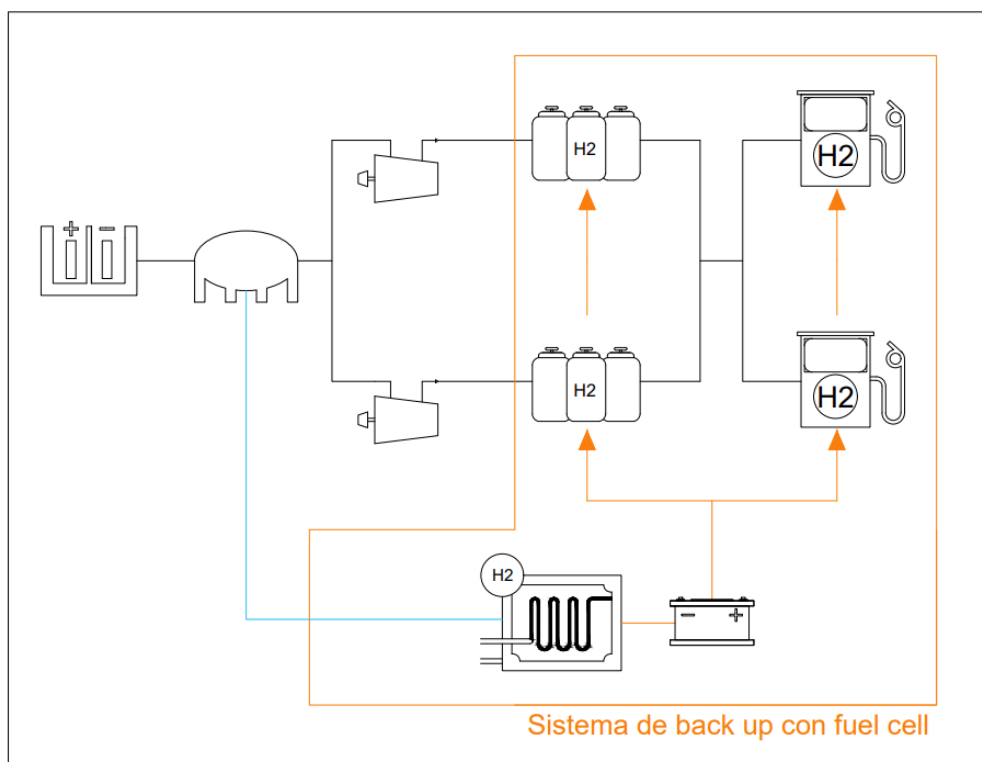


Ilustración 25: Esquema general del sistema de Back up de la estación de repostaje

### 3.2.2. Dimensionamiento del sistema de Back Up

Primero debemos obtener la potencia instantánea máxima que deberá suministrar el sistema, esta potencia será la que consuman los elementos auxiliares de la estación estudiada en el apartado 3.1, podemos ver en la tabla 18 que la energía máxima que deberemos proveer es de 173kW, si contemplamos un margen para el resto de elementos auxiliares que se puedan encontrar como por ejemplos la iluminación y a fin de que la pila funcione a menor carga, fijamos una potencia de pila de combustible de 200 kW.

En el funcionamiento de las pilas de combustible, esta potencia se refiere a la potencia nominal del equipo bajo la carga, adecuada para garantizar la mayor potencia con el mínimo consumo, es posible operar un equipo de fuel cell o pila de combustible de estas características a mayor potencia a cambio de una pérdida considerable de rendimiento.

También debemos fijar la cantidad total de energía que se utiliza en un día completo sin tener en cuenta los elementos de compresión y electrolisis a fin de determinar posteriormente el Hidrógeno mínimo que deberemos tener almacenado en el sistema, este lo conoceremos mediante la relación de eficiencia del sistema de pila de combustible y la potencia que contienen un kilogramo de Hidrógeno.

Tabla 20: Energía horaria consumida por la estación de repostaje y los sistemas auxiliares

Hora	Energía utilizada en el repostaje [kWh]	Energía de los sistemas auxiliares [kW]
0:00:00	0	0
1:00:00	0	0
2:00:00	0	0
3:00:00	0	0
4:00:00	0	0
5:00:00	0	0
6:00:00	49,6	7,44
7:00:00	99,2	14,88
8:00:00	124	18,6
9:00:00	173,6	26,04
10:00:00	148,8	22,32
11:00:00	99,2	14,88
12:00:00	99,2	14,88
13:00:00	99,2	14,88
14:00:00	99,2	14,88
15:00:00	99,2	14,88
16:00:00	99,2	14,88
17:00:00	148,8	22,32
18:00:00	148,8	22,32
19:00:00	124	18,6
20:00:00	99,2	14,88
21:00:00	49,6	7,44
22:00:00	0	0

23:00:00	0	0
----------	---	---

### 3.2.3. Selección del equipo de fuel cell y dimensionamiento del consumo

Como conocemos la potencia y el tiempo que queremos que la estación opere debemos determinar la cantidad total de energía que suplirá la estación esto lo realizaremos mediante los datos de la tabla 20.

Tabla 21: Energía total diaria por uso

Energía total repostaje [kWh]	Energía total auxiliares [kWh]
1760,8	264,12

Ahora definimos el sistema que utilizaremos para proporcionar dicha energía



#### HyShelter 240

- 3 pcs of PM Frame S43 integrated
- Installed Fuel Cell Power\*: 127,8 kW
- Installed battery system with up to 240 kW peak power
- Output Voltage: 230/400 VAC, 50 Hz
- Outdoor Use
- Off-grid power supply

\* Installed power at Begin of Life without self-consumption and without voltage adaption by DC/DC & DC/AC converters

Ilustración 26: Imagen i características del sistema re-electrificación de Hidrógeno de la empresa Proton Motor

Para realizar esta tarea se ha elegido un sistema de fuel cell diseñado por la empresa Proton Motor, capaz de suplir la energía deseada a la estación de repostaje, estos sistemas son escalables por lo que será necesario incluir dos unidades para suplir la potencia necesaria a la estación.

En esta tipología de sistemas no es la pila de combustible la que proporciona directamente la energía a la estación, sino que dicha transferencia se realiza mediante un sistema de baterías que son cargadas a través de la pila combustible, esta tipología de funcionamiento es también la utilizada en los vehículos propulsados por Hidrógeno y se debe principalmente al alto amperaje que producen las Fuel cell al transformar el Hidrógeno en energía, con este sistema es posible adaptar la energía de salida al formato de la red que la reciba.

Este sistema tiene una eficiencia del 53% en la conversión de potencia por lo tanto, teniendo en cuenta que este elemento contiene 33 kWh de energía por kg, serán las necesidades netas de Hidrógeno serán las mostradas en la tabla 22:

Tabla 22: Consumo horario de Hidrógeno del sistema de re-electrificación y energía eléctrica que proporciona

<b>Hora</b>	<b>Energía Total necesaria [kWh]</b>	<b>kg de H2 necesarios [kg]</b>
<b>0:00:00</b>	0	0,00
<b>1:00:00</b>	0	0,00
<b>2:00:00</b>	0	0,00
<b>3:00:00</b>	0	0,00
<b>4:00:00</b>	0	0,00
<b>5:00:00</b>	0	0,00
<b>6:00:00</b>	57,04	3,26
<b>7:00:00</b>	114,08	6,52
<b>8:00:00</b>	142,6	8,15
<b>9:00:00</b>	199,64	11,41
<b>10:00:00</b>	171,12	9,78
<b>11:00:00</b>	114,08	6,52
<b>12:00:00</b>	114,08	6,52
<b>13:00:00</b>	114,08	6,52
<b>14:00:00</b>	114,08	6,52
<b>15:00:00</b>	114,08	6,52
<b>16:00:00</b>	114,08	6,52
<b>17:00:00</b>	171,12	9,78
<b>18:00:00</b>	171,12	9,78
<b>19:00:00</b>	142,6	8,15
<b>20:00:00</b>	114,08	6,52
<b>21:00:00</b>	57,04	3,26
<b>22:00:00</b>	0	0,00
<b>23:00:00</b>	0	0,00
<b>Total kg</b>		<b>115,78</b>

Esta es la cantidad total de Hidrógeno que necesitaremos en la estación para seguir cargando vehículos, aunque la estación se detenga mediante el sistema de Fuel Cell.

