



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Diseño y desarrollo de una hidrogenera como parte de un
laboratorio "Zero emisiones"

Design and development of a hydrogen station as part of a "Zero
Emissions" laboratory

Autor

Juan Morillo Carnicero

Director

Alejandro Gutiérrez Robledo

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2025

Diseño y desarrollo de una hidrogenera como parte de un laboratorio "Zero emisiones"

RESUMEN

El Instituto Tecnológico de Aragón tiene en sus instalaciones un banco de electrolizadores para la producción de hidrógeno verde y una cabeza tractora propulsada por pila de combustible a 350 bar. Con la finalidad de poder abastecer el camión con su propia producción de hidrógeno nace este proyecto de hidrogenera, que se complementa con la posibilidad de realizar pruebas de los distintos equipos que la componen, investigación en líneas relacionadas con el dispensado y almacenamiento de hidrógeno y formará parte de un laboratorio "Zero emisiones", una *microgrid* pensada para analizar soluciones del futuro de la distribución energética.

La realización de este proyecto se basa en la definición de hidrogenera según las especificaciones del Instituto, el dimensionado y la selección de los componentes y equipos comerciales y la comprobación de estos mediante cálculos. Además, se ha realizado una simulación complementaria para contrastar los resultados obtenidos. También se ha recopilado la legislación de aplicación y se ha hecho una búsqueda de normativa no exhaustiva.

El diseño de la hidrogenera se ha basado en la Metodología VinCi para proyectos de sistemas mecatrónicos empleada en el ITA, que se divide en varias fases, incluyendo la definición de especificaciones, diseño conceptual y diseño detallado.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1 Introducción y contexto	4
1.2 Objetivo y alcance del proyecto	5
2. ESTADO DEL ARTE	6
2.1 Hidrógeno como vector energético	6
2.2 Proceso dispensación	7
2.3 Descripción de una hidrogenera	10
2.3.1 Esquema	10
2.3.2 Compresión	11
2.3.3 Almacenamiento alta presión	15
2.3.4 Dispensación	19
2.3.5 Enfriamiento	20
3. DESARROLLO DEL PROYECTO	22
3.1 Metodología	22
3.2 Definición de especificaciones	23
3.3 Generación de conceptos	27
3.4 Diseño conceptual	28
3.4.1 Configuraciones propuestas	29
3.5 Diseño mecánico detallado	31
3.5.1 Normativa	31
3.5.2 Compresor	32
3.5.3 Almacenamiento en cascada	33
3.5.4 Sistema de dispensación	40
3.5.5 Tuberías	42
3.5.6 Almacenamiento inicial	44
3.5.7 Instrumentación	45
3.5.8 Simulación	47
3.5.9 Presupuesto	48
4. CONCLUSIÓN	50
5. BIBLIOGRAFÍA	51
6. ANEXO I. SOFTWARE H2FILLS	52

1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO

El hidrógeno es el elemento químico más simple y abundante del universo. Se encuentra principalmente en forma de gas hidrógeno (H_2) y además aparece unido a otros elementos formando gran variedad de compuestos químicos, como el agua (H_2O). A temperatura y presión estándar, se encuentra como un gas incoloro, inodoro e insípido, pero inflamable. Las propiedades del hidrógeno lo convierten en un elemento renovable capaz de proporcionar energía segura, económicamente competitiva y libre de emisiones de CO_2 . El hidrógeno se considera un vector energético, es decir un medio para almacenar y transportar energía.

Este elemento ofrece beneficios sostenibles en toda la cadena de valor. Según el proceso de producción, el hidrógeno puede ser particularmente respetuoso con el medio ambiente y ayudar a combatir el cambio climático. Se puede almacenar, transportar largas distancias y utilizar como vector energético en una amplia variedad de formas, desde el suministro de electricidad y calor hasta la alimentación de vehículos de pila de combustible o de combustión de hidrógeno neutros en emisiones de carbono.

Nos encontramos actualmente inmersos en una carrera hacia la descarbonización de todas las actividades humanas. Las razones que justifican este inmenso esfuerzo son diversas: el cambio climático, las tensiones geopolíticas, la desaceleración económica mundial, etc. En cualquier caso, gobiernos y administraciones de prácticamente todo el planeta quieren conseguir la neutralidad climática para el año 2050. Para conseguir este objetivo, todos los planes contemplan una transición energética acelerada, buscando la transformación de nuestra economía basada en fuentes de energía provenientes de combustibles fósiles para pasar a una nueva economía cimentada sobre fuentes de energía limpias.