Podemos ver en las tablas del funcionamiento del depósito de 30 Bares, tabla 9 que este ya contiene un remanente incluso mayor en cualquier momento de la operación, por lo que no será necesario su ampliación.

## 4. Reducción de emisión de contaminantes

En este apartado se pretende cuantificar el ahorro en emisiones que suponen este tipo de infraestructuras y combustibles renovables, respecto al uso de combustibles fósiles convencionales como son la gasolina y el diésel.

Para llevar a cabo esta tarea se definirá el CO2 equivalente que supondría suplir la demanda para la que se ha definido esta estación con un combustible convencional para el uso de movilidad pesada como es el diésel.

### 4.1. Conversión de demanda

Esta estación se ha dimensionado, según el apartado 2.2, para proveer 2200 kg de Hidrógeno al día o 800T al año.

Para suplir esta demanda mediante combustibles fósiles primero debemos determinar que cantidad de dicha energía es consumida realmente por el vehículo para propulsarse, este concepto se conoce como "Tank to Wheel efficiency" cuyos valores para vehículos de hidrógeno y diésel vemos reflejados en la tabla siguiente:

Tabla 23: Tank to Wheel efficiency

Vehículo	TTW (%)
Combustión interna	23
Pila de combustible	45

Si aplicamos el valor de la tabla a la energía que suponen 2200kg diarios de Hidrógeno obtendremos el valor energético real utilizado por los vehículos para su movilidad.

$$2200 \text{ kg de H}_2 * \frac{33 \text{ kWh}}{\text{kg de H}_2} * 0,45 = 32670 \text{ kWh}$$

Una vez conocemos la energía neta que deberemos suplir realizamos el mismo procedimiento inverso para transformarla en litros de combustible fósil.

$$\frac{32670 \text{ kWh}}{0,23} = 142.043,5 \text{ kWh}$$

Esta será la energía empleada en movilidad para suplir la misma demanda, pero mediante combustibles fósiles. Conocido este dato solo debemos definir a cantidad de combustible real corresponde. Dicha relación la encontramos en la capacidad energética que contine un litro de carburante diésel.

$$1 \text{ litro de diésel} = 10,7 \text{ kWh}$$

$$\frac{142.043,5 \text{ kWh}}{10,7 \text{ kWh} \cdot \text{1l de diésel}} = 13.275 \text{ litros de diésel}$$

Mediante estas relaciones concluimos que para suplir la demanda de esta estación con combustibles fósiles **son necesarios 13.275 litros por día de diésel o 4.845.375 litros anuales.**

## 4.2. Ahorro de emisiones

Una vez determinada la cantidad de combustible al que equivale dicha energía podemos determinar la cantidad de contaminantes que supone esa cantidad de combustible.

Para ello debemos determinar la cantidad de CO<sub>2</sub>Equivalente que contiene 1 litro de combustible diésel.

Antes pero definiremos el concepto de CO<sub>2</sub>e(CO<sub>2</sub> equivalente). El CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e) es una medida que se utiliza para expresar la cantidad total de gases de efecto invernadero (GEI) liberados a la atmósfera como resultado de una actividad o evento específico. Los GEI son gases que atrapan el calor en la atmósfera y contribuyen al fenómeno del calentamiento global, ya que aumentan el efecto invernadero y, en última instancia, elevan la temperatura promedio de la Tierra.

El CO<sub>2</sub> es el dióxido de carbono, uno de los principales gases de efecto invernadero emitidos por la quema de combustibles fósiles, deforestación, y otras actividades humanas y naturales. Sin embargo, existen otros gases de efecto invernadero, como el metano (CH<sub>4</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), entre otros, que también contribuyen al calentamiento global.

Cada uno de estos gases tiene un potencial de calentamiento global (PCG) diferente, que mide su capacidad para atrapar el calor en comparación con el dióxido de carbono. Por ejemplo, el metano tiene un PCG mucho mayor que el CO<sub>2</sub>, lo que significa que una cantidad más pequeña de metano tiene un impacto mayor en el calentamiento global.

Para comparar y sumar los efectos de distintos gases de efecto invernadero, se utilizan factores de conversión que expresan las emisiones de otros gases en términos de CO<sub>2</sub> equivalente. Por ejemplo, si una determinada actividad libera 1 tonelada de metano, se puede convertir esa cantidad a su equivalente en CO<sub>2</sub>, basándose en su PCG, y así tener una medida más uniforme y comprensible de las emisiones totales de GEI.

El CO<sub>2</sub> equivalente es una herramienta importante en la mitigación del cambio climático y en la formulación de políticas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y limitar el calentamiento global. Al medir y entender las emisiones en términos de CO<sub>2</sub> equivalente, es posible establecer objetivos más precisos para reducir el impacto climático de diversas actividades humanas y tomar decisiones informadas para proteger el medio ambiente.

Conocida su utilidad relacionamos este concepto con el combustible que nos ocupa, la cantidad de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e) emitida por la combustión de 1 litro de diésel depende de diversos factores, como la composición exacta del diésel y las condiciones de combustión. Sin embargo, se puede calcular una estimación general utilizando datos promedio.

El diésel es principalmente un hidrocarburo, compuesto principalmente de cadenas de carbono e hidrógeno. La reacción química de la combustión del diésel produce dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O) como productos principales, junto con pequeñas cantidades de otros compuestos, como óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y partículas.

El valor promedio utilizado para estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> por litro de diésel es de aproximadamente 2,68 kg de CO<sub>2</sub>e por litro de diésel. Esta cifra puede variar según la calidad y contenido energético del diésel, así como por las tecnologías y condiciones específicas de los motores en los que se utilice.

Conocido el valor promedio estimamos ahora el valor total de contaminantes que ahorramos:

$$\frac{2,68 \text{ kg de } CO_2}{1 \text{ litro de diésel}} \cdot 4.845.375 \text{ litros anuales} = \mathbf{13.809,3 \text{ Tn de } CO_2 \text{ equivalente por año}}$$

## 5. Análisis de costes

En este apartado, se abordará el análisis de costes en el contexto de la hidrogenera dimensionada en los anteriores apartados. El objetivo principal es comprender en detalle los aspectos económicos relacionados con la implementación y operación de una hidrogenera, con el fin de analizar los costes que puede acarrear esta infraestructura hoy en día.

El análisis de costes desempeña un papel fundamental en la planificación y desarrollo de una hidrogenera, ya que permite estimar los gastos involucrados en cada etapa del proyecto. En este apartado, se examinarán tanto los costes de inversión necesarios para construir y poner en funcionamiento la estación, como los costes operativos recurrentes asociados a su mantenimiento y suministro de hidrógeno, pero este análisis, debido a la gran ausencia de este tipo de estructuras se realizará mediante una aproximación porcentual de los costes de Opex, según las indicaciones de los fabricantes.

El primer aspecto para considerar son los costes de inversión, que abarcan una amplia gama de elementos, como la adquisición de terrenos, la construcción de las instalaciones, la compra y el montaje de equipos y tecnologías necesarios, así como la implementación de sistemas de almacenamiento y distribución de hidrógeno. Debido a que esta es una estructura tipo, se omitirá la parte de costes repercutidos a la adquisición de terrenos pues este parámetro dependerá en gran medida de la ubicación geográfica concreta de la estación.

### 5.1. Recopilación de equipos

En este apartado se resumirán en una tabla todos los equipos que se han seleccionado en los anteriores apartados y la cantidad de estos que serán necesarios en la estación según los estudios de producción y volumen llevados a cabo.

*Tabla 24: listado de equipos que forman parte de la estación de repostaje*

<b>Equipo</b>	<b>Unidades</b>
<b>Electrolizador</b>	5
<b>Compresor de media presión</b>	4
<b>Compresor de alta presión</b>	4
<b>Depósito de media presión</b>	A medida
<b>Depósito de alta presión</b>	A medida
<b>Depósito de baja presión</b>	2x740kg
<b>Sistema de repostaje</b>	2
<b>Sistema de Fuel cell</b>	2

## 5.2. Análisis de costes directos

En este apartado se analizarán todos los costes directos de los equipos, así como el mantenimiento respecto al coste porcentual que los equipos suponen.

Tabla 25: Tabla general de costes de OPEX Y CAPEX de los elementos que forman la estación de repostaje

Equipo	Unidades [Ud]	Coste unitario [€]	Coste total [€]	Coste mantenimiento porcentual [%]	Coste mantenimiento [€]
Electrolizador	5	1.450.000,00 €	7.250.000,00 €	3,00%	217.500,00 €
Compresor de media presión	4	246.000,00 €	984.000,00 €	4,00%	39.360,00 €
Compresor de alta presión	4	312.000,00 €	1.248.000,00 €	4,00%	49.920,00 €
Depósito de media presión	A medida	1.200.000,00 €	500.000,00 €	1,00%	12.000,00 €
Depósito de alta presión	A medida	1.200.000,00 €	500.000,00 €	1,00%	12.000,00 €
Depósito de baja presión	2x740kg	140.000,00 €	280.000,00 €	1,00%	2.800,00 €
Sistema de repostaje	2	460.000,00 €	920.000,00 €	3,00%	27.600,00 €
Sistema de Fuel cell	2	210.000,00 €	420.000,00 €	5,00%	21.000,00 €
<b>TOTAL</b>			<b>13.502.000,00 €</b>		
<b>Total de gastos operativos</b>			<b>382.180,00 €/año</b>		

### 5.3. Análisis de costes generales de la estación

A partir del coste general de la estación de repostaje es posible estimar el peso de las demás partidas que formaran parte de la ejecución de la estación mediante una aproximación porcentual de las mismas:

Tabla 26: Coste porcentual de las diferentes partidas

Partida	Porcentaje [%]	Coste
Equipamientos	--	13.502.000,00€
Ingeniería	20	2.700.400,00€
Obra civil	30	4.050.600,00€
<b>Total</b>		<b>20.253.000,00€</b>

### 5.4. Viabilidad económica

En este apartado se pretende calcular de forma simplificada la viabilidad económica de esta infraestructura, el cálculo simplificado es debido al hecho que para poder calcular la viabilidad de una infraestructura de estas características hay que realizar análisis económicos y de demanda detallados.

Para calcular verazmente la viabilidad económica de esta estación serán necesarios estimaciones de demanda precisas, conocimiento de las capacidades económicas de la persona o empresa que realice la inversión, definición del capital propio aportado, definición de las condiciones de crédito acordadas con las diferentes entidades bancarias, etc.

Las condiciones generales de costes serán las especificadas en el apartado anterior

#### 5.4.1. Coste por recarga

El objetivo principal de este apartado será la búsqueda del coste económico por kg de hidrogeno que causa que el punto muerto de la estación se encuentre en una vida útil de 20 años.

El punto muerto económico se alcanza cuando los ingresos por ventas o actividades cubren exactamente los costos variables y fijos asociados con la producción o operación. Los costos variables son aquellos que cambian en relación directa con el nivel de producción, mientras que los costos fijos son independientes del nivel de producción y deben ser cubiertos independientemente de si se generan ventas o no.

Superar el punto muerto económico implica que los ingresos exceden los costos totales, lo que resulta en ganancias. Por otro lado, operar por debajo del punto muerto económico significa que los ingresos son insuficientes para cubrir los costos, lo que resulta en pérdidas.

Calcular y entender el punto muerto económico es importante para la toma de decisiones empresariales, ya que permite determinar el nivel mínimo de ventas necesario para evitar pérdidas y proporciona información sobre la viabilidad financiera de una operación o proyecto en particular.

Para ello elaboraremos una cuenta de gastos/ beneficios simplificada a fin de encontrar el precio de venta de hidrogeno que produce que la estación llegue a un punto muerto (beneficios – gastos = 0) en el año número 20.

Para realizar este cálculo se han considerado, siguiendo con las premisas del apartado anterior:

- Un crédito sobre el 40% del capital de la estación a una tasa del 4%
- Una tasa de inflación de capital del 4%

- una renovación de equipos (necesaria para el continuo funcionamiento de la estación) del 50% del coste total en el año 12,
- una tarifa de cobro por recarga fija, no incrementaremos el coste durante la vida de la estación
- y finalmente un descenso de la producción anual de 1% a recuperar durante la puesta a punto del año 12 y un posterior decrecimiento correlativo.
- Para la compra de energía se ha considerado un precio incremental con la tasa de descuento propuesta de 40€/MWh el primer año.

Tabla 27: Flujos de caja para el punto muerto de los costes y veneficios del proyecto

Tasa de inflación	Intereses del prestamo	opex	Capex	Precio de venta [€]
0,04	0,04	382.180,00 €	20.253.000,00 €	6,72 €