El sector del transporte es sin duda un agente clave de esta transformación, ya que acumula cerca de un tercio del consumo energético mundial (por encima de 170 millones de GWh/año), y es responsable de la emisión de alrededor del 15% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. Una de las consecuencias directas de las estrategias de descarbonización puestas sobre la mesa, supone la electrificación de todos los medios de transporte, para reducir las emisiones contaminantes un 55% para el año 2030 y un 90% para el año 2050.

Para ello necesitamos configurar un nuevo sistema de almacenamiento de energía, puesto que en un futuro cercano no vamos a poder utilizar los depósitos de hidrocarburos actuales, que nos proporcionan reservas de energía y estabilidad en los circuitos de suministro debido a la intermitencia en la generación de las energías solar y eólica.

Es en este punto donde el uso del hidrógeno como vector energético propone una posible solución que resulta ser libre de emisiones y técnicamente viable. Cuando hablamos de medios de transporte, la posibilidad de utilizar hidrógeno como fuente de energía primaria puede resultar muy interesante, pese a su evidente menor eficiencia que la solución puramente eléctrica. Para transporte ligero es viable la esta última solución. Sin embargo, el transporte pesado necesita unas baterías de gran tamaño. Esto supone un elevado coste, peso

y largos tiempos de recarga. Es por ello que para los vehículos pesados se valora la opción del H_2 .

Pero hacer que todo esto se haga realidad implica desarrollar una infraestructura suficiente que de apoyo a la movilidad de los vehículos propulsados con hidrógeno. Las administraciones públicas han puesto en marcha multitud de programas de ayudas y líneas de subvenciones con el fin de impulsar a la iniciativa privada hacia el establecimiento de esta red de puntos de carga. Pese a ello, apenas hay vehículos impulsados con hidrógeno en el mercado, lo que hace que las estaciones de carga no sean apenas utilizadas y no resulten rentables. De una u otra manera, lo que parece bastante claro es que dentro de un plazo de tiempo no demasiado elevado existirá una disponibilidad de hidrógeno almacenado para su aprovechamiento como fuente de energía.

1.2 OBJETIVO Y ALCANCE DEL PROYECTO

El objetivo global del proyecto es realizar un diseño de una hidrogenera para que el Instituto Tecnológico de Aragón sea capaz de repostar el camión de pila de hidrógeno a partir de su propia producción de hidrógeno verde por electrólisis. Con ello se logrará completar el laboratorio "Zero emisiones" del centro y servirá para dar servicio de pruebas para los distintos componentes que componen dicha instalación.

Se trata de una hidrogenera capaz de dar servicio de máximo 1 repostaje al día a un camión que almacena hidrógeno en dos botellas de 150 l a 350 bar, suficiente para el uso que se le va a dar al vehículo, partiendo de una producción limitada de hidrógeno a 35 bar. También se podrá dispensar a otros vehículos o medios que necesiten hidrógeno, incluso a otras presiones por debajo de 350 bar, ya que la hidrogenera controlará la presión establecida de repostaje en todo momento.

El alcance del proyecto incluye la selección de los componentes que constituyen las hidrogeneras y comprobación de los parámetros más relevantes (velocidad, presión temperatura). Para ello se han realizado una serie de cálculos que se complementarán con una pequeña simulación.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO

Es importante diferenciar entre fuente de energía y vector energético. Las fuentes de energía son recursos naturales de los cuales se obtiene la energía, como el sol, el viento, el carbón o el gas natural. En cambio, los vectores energéticos son aquellos mecanismos que almacenan y transportan esa energía para que pueda utilizarse de forma eficiente. El hidrógeno puede generarse a partir de energía eólica o solar y luego utilizarse como un vector energético de forma segura y eficiente.

Ofrece características diferentes al electrón y se presenta, así como un complemento a la electrificación que permitirá llevar la energía renovable y la descarbonización a usuarios finales, donde el suministro de energía mediante electricidad no resulta viable, ya sea desde el punto de vista económico o técnico.

Actualmente, el hidrógeno se utiliza principalmente como materia prima en la producción de diversos compuestos químicos y en procesos industriales como el refinado del petróleo. Estos usos representan un consumo anual de aproximadamente 94 millones de toneladas de hidrógeno (IEA, Global Hydrogen Review, 2022), siendo la industria petroquímica y la fabricación de fertilizantes los principales sectores demandantes.

En cambio, con el nuevo panorama energético, donde las economías tienden hacia las cero emisiones en 2050, el sector del hidrógeno dejará de ser meramente un consumidor de energía para desempeñar un rol nuevo en los sistemas energéticos.