Año	Opex[€]	Capex[€]	Credito[€]	H2[kg]	Ingresos H2[€]	Energia consumida[kWh]	Coste ponderado de la energia [€]
0	0,00 €	12.151.800,00 €	0,00 €				
1	382.180,00 €	0,00 €	405.060,00 €	800000,00	5.373.229,14 €	66000000	2.640.000,00 €
2	397.467,20 €	0,00 €	437.464,80 €	800000,00	5.373.229,14 €	66660000	2.666.400,00 €
3	413.365,89 €	0,00 €	472.461,98 €	800000,00	5.373.229,14 €	67326600	2.693.064,00 €
4	429.900,52 €	0,00 €	510.258,94 €	800000,00	5.373.229,14 €	67999866	2.719.994,64 €
5	447.096,54 €	0,00 €	551.079,66 €	800000,00	5.373.229,14 €	68679865	2.747.194,59 €
6	464.980,41 €	0,00 €	595.166,03 €	800000,00	5.373.229,14 €	69366663	2.774.666,53 €
7	483.579,62 €	0,00 €	642.779,31 €	800000,00	5.373.229,14 €	70060330	2.802.413,20 €
8	502.922,81 €	0,00 €	694.201,66 €	800000,00	5.373.229,14 €	70760933	2.830.437,33 €
9	523.039,72 €	0,00 €	749.737,79 €	800000,00	5.373.229,14 €	71468543	2.858.741,70 €
10	543.961,31 €	0,00 €	809.716,81 €	800000,00	5.373.229,14 €	72183228	2.887.329,12 €
11	565.719,76 €	0,00 €	874.494,16 €	800000,00	5.373.229,14 €	72905060	2.916.202,41 €
Sustitucion y reparacion de equipos antiguos	588.348,55 €	10.126.500,00 €	944.453,69 €	800000,00	5.373.229,14 €	66000000	2.640.000,00 €
12	611.882,49 €	0,00 €	1.020.009,99 €	800000,00	5.373.229,14 €	66660000	2.666.400,00 €
13	636.357,79 €	0,00 €	1.101.610,79 €	800000,00	5.373.229,14 €	67326600	2.693.064,00 €
14	661.812,10 €	0,00 €	1.189.739,65 €	800000,00	5.373.229,14 €	67999866	2.719.994,64 €
15	688.284,59 €	0,00 €	1.284.918,82 €	800000,00	5.373.229,14 €	68679865	2.747.194,59 €
16	715.815,97 €	0,00 €	1.387.712,33 €	800000,00	5.373.229,14 €	69366663	2.774.666,53 €
17	744.448,61 €	0,00 €	1.498.729,31 €	800000,00	5.373.229,14 €	70060330	2.802.413,20 €
18	774.226,56 €	0,00 €	1.618.627,66 €	800000,00	5.373.229,14 €	70760933	2.830.437,33 €
19	805.195,62 €	0,00 €	1.748.117,87 €	800000,00	5.373.229,14 €	71468543	2.858.741,70 €
20							

El precio de venta final para el punto muerto que hemos fijado en nuestra instalación a los 20 años es de **6,72 € por kg de Hidrógeno**, como es necesario procurar siempre un beneficio industrial para que las empresas construyan dichas infraestructuras, se incrementara el precio en un 35%, encontrando un precio final del Hidrogeno de **9,07 € el kg**.

#### **5.4.2. Comparación con un vehículo diésel**

En este apartado buscaremos el coste que supone para dos vehículos de características similares recorrer una distancia equivalente (energéticamente) mediante combustible fósil (diésel) e Hidrogeno. Esta diferencia se calculará mediante el precio de hidrogeno establecido en el apartado anterior y el precio actual de combustible diésel

Realizaremos una comparación de costes mediante el concepto de la eficiencia “tank to Wheel” mostrada en la tabla 23.

Para esta comparación fijamos un volumen de energía neto para los vehículos en movimiento; 200kWh (Esta energía representa la empleada para mover el vehículo en las ruedas).

Suponemos entonces dos vehículos, un diésel y uno de H2 con similares características que disponen de estos 200 kWh de energía neta para moverse en condiciones similares.

Calculamos cuanta energía bruta que será necesaria en el depósito del vehículo mediante la eficiencia “tank to Wheel”, esta será la energía necesaria para transmitir la energía neta a las ruedas del vehículo.

Lo calculamos para el supuesto de los 2 vehículos:

- H2: 200 kWh/45% eficiencia = 444,44 kWh en combustible H2
- Diésel: 200kWh/21% eficiencia = 952,4 kWh en combustible diésel

Ahora convertimos dicha energía en volúmenes netos de combustible para los dos casos:

- H2: 444,44KWh si 1kg de H2 contiene 33kWh en energía suponen 13,34 kg de H2
- Diésel: 952,4kWh si 1 litro de diésel contiene 10 kWh en energía suponen 89 litros de diésel

Ahora comparamos los costes de dicho combustible

- H2: según nuestro coste calculado (apartado 5.4.1) 13.34 kg de H2 a 9,07 €/kg de h2 suponen 121 €
- Diésel: según el coste actual del diese 1,58 €/litro de diésel suponen 140,6 €

Podemos concluir que el coste de la misma energía en hidrogeno supone una **rebaja aproximada del 13.6% en costes de combustible**.

#### **5.4.3. VAN y TIR**

En este apartado analizaremos respecto a los flujos de la tabla 27 pero teniendo en cuenta el nuevo precio de venta fijado de 9,07 €/kg de H2, como somos nosotros los que hemos fijado estos beneficios a partir de nuestro punto muerto conocemos de antemano que esta inversión será rentable, por ello estos indicadores solo servirán para mostrar la seguridad de la misma.

También es posible que en una instalación de estas características a tantos años vista nos encontremos con problemas no previstos o disminución del precio de venta por incremento de competencia, por ello es importante conocer los márgenes de seguridad con los que trabajaremos.

El Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) son dos herramientas financieras ampliamente utilizadas en la toma de decisiones de inversión y evaluación de proyectos. Ambas métricas son fundamentales para determinar la viabilidad económica de una inversión o proyecto, pero abordan diferentes aspectos y ofrecen perspectivas distintas. A continuación, se explica la importancia de cada uno:

**Valor Actual Neto (VAN):** El VAN es una medida que se utiliza para evaluar la rentabilidad de un proyecto o inversión en términos monetarios. Se calcula sumando todos los flujos de efectivo futuros esperados de un proyecto, descontados al valor presente utilizando una tasa de descuento adecuada. La tasa de descuento refleja el costo de oportunidad de los fondos invertidos y tiene en cuenta el riesgo asociado al proyecto.

La importancia del VAN radica en que proporciona una evaluación directa de cuánto valor neto se generará a partir de un proyecto en relación con el costo de capital. Un VAN positivo indica que el proyecto generará más valor del que cuesta financiarlo, lo que lo convierte en una inversión atractiva. Al comparar los VAN de diferentes proyectos, es posible identificar cuál de ellos ofrece la mejor rentabilidad en función de la inversión inicial y los flujos de efectivo esperados a lo largo del tiempo.

**Tasa Interna de Retorno (TIR):** La TIR es la tasa de descuento a la cual el VAN de un proyecto se vuelve igual a cero, es decir, es la tasa que iguala el valor presente de los flujos de efectivo con la inversión inicial. En otras palabras, la TIR es el rendimiento efectivo de una inversión, es la tasa a la cual los ingresos generados por el proyecto igualan su costo.

La importancia de la TIR radica en que ofrece una perspectiva porcentual del rendimiento de la inversión sin requerir la comparación directa con una tasa de descuento específica. Si la TIR es mayor que la tasa de descuento utilizada, el proyecto es rentable. Sin embargo, la TIR puede presentar limitaciones en el caso de proyectos con flujos de efectivo no convencionales, como cambios en los signos de los flujos a lo largo del tiempo.

En resumen, tanto el VAN como la TIR son cruciales para la toma de decisiones financieras y la evaluación de proyectos de inversión. El VAN brinda una evaluación en términos monetarios del valor neto generado por un proyecto en relación con el costo de capital, mientras que la TIR proporciona una medida porcentual del rendimiento de la inversión. Juntos, estos indicadores ayudan a los inversionistas y gerentes a determinar la viabilidad y la rentabilidad de los proyectos, permitiéndoles tomar decisiones informadas sobre dónde invertir sus recursos limitados.

Para nuestro proyecto se han calculado ambos indicadores mediante la herramienta de cálculo Excel, mediante los flujos y condiciones de la tabla 27 pero implementando el nuevo precio de venta establecido al final del apartado 5.4.1, encontramos los siguientes valores para ambos indicadores:

*Tabla 28 Indicadores VAN y Tir*

VAN	TIR
53.518.717,85 €	48%

## 6. Conclusiones y recomendaciones

### 6.1. Conclusiones

El presente trabajo de final de máster ha abordado el diseño, dimensionamiento y la selección de equipos comerciales para la implementación de una estación de repostaje de hidrógeno, una infraestructura clave en el contexto de la movilidad sostenible y la transición hacia una economía baja en carbono. A través del análisis de diversos aspectos técnicos y comerciales, se han extraído conclusiones que resaltan la relevancia y el potencial de esta tecnología emergente.

- **Contribución a la Sostenibilidad Energética:** La estación de repostaje de hidrógeno se presenta como una solución prometedora para abordar los desafíos energéticos y medioambientales del siglo XXI. La producción y el uso de hidrógeno como vector energético permiten una mayor integración de fuentes renovables, facilitando el almacenamiento y transporte de energía de manera eficiente.
- **Reducción de Emisiones:** La adopción de vehículos impulsados por celdas de combustible de hidrógeno asociados a una estación de repostaje permite una reducción significativa de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes locales, contribuyendo así a mejorar la calidad del aire y mitigar el cambio climático.
- **Desarrollo de una Infraestructura en Crecimiento:** Aunque la infraestructura de repostaje de hidrógeno aún se encuentra en fase de desarrollo, se observa un crecimiento sostenido en su implementación a nivel mundial. Esto se traduce en un aumento de la disponibilidad de estaciones de repostaje, lo que a su vez fomenta la adopción de vehículos de hidrógeno y la consolidación de esta tecnología.
- **Desafíos Técnicos y Económicos:** A pesar de sus beneficios, la implementación de una estación de repostaje de hidrógeno presenta desafíos técnicos y económicos. Aspectos como el costo de producción, almacenamiento y transporte del hidrógeno, así como la necesidad de optimizar la eficiencia de los procesos, requieren de un análisis continuo para alcanzar la viabilidad económica y competitividad en el mercado.
- **Seguridad y Educación Pública:** La seguridad en la operación de una estación de repostaje de hidrógeno es una preocupación primordial. Es fundamental establecer protocolos de seguridad sólidos, proporcionar una adecuada formación al personal y llevar a cabo campañas educativas dirigidas al público para eliminar mitos y aumentar la confianza en esta tecnología.
- **Cooperación y Marco Regulatorio:** La consolidación de la infraestructura de repostaje de hidrógeno requiere de una colaboración activa entre diferentes actores, incluyendo gobiernos, empresas, instituciones académicas y organizaciones internacionales. Asimismo, es necesario establecer un marco regulatorio claro y coherente que fomente la inversión y el desarrollo de proyectos relacionados con el hidrógeno.

En última instancia, el trabajo concluye que este tipo de infraestructuras son viables técnicas y comercialmente a día de hoy, siendo componentes fundamentales para acelerar la adopción de vehículos de hidrógeno y promover la movilidad sostenible a gran escala. A través de este proyecto es posible demostrar que actualmente contamos con la tecnología y los equipamientos disponibles en el mercado para poder implementar estas infraestructuras en la red española, si bien es posible encontrar dichos equipos en este proyecto se ha podido ver que estos todavía presentan un coste elevado y una implementación difícil que requiere de proyectos integrales de ingeniería a medida para su instalación.

## 6.2. Recomendaciones

Basado en los resultados y hallazgos obtenidos en el trabajo final de máster sobre una estación de repostaje de hidrógeno, se formulan las siguientes recomendaciones con el objetivo de optimizar la implementación y operación de esta infraestructura clave para la movilidad sostenible y la transición energética:

- **Investigación Continua:** Es fundamental promover la investigación y el desarrollo en torno al hidrógeno como vector energético. Se espera que tanto entidades públicas como privadas inviertan en proyectos de investigación para mejorar la eficiencia de los procesos de producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno, así como para explorar nuevas tecnologías que puedan reducir los costos asociados.
- **Fomentar Incentivos y Subsidios:** Para impulsar la adopción de vehículos de hidrógeno y la construcción de estaciones de repostaje, se espera que los gobiernos implementen incentivos y subsidios financieros, algunos de estos ya empiezan a aflorar a través de líneas de subvenciones PERTE. Estos incentivos pueden incluir exenciones fiscales, tarifas preferenciales para el uso de hidrógeno, fondos de inversión y programas de apoyo a la investigación y desarrollo.
- **Colaboración Público-Privada:** Es esencial fomentar la colaboración entre el sector público y privado para acelerar la implementación de estaciones de repostaje de hidrógeno. La cooperación entre gobiernos, empresas, instituciones académicas y organizaciones sin fines de lucro puede generar sinergias y facilitar la resolución de desafíos técnicos y económicos.
- **Estándares y Regulación:** Se espera una maduración y establecimiento de normativas y estándares claros y coherentes para la construcción y operación de estaciones de repostaje de hidrógeno. Un marco regulatorio sólido proporcionará seguridad jurídica a los inversores y promoverá el desarrollo de una infraestructura de hidrógeno más segura y confiable.
- **Campañas de Concienciación:** Para aumentar la aceptación y confianza en el hidrógeno como alternativa de energía limpia, se sugiere llevar a cabo campañas de concientización dirigidas al público en general. Estas campañas pueden desmitificar conceptos erróneos sobre la seguridad del hidrógeno y destacar sus beneficios ambientales y energéticos.
- **Integración con Energías Renovables:** Se recomienda impulsar la integración de las estaciones de repostaje de hidrógeno con fuentes de energía renovable. Esto puede lograrse mediante la producción de hidrógeno a partir de energías limpias como la solar, eólica o hidroeléctrica, lo que mejorará aún más la huella de carbono del hidrógeno producido.
- **Monitoreo y Mantenimiento:** El monitoreo continuo y el mantenimiento regular de las estaciones de repostaje son esenciales para asegurar su funcionamiento óptimo y la seguridad del personal y los usuarios. Se recomienda implementar sistemas de mantenimiento predictivo y llevar a cabo inspecciones periódicas para detectar y prevenir posibles problemas.

En conclusión, implementar una estación de repostaje de hidrógeno exitosa requiere de una estrategia integral que abarque aspectos técnicos, económicos, regulatorios y de concientización, es especialmente relevante tener una gran planificación respecto los sistemas auxiliares y el entorno mismo de la estación a fin de poder realizar un proyecto adecuado y funcional con las máximas garantías. Siguiendo estas recomendaciones, se puede avanzar en la consolidación de una infraestructura de hidrógeno confiable, segura y respetuosa con el medio ambiente, contribuyendo así a un futuro más sostenible y descarbonizado.