El hidrógeno será el medio por el cual se descarbonicen varias de las aplicaciones conocidas como difíciles de abatir. Para ello, su producción deberá abandonar la ruta actual, a partir de combustibles fósiles. Para producir dicho gas mediante vías sostenibles destaca la electrólisis del agua, actualmente el método de producción de hidrógeno sin emisiones más avanzado y con más potencial de realizar dicha tarea a la escala necesaria.

Este método de producción hace posible absorber energía de fuentes renovables como la eólica o la fotovoltaica y convertirla en energía química en forma de hidrógeno molecular.

El hidrógeno tiene mucho potencial en la descarbonización de la industria y los sectores difíciles de abatir ya que la energía química complementa a la energía eléctrica en puntos clave como:

- Almacenamiento durante largos períodos de tiempo (días, meses y años).
- Posibilita el transporte a grandes distancias por barco o carretera.
- Similitud con la logística actual de los combustibles fósiles.
- Posibilidad de producción de combustibles sintéticos compatibles con equipos actuales.

De esta forma, el hidrógeno por sus características se presenta como una pieza clave en el contexto de transición energética, destacando su capacidad para lograr compensar la variabilidad de las energías renovables.

Las previsiones actuales para el hidrógeno son que su consumo llegará a superar al del carbón y al del petróleo durante la segunda mitad del siglo XXI y que, a finales de siglo, cubrirá más del 75% de la demanda del mercado mundial. Es por esto que el hidrógeno se ha convertido en un elemento esencial del Pacto Verde Europeo y del camino hacia los objetivos energéticos de Europa en 2050. Entre estos objetivos se encuentran el de reducir la contaminación atmosférica, asegurar la seguridad del suministro energético y proveer de energía limpia y asequible a los ciudadanos. Y para ello, deberá haber un impulso del hidrógeno como vector energético.

2.2 PROCESO DISPENSACIÓN

La principal diferencia que se encuentra cuando vamos a recargar un depósito que contiene un gas y un líquido es que el líquido se encontrará a un cierto nivel y en todo momento se puede saber qué porcentaje hemos llenado. Sin embargo, los gases siempre llenan la totalidad del volumen del depósito debido a la elevada movilidad de sus moléculas.

En este caso ocurre que la presión del tanque ira disminuyendo según se esté quedando sin combustible hasta el punto de que necesitemos repostar. Una presión de 0 bar supondrá un depósito totalmente vacío, y una presión de 350 o 700 bar, según el tipo de vehículo, supondrá un depósito totalmente lleno.

De este modo, la estación de carga de hidrógeno transfiere el gas al depósito de destino incrementando gradualmente su presión hasta alcanzar el valor nominal de operación, en caso de que se requiera una carga completa.

La relación entre la presión que va alcanzando el gas y la cantidad de este depende de la temperatura a la que se encuentra. Existen diversas fórmulas experimentales que permiten aproximar el cálculo de la densidad del hidrógeno en función de su presión y temperatura y a partir de este valor se define el llamado Estado de Carga (SoC) según la fórmula:

$$SoC (\%) = \frac{\rho(P, T)}{\rho(\text{Presión Nominal de Trabajo}, 15^\circ C)} \times 100$$

El estado de carga (SoC) permite controlar adecuadamente el proceso de llenado a partir de la monitorización de la presión y de la temperatura del hidrógeno dentro del depósito del vehículo repostado. Poniendo un ejemplo muy simple, si se desea un SoC del 100 %, teniendo en cuenta que en la expansión del H₂ dentro del depósito este se calienta, será necesario establecer una presión superior a la nominal, para compensar esta disminución de densidad debido a la temperatura.

El trasvase de hidrógeno gaseoso desde la estación hacia el vehículo se realiza siguiendo varios pasos y las investigaciones y nuevos desarrollos continúan buscando la manera óptima de ejecutarlo. Hoy en día, esta operación sigue habitualmente la secuencia siguiente:

Este esquema representa, de una manera muy sencilla, las distintas etapas que suceden en una hidrogenera.

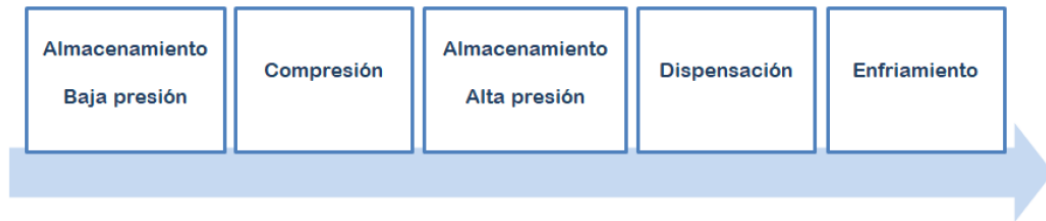


Figura 1 - Esquema sencillo de una hidrogenera.