## 7. Bibliografía

- Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 de España. (s.f.). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Recuperado el 5 de abril de 2023, de [https://www.miteco.gob.es/es/energia/pniec/pniec\\_2030.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/energia/pniec/pniec_2030.aspx)
- Pacto Verde Europeo de la Unión Europea. (s.f.). Comisión Europea. Recuperado el 5 de abril de 2023, de [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_es](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es)
- Estrategia de Movilidad Sostenible e Inteligente de la Unión Europea. (s.f.). Comisión Europea. Recuperado el 5 de abril de 2023, de [https://ec.europa.eu/transport/themes/mobility-strategy-urban-mobility\\_es](https://ec.europa.eu/transport/themes/mobility-strategy-urban-mobility_es)
- Comisión Europea. (2021). Fit for 55 climate package. Recuperado el 5 de abril de 2023, de [https://ec.europa.eu/info/publications/fit-55-climate-package\\_en](https://ec.europa.eu/info/publications/fit-55-climate-package_en)
- Comisión Europea. (2020). European Green Deal: EU Commission launches a €1 trillion investment plan. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_20\\_416](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_20_416)
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). Estrategia de Almacenamiento Energético. <https://www.miteco.gob.es/es/energia/almacenamientoenergetico/estrategia-almacenamiento-energetico.aspx>
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2021). Estrategia de Movilidad Segura, Sostenible y Conectada 2030. <https://www.mitma.gob.es/el-ministerio/estrategia-de-movilidad-segura-sostenible-y-conectada-2030>
- European Hydrogen Strategy. (2020). A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. [https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/hydrogen\\_strategy.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/hydrogen_strategy.pdf)
- Que es el Hidrógeno verde y su importancia – Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/Hidrógeno-verde>
- Hidrógeno, de las estrellas a tus células, Agencia SINC. <https://www.agenciasinc.es/Visual/Ilustraciones/Hidrógeno-de-las-estrellas-a-tus-celulas#:~:text=El%20hidr%C3%B3geno%20participa%20en%20muchos,y%20pueden%20eliminar%20sus%20desechos.>
- Importancia del Hidrógeno – Importancia.org. <https://www.importancia.org/Hidrógeno.php>
- La importancia del Hidrógeno en la transición energética – ARIEMA. <https://www.ariema.com/el-Hidrógeno-en-la-transicion-energetica>
- ¿Qué es el Hidrógeno? – CNH2. <https://www.cnh2.es/el-Hidrógeno/>
- Primera imagen en alta resolución del borde de la nube molecular de Orión – CSIC – Publicación el séptimo cielo. <https://elseptimocielo.fundaciondescubre.es/noticias/primera-imagen-en-alta-resolucion-del-borde-de-la-nube-molecular-de-orion/>
- National Geographic. (s.f.). Propiedades del hidrógeno (H). Recuperado el 6 de abril de 2023, de [https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-Hidrógeno-h\\_18653](https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-Hidrógeno-h_18653)
- Fundamentos del Hidrógeno gaseoso. Energiasostenible.net [http://www.energiasostenible.net/fundamentos\\_Hidrógeno.htm](http://www.energiasostenible.net/fundamentos_Hidrógeno.htm)
- Ertl, G. (2008). Reactions at Surfaces: From Atoms to Complexity (Nobel Lecture). Angewandte Chemie International Edition, 47(19), 3524-3535. doi: 10.1002/anie.200800180

- Gómez-Sainero, L. M., Palacios, J. M., Pérez-Ferreras, S., & Valverde, J. L. (2021). Power to Ammonia: A Review of Renewable Ammonia Production Pathways. *Sustainability*, 13(11), 6237. doi: 10.3390/su13116237
- Hirsch, D., Teichmann, D., Schiebahn, S., Richter, M., & Schmid, S. (2020). Renewable Ammonia for Power-to-X Applications—A Review of Technology, Costs, and Applications. *Energies*, 13(17), 4345. doi: 10.3390/en13174345
- Klerke, A., Christensen, C. H., & Nørskov, J. K. (2005). Ammonia for hydrogen storage: challenges and opportunities. *Journal of Materials Chemistry*, 15(48), 4984-4991. doi: 10.1039/b511962c
- Sattler, J. J. H. B., Ruiz-Martinez, J., Santillan-Jimenez, E., Wezendonk, T. A., & Gascon, J. (2019). Ammonia as a suitable fuel for fuel cells. *Chemical Society Reviews*, 48(3), 712-744. doi: 10.1039/c8cs00392j

## 8. Anexos

### 8.1. Cálculo del Gráfico de Distribución

Se recogen los datos de los distintos gráficos abiertos que proporcionan las funciones de Google y se les asignan valores.

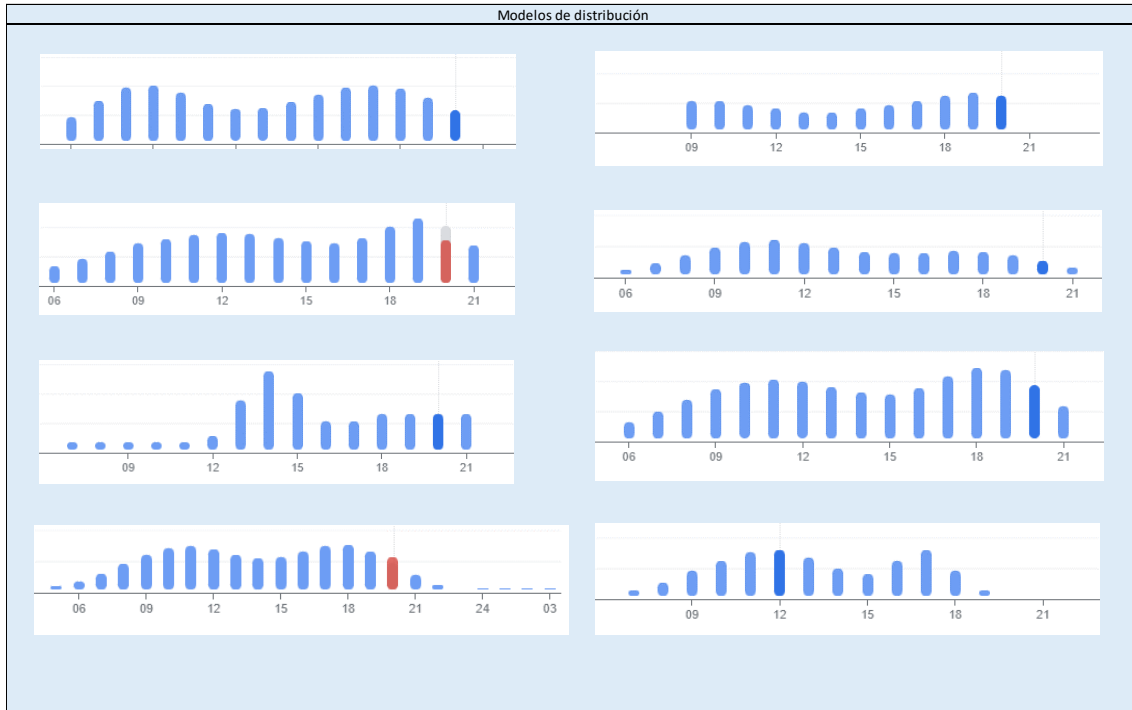


Ilustración 27: Datos de concurrencia de estaciones de repostaje de los polígonos de Tarragona

A cada gráfico se le asignan valores de concurrencia según su gráfico y se representan mediante tablas:

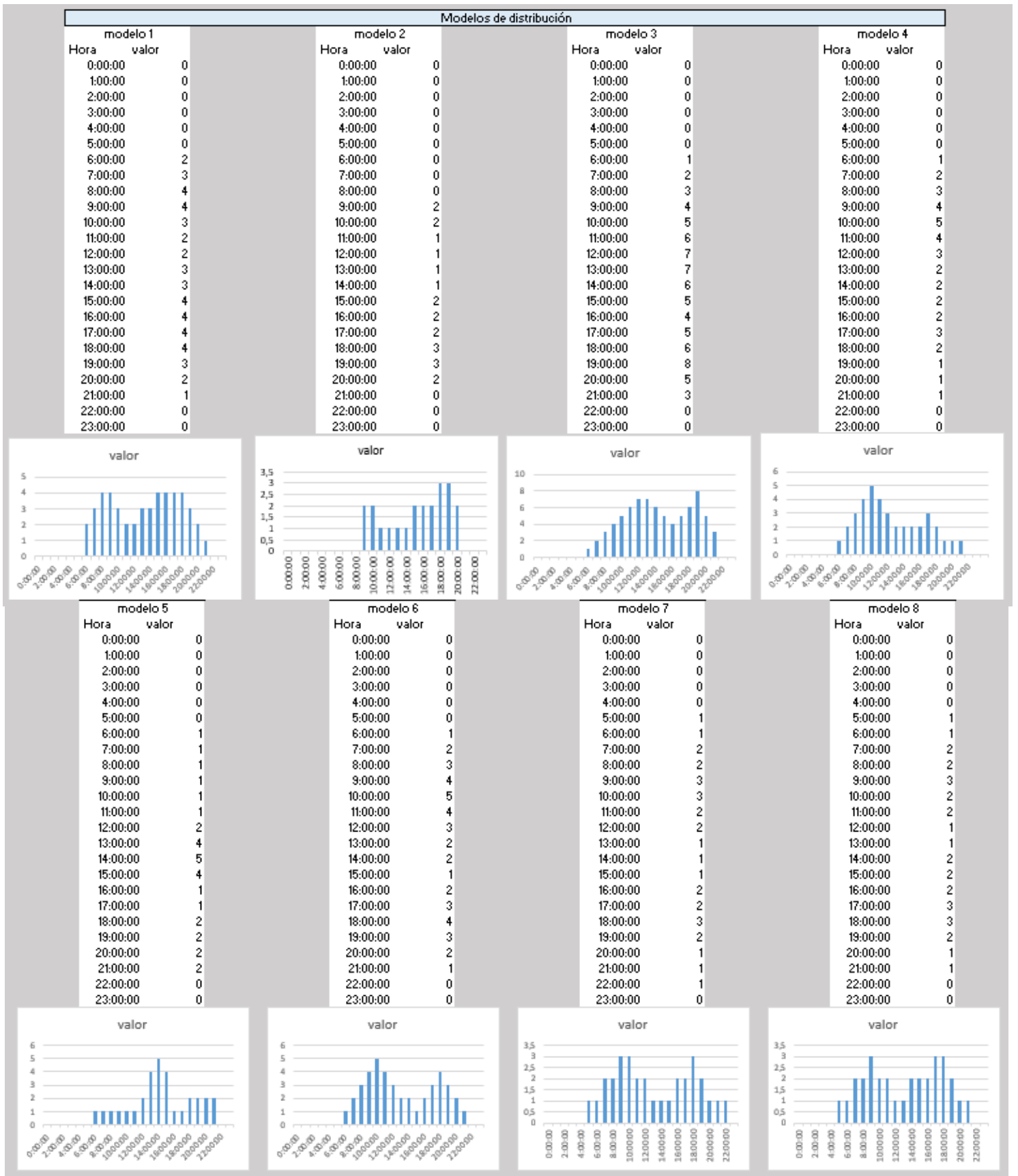


Ilustración 28: Tablas de referencia para la distribución del perfil de demanda

Se extrae mediante una mediana el gráfico estandarizado basándonos en las tablas de los modelos y se le asigna su peso porcentual a cada franja horaria:

Tabla 29: Perfil de demanda horario porcentual

Hora	Porcentaje
0:00:00	0,00%
1:00:00	0,00%
2:00:00	0,00%
3:00:00	0,00%
4:00:00	0,00%
5:00:00	0,00%
6:00:00	2,82%
7:00:00	5,63%
8:00:00	7,04%
9:00:00	9,86%
10:00:00	8,45%
11:00:00	5,63%
12:00:00	5,63%
13:00:00	5,63%
14:00:00	5,63%
15:00:00	5,63%
16:00:00	5,63%
17:00:00	8,45%
18:00:00	8,45%
19:00:00	7,04%
20:00:00	5,63%
21:00:00	2,82%
22:00:00	0,00%
23:00:00	0,00%

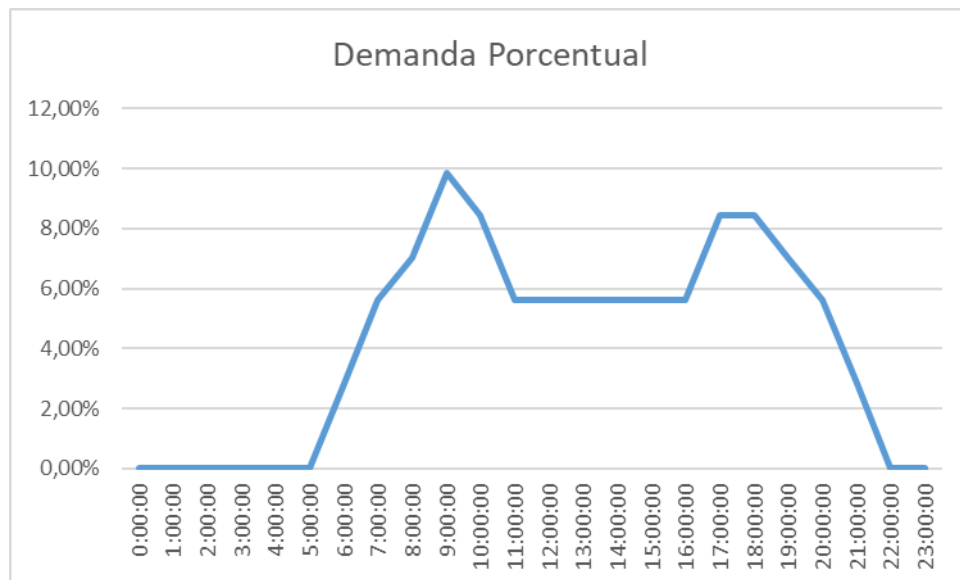


Ilustración 29: Perfil de demanda horario porcentual

## 8.2. Cálculo del factor de compresibilidad

Se busca en una referencia los valores de z para diferentes presiones y temperaturas.

Presión (bar)	Temperatura (K)						
	250	273.15	298.15	350	400	450	500
1	1.00070	1.00040	1.00060	1.00055	1.00047	1.00041	1.00041
5	1.00337	1.00319	1.00304	1.00270	1.00241	1.00219	1.00196
10	1.00672	1.00643	1.00605	1.00540	1.00484	1.00435	1.00395
50	1.03387	1.03235	1.03037	1.02701	1.02411	1.02159	1.01957
100	1.06879	1.06520	1.06127	1.05369	1.04807	1.04314	1.03921
150	1.10404	1.09795	1.09189	1.08070	1.07200	1.06523	1.05836
200	1.14056	1.13177	1.12320	1.10814	1.09631	1.08625	1.07849
250	1.17789	1.16617	1.15499	1.13543	1.12034	1.10793	1.08764
300	1.21592	1.20101	1.18716	1.16300	1.14456	1.12957	1.11699
350	1.25461	1.23652	1.21936	1.19051	1.16877	1.15112	1.13648
400	1.29379	1.27220	1.25205	1.21842	1.19317	1.17267	1.15588
450	1.33332	1.30820	1.28487	1.24634	1.21739	1.19439	1.17533
500	1.37284	1.34392	1.31784	1.27398	1.24173	1.21583	1.19463
600	1.45188	1.41618	1.38797	1.33010	1.29040	1.25920	1.23373
700	1.53161	1.48880	1.44991	1.38593	1.33914	1.30236	1.27226

Ilustración 30: tabla de referencias perfil de z según temperatura y presión

Se reproduce en un gráfico su comportamiento respecto a la situación ideal  $z=1$