El punto de partida es hidrógeno almacenado a baja presión (puede encontrarse a 20 - 50 bar si proviene de un electrolizador o a 200 bar si ha sido suministrado por un transporte cisterna) Para que el llenado del tanque del vehículo destino a alta presión pueda hacerse efectivo existen diferentes posibilidades:

- Conectar un sistema de compresión (*booster*) directamente con el vehículo destino.

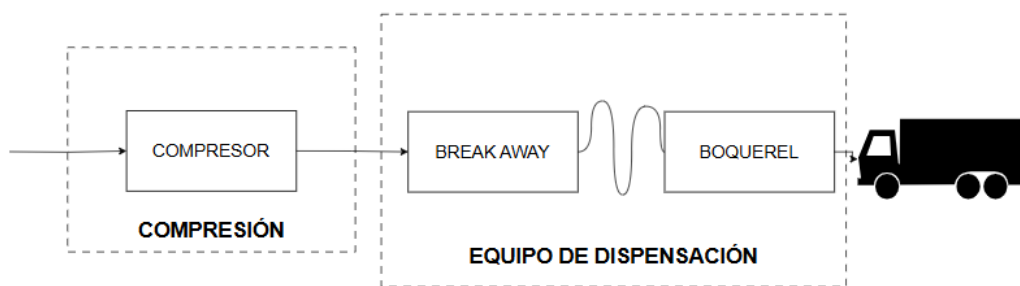


Figura 2 - Diagrama de la compresión directa con el vehículo.

- Intercalar un pequeño acumulador o buffer entre el compresor (*booster*) y el tanque final.

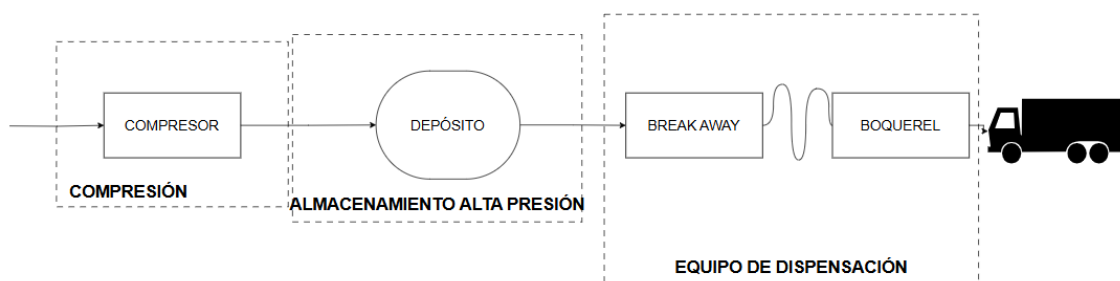


Figura 3 - Diagrama buffer previo al vehículo.

- Configurar una cascada de presiones de alta presión previa a la dispensación.

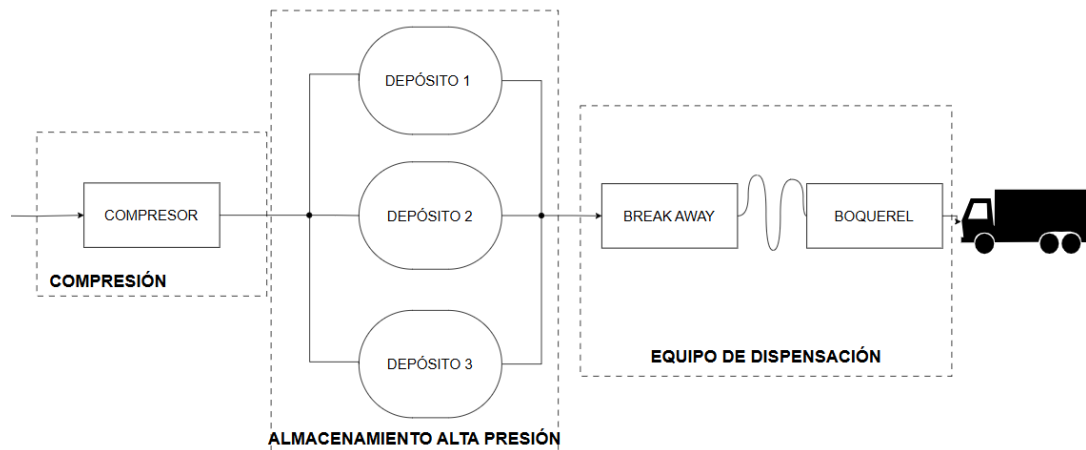


Figura 4 - Diagrama cascada de presiones.

- Sistema mixto de los anteriores.

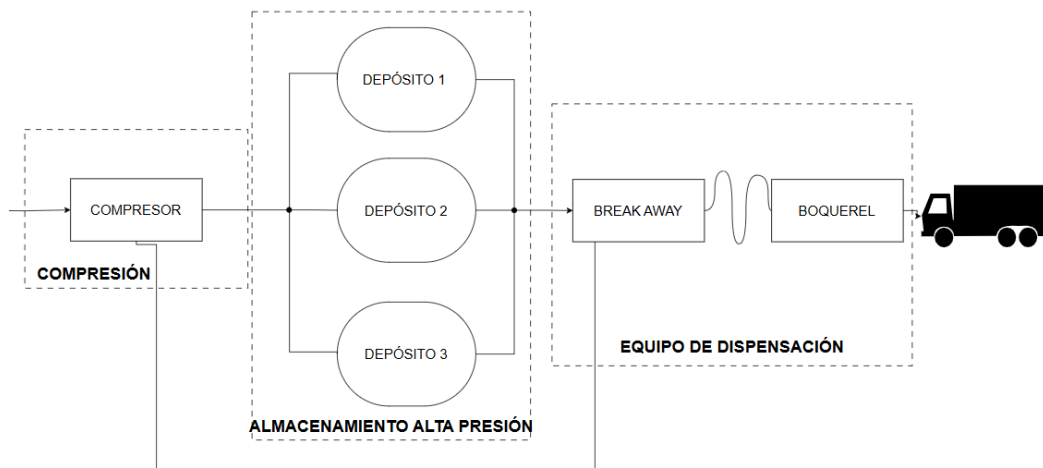


Figura 5 - Diagrama sistema mixto

El sistema de almacenamiento en cascada es el más habitual en las estaciones y ha sido extensamente investigado para encontrar la forma óptima de realizar la recarga. Lo más común es hacer uso de tres niveles de presión, que iremos combinando a medida que el proceso avanza y en función de la presión existente en el tanque destino.

En todo caso siempre resulta necesario disponer de un sistema de compresión en la instalación que se encargue de alimentar nuestros depósitos en cascada, nuestro tanque destino, o ambos.

Las características del hidrógeno cambian y el seguimiento de estas es indispensable para asegurar un control en el proceso y para la seguridad de operación. El aspecto crítico del proceso se encuentra en el cambio de temperatura que experimenta el hidrógeno, especialmente al ingresar al depósito de destino, donde sufre una expansión repentina. Este fenómeno, conocido como efecto Joule-Thomson, generalmente provoca el enfriamiento de

la mayoría de los gases. No obstante, el hidrógeno, al igual que el helio, constituye una de las pocas excepciones a esta regla, comportándose de manera inversa y generando un aumento de temperatura dentro del tanque.

A este calentamiento del hidrógeno hay que añadirle que:

- El incremento progresivo de la presión del gas dentro del tanque genera un calor por compresión adicional.
- La energía cinética del gas se transforma en calorífica a la finalización de su recorrido en el tanque.
- Las paredes del tanque y de las diferentes conducciones del circuito de dispensación disipan parte de la energía calorífica.
- Los cambios de sección de los elementos de regulación de flujo generarán fricciones que hacen aumentar la temperatura del gas en su tránsito.

Todo este calentamiento genera un problema a la hora de realizar la recarga en el mínimo tiempo posible con flujos elevados, lo que genera mayores calentamientos. Los tanques usados para la movilidad son los denominados de tipo IV, realizados en plástico polietileno de alta densidad y reforzados en su parte exterior por un bobinado de fibra de carbono. Estos tanques ofrecen una relación peso/capacidad muy buena, pero no se puede exceder los 85 °C.

En resumen, este problema ha hecho necesaria la incorporación de un sistema de enfriamiento del hidrógeno, con el objetivo de limitar la temperatura máxima del gas en el tanque y, al mismo tiempo, permitir una velocidad de carga razonable, sobre todo en los casos establecidos bajo un protocolo determinado que busquen mínimos tiempos de carga. Cuando la presión nominal del vehículo receptor es de 350 bar y su almacenamiento no excede de 7 kg, el enfriamiento no es estrictamente necesario según estos protocolos para lograr tiempos de repostaje aceptables. No obstante, su implementación permite acelerar aún más el proceso. Además, la tendencia del sector apunta hacia una creciente adopción de tanques a 700 bar, lo que permite aumentar la autonomía de los vehículos y optimizar el espacio destinado al almacenamiento, por lo que la etapa de enfriamiento seguirá siendo un elemento clave en el proceso de carga.

2.3 DESCRIPCIÓN DE UNA HIDROGENERA

2.3.1 ESQUEMA

Las hidrogeneras son muy similares a las estaciones de servicio tradicionales. La principal diferencia, además del combustible, es que necesitan un alto grado de estanqueidad en toda la instalación. Por ello, el combustible se suministra en alta presión de una manera rápida y segura. Es el mismo proceso al que estamos acostumbrados, pero la pistola del surtidor quedará acoplada de forma hermética a nuestro depósito. Con todo ello, el tiempo de llenado dependerá del tamaño del depósito de nuestro vehículo, que en el caso del hidrógeno se mide en kilogramos y no en litros.

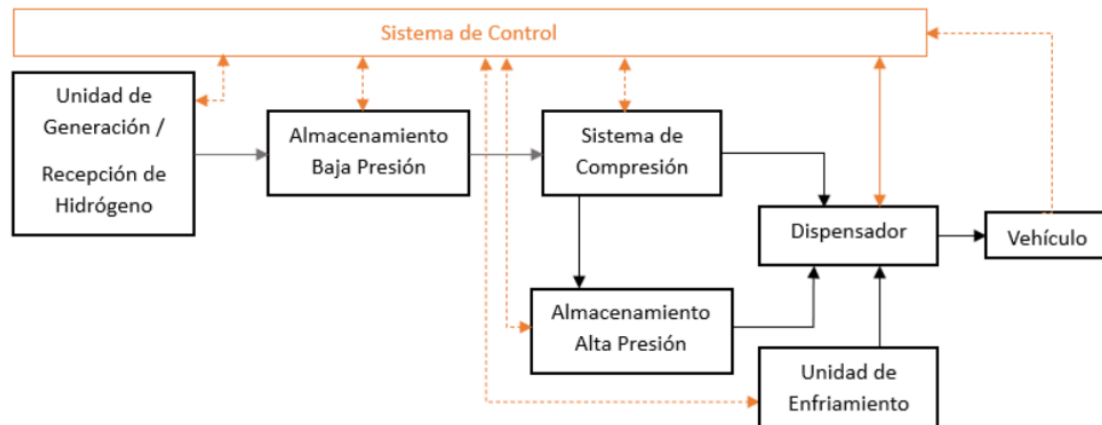


Figura 6 - Diagrama de una hidrogenera.

Todas las hidrogeneras comienzan por la producción de hidrógeno o se les suministra a partir de *tube trailers*. El hidrógeno se almacena en un depósito inicial a baja presión. Seguido de ese almacenamiento nos encontramos con la compresión. Posterior a ello tenemos dos opciones: suministrar directamente desde el compresor al vehículo o pasar por un almacenamiento a alta presión.

Ambas dos necesitarán un equipo de dispensación, que variará en función de la presión de descarga (350 o 700 bar). Por último, y dependiendo del tipo de hidrogenera, la presión a la que va a suministrar el gas y las exigencias de cada hidrogenera habrá un sistema de enfriamiento antes de que entre en el depósito del vehículo.

A parte de estos componentes, las hidrogeneras cuentan con más instrumentación como válvulas, electroválvulas, venteo, sensores de temperatura y presión, medidor de flujo másico, etc.

2.3.2 COMPRESIÓN

La compresión del hidrógeno es la base de una hidrogenera y es el componente que más incrementa el CAPEX a la hora de diseñar una instalación. En los sistemas de compresión en plantas hidrogeneras nos podemos encontrar con 4 opciones:

1. **Compresores de pistón:** Se basan en la conversión directa de energía mecánica en energía interna. Hay varios tipos como los compresores alternativos lineales y de líquido. Se denominan de "desplazamiento positivo" y se utilizan particularmente para la compresión de hidrógeno. Reducen el volumen en el que se contiene el hidrógeno, comprimiéndolos y aumentando su presión.

Un compresor alternativo de una etapa consta de un sistema de pistón-cilindro equipado con dos válvulas automáticas. En la variedad mecánica, el pistón está unido a un cigüeñal por medio de una biela, convirtiendo el movimiento giratorio de las unidades móviles en

el movimiento casi lineal del pistón. En la variedad con aceite, el movimiento lineal es producido por el aceite presurizado que empuja el émbolo al que está unido el vástago.

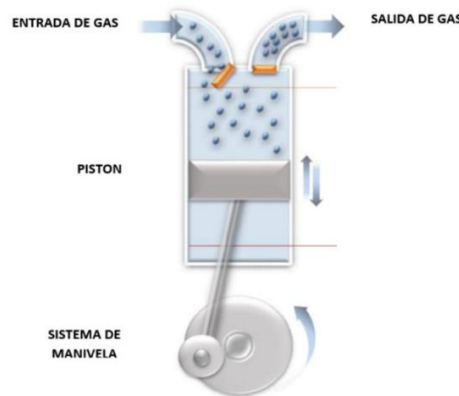


Figura 7 - Esquema de compresor de pistón alternativo accionado mecánicamente.

Se utilizan configuraciones de múltiples etapas para alternar secuencialmente los procesos de compresión y enfriamiento, consiguiendo así una evolución más isoterma que si se realiza la compresión en una etapa.

Presentan varias ventajas:

- Muy buenos niveles de rendimiento
- Elevada presión de descarga
- Flexibilidad en tamaño y capacidad.

Algunas de sus desventajas:

- No son eficientes para caudales elevados
- Son más complejos de fabricar y de mantener
- Necesitan una refrigeración eficaz
- Hay que controlar las fluctuaciones de presión y cargas variables

En la siguiente figura se muestra un esquema de un compresor de pistón de dos etapas accionado mediante un cilindro hidráulico central, con los cilindros de compresión refrigerados y con intercambiador de calor entre ambas etapas. Se debe apreciar la diferencia de diámetros entre la segunda etapa (diámetro pequeño) y el diámetro de la primera etapa (diámetro grande).

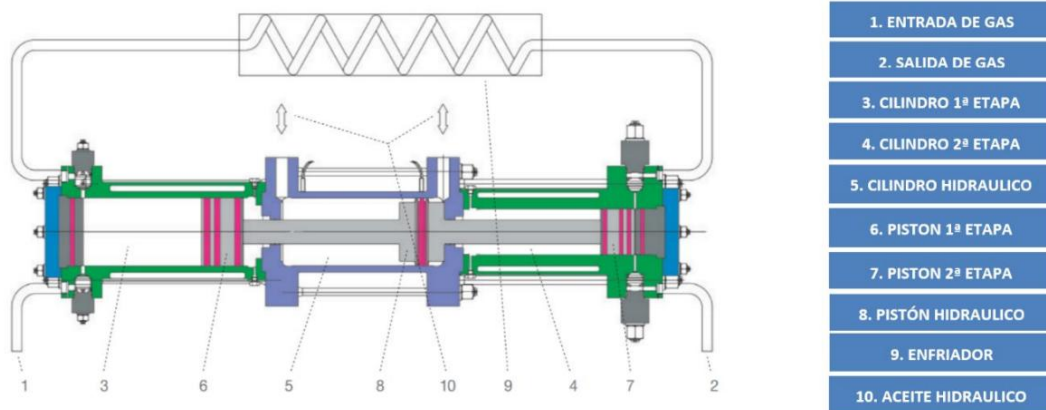


Figura 8 - Esquema de compresor de pistón alternativo hidráulico multi etapa.

También encontramos los compresores de accionamiento electromecánico. En este caso el pistón está conectado directamente a un motor lineal acoplado con un sistema de resorte resonante. En la Figura 5 se muestra el esquema característico de un compresor de pistón con accionamiento lineal.

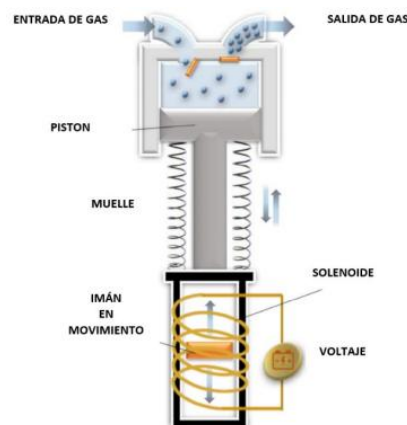


Figura 9 - Esquema de compresor lineal.

Para finalizar con este grupo se encuentran los compresores iónicos. Son especialmente adecuados para aplicaciones de hidrógeno y utilizan líquidos para comprimir directamente un fluido. Son ampliamente reconocidos por lograr una compresión barata.

Dentro de esta clasificación de compresores de líquido destacan los compresores iónicos. Se denominan compresores iónicos porque utilizan como líquido una sal fundida. Parecen ser una solución muy prometedora en el desarrollo de estaciones de repostaje de hidrógeno en el marco de las aplicaciones de automoción, ya que permiten comprimir el hidrógeno hasta 1000 bar a través de un sistema con pocas unidades móviles.

Su principio de funcionamiento se basa en un compresor de pistón convencional, con la particularidad de que cada pistón está sellado mediante una columna de líquido iónico prácticamente incompresible. Este líquido es el encargado de actuar sobre el hidrógeno para efectuar su compresión. Además, cumple una doble función: actúa como barrera de

separación, evitando la contaminación del hidrógeno por el sistema de lubricación del pistón, y reduce significativamente las fugas de hidrógeno a través del mismo. No obstante, es necesario incorporar un separador al final de la última etapa del proceso, cuya función es recuperar y recircular el líquido iónico que pudiera haberse mezclado con el hidrógeno.

El uso de líquidos iónicos para la compresión de hidrógeno también asegura un bajo consumo de energía y una baja emisión de ruido, pero el riesgo de corrosión es alto. Además, sus costes de mantenimiento son generalmente mayores debido a las precauciones y pasos que deben tenerse en cuenta al momento de manejar la sal fundida.

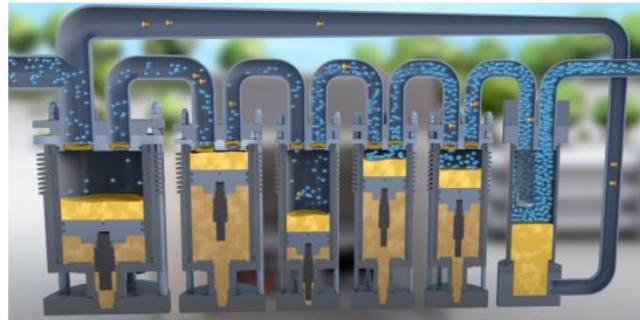


Figura 10 - Esquema de un compresor iónico de cinco etapas.

2. Compresores de membrana: En este tipo de compresores, el fluido está completamente aislado del pistón, ya que su movimiento se transmite a un fluido hidráulico, que a su vez transmite el movimiento a una fina membrana metálica denominada "diafragma", aislando el hidrógeno de la parte hidráulica. El movimiento del diafragma en el espacio de la cavidad, en el que está confinado el fluido, reduce el volumen disponible, aumentando así la presión del fluido.

Los compresores de diafragma han demostrado ser muy eficaces para aplicaciones de hidrógeno, son adecuados cuando se deben manipular fluidos de alta pureza química. Entre sus ventajas se puede destacar:

- Su alto rendimiento
- Menor consumo de energía
- Bajos requisitos de refrigeración.
- Niveles muy altos de eficiencia volumétrica
- Apropriados para aplicaciones que requieren velocidades de flujo bajas.

La desventaja que presentan es principalmente su durabilidad, ya que se ven debilitados por tensiones mecánicas durante el funcionamiento.

En la siguiente figura se muestra el esquema con las diferentes partes que componen típicamente un compresor de membrana, actuado por una combinación de fluido hidráulico y un pistón de accionamiento mecánico.

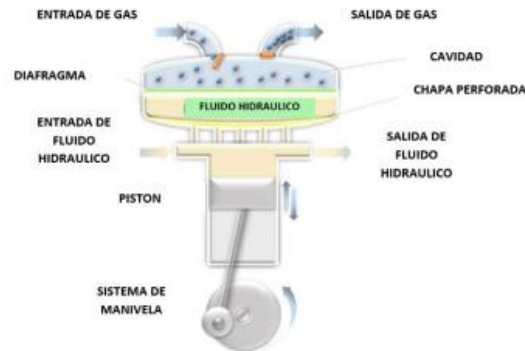


Figura 11 - Esquema de compresor de diafragma accionado mecánicamente.

3. **Tecnologías de compresión alternativas:** Incluye tipologías no mecánicas de compresores, diseñados específicamente para aplicaciones de hidrógeno: compresores criogénicos, de hidruro metálico, electroquímicos y de adsorción.

Aunque los compresores mecánicos se han utilizado ampliamente para aplicaciones de hidrógeno, se requieren cantidades significativas de energía y pistones de diámetros muy grandes para comprimir suficiente gas. Además, la eficiencia de un compresor de hidrógeno mecánico sigue siendo modesta en aplicaciones de baja potencia.

Una solución es almacenar hidrógeno a temperaturas criogénicas, ya que la densidad de energía volumétrica es mayor, pero es cara y difícil de gestionar térmicamente. Los compresores de accionamiento térmico también han demostrado ser una buena alternativa, así como los compresores electroquímicos.

Actualmente estas tecnologías o no están lo suficientemente desarrolladas o no son económicas para su implementación actual en el transporte por su bajo caudal másico. Sin embargo, tienen un gran interés para la industria gracias a la alta eficiencia conseguida en el proceso de compresión, lo cual es clave para la implementación en la industria debido a las grandes penalizaciones que se deriven de consumos excesivos de energía.

2.3.3 ALMACENAMIENTO ALTA PRESIÓN

El hidrógeno a temperatura ambiente es un gas con una densidad extremadamente baja. Es aproximadamente 14 veces más ligero