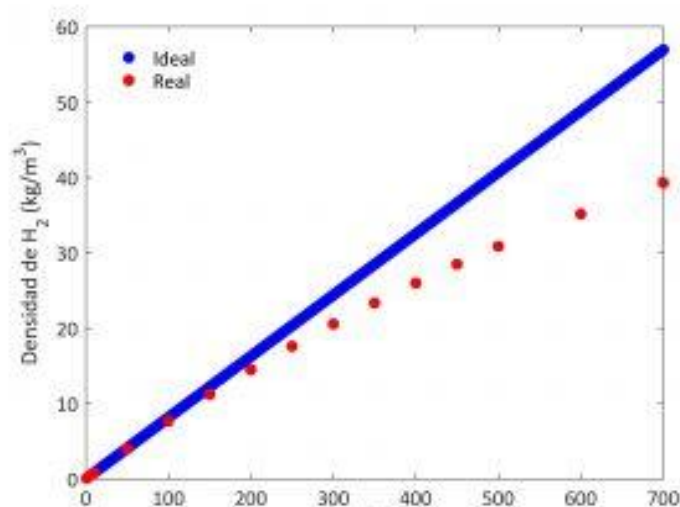


Ilustración 31: Gráfico de comparación del comportamiento de la densidad de un gas ideal vs un gas real debido al factor z según la presión

Podemos ver en el grafico que a partir de los 100 Bar es necesario tener en cuenta el comportamiento de la z no ideal en la ecuación de gases.

Se realiza mediante la regresión con Excel de la tabla anterior una ecuación de aproximación de z dependiente de la P para nuestra temperatura estandarizada del sistema de 298,15K

$$z = 5E - 08 \cdot P^2 + 0,0006 * P[Bar] + 0,9971$$

## 9. Índices

### 9.1. Índice de tablas

Tabla 1: Perfil de demanda numérico elaborado según los cálculos del anexo, apartado 8.1 .....	15
Tabla 2: Datos del perfil de carga y proveniencia de cada kg de Hidrógeno .....	18
Tabla 3: Movimiento horario del Hidrógeno desde el depósito de 300 Bar hasta el surtidor .....	19
Tabla 4: Evolución horaria de la presión en el depósito de 300 Bar .....	21
Tabla 5: Movimiento horario del Hidrógeno desde el depósito de 500 Bar hasta el surtidor .....	22
Tabla 6: Evolución de la presión Horaria en el depósito de 500 Bar .....	23
Tabla 7: Hidrógeno horario que debe aportar el buffer de baja presión .....	24
Tabla 8: Análisis horario del primer día. Movimiento de Hidrógeno entre los equipos contando su generación .....	25
Tabla 9: Análisis horario del segundo día. Movimiento de Hidrógeno entre los equipos contando su generación.....	26
Tabla 10: Evolución de la presión del Hidrógeno en el buffer de baja presión.....	27
Tabla 11: Cantidades horarias de Hidrógeno que se extraen de cada depósito .....	28
Tabla 12: Evolución del Hidrógeno que proveerá el sistema de media presión; cantidad [kg] y presión [Bar].....	29
Tabla 13: Evolución del Hidrógeno que proveerá el sistema de alta presión; cantidad [kg] y presión [Bar].....	31
Tabla 14: Características principales de los electrolizadores según su tecnología de funcionamiento. Tabla extraída del reporte "The Future of Hydrogen" preparado por el IEA para el G20, Japón – 2019, June .....	32
Tabla 15: Características principales de los diferentes tipos de depósitos de Hidrógeno según su categoría .....	35
Tabla 16: Características y coste del electrolizador presentados por CPH2.....	37
Tabla 17: Características de los equipos principales que forman parte de la estación de repostaje .....	53
Tabla 18: Consumo energético horario desglosado de la estación de repostaje .....	54
Tabla 19: Consumo de la estación de repostaje por usos .....	55
Tabla 20: Energía horaria consumida por la estación de repostaje y los sistemas auxiliares .....	57
Tabla 21: Energía total diaria por uso .....	58
Tabla 22: Consumo horario de Hidrógeno del sistema de re-electrificación y energía eléctrica que proporciona .....	59
Tabla 23: Tank to Wheel efficiency.....	60
Tabla 24: listado de equipos que forman parte de la estación de repostaje .....	63
Tabla 25: Tabla general de costes de OPEX Y CAPEX de los elementos que forman la estación de repostaje.....	64
Tabla 26: Coste porcentual de las diferentes partidas .....	65
Tabla 27: Flujos de caja para el punto muerto de los costes y veneficios del proyecto .....	67
Tabla 28 Indicadores VAN y Tir.....	69
Tabla 29: Perfil de demanda horario porcentual.....	76

## 9.2. Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Imagen de las estaciones de repostaje del área de Tarragona y sus polígonos.....	12
Ilustración 2: Perfiles de demanda extraídos de las estaciones de repostaje, mediante la información de Google.....	13
Ilustración 3: Perfil de repostaje modelo, realizado según el Anexo 8.1 Calculo del gráfico de distribución.....	13
Ilustración 4: Hyundai Xcient Fuel .....	14
Ilustración 5: Características principales del Hyundai Xcient Fuel Cell.....	14
Ilustración 6: Composición interna de un electrolizador Alcalino .....	33
Ilustración 7: Composición interna de un electrolizador PEM .....	34
Ilustración 8: Estructura y armazón de los diferentes tipos de depósitos de Hidrógeno .....	34
Ilustración 9: Esquema de la planta de repostaje .....	35
Ilustración 10: Imagen del electrolizador en container de CPH2.....	36
Ilustración 11: Imagen interior del electrolizador de CPH2.....	37
Ilustración 12: Imagen de un depósito horizontal de Hidrógeno fabricado por Lapesa S.A.....	38
Ilustración 13: Características estandarizadas de los depósitos de Hidrógeno fabricados por Lapesa .....	39
Ilustración 14: Compresor Hiperbaric.....	40
Ilustración 15: Imagen de un rack de depósitos de H2.....	41
Ilustración 16: Características del sistema de refrigerio que la empresa Alfa Laval proporciona a los fabricantes para incluir en los equipos de repostaje de H2.....	42
Ilustración 17: Imagen del surtidor de H2 confeccionado por Calvera S.A.....	42
Ilustración 18: Esquema completo de la estación de repostaje .....	44
Ilustración 19: Ubicación del sistema de filtrado de agua en un electrolizador .....	46
Ilustración 20: Esquema de flujo del agua .....	47
Ilustración 21: Sistema de abastecimiento de agua múltiple.....	48
Ilustración 22: Imagen de un Evaporador .....	49
Ilustración 23: Imagen de una balsa de evaporación.....	50
Ilustración 24: Esquema del flujo de agua vertido a cauce .....	50
Ilustración 25: Esquema general del sistema de Back up de la estación de repostaje.....	56
Ilustración 26: Imagen i características del sistema re-electrificación de Hidrógeno de la empresa Proton Motor .....	58
Ilustración 27: Datos de concurrencia de estaciones de repostaje de los polígonos de Tarragona .....	74
Ilustración 28: Tablas de referencia para la distribución del perfil de demanda .....	75
Ilustración 29: Perfil de demanda horario porcentual .....	76
Ilustración 30: tabla de referencias perfil de z según temperatura y presión .....	77
Ilustración 31: Grafico de comparación del comportamiento de la densidad de un gas ideal vs un gas real debido al factor z según la presión.....	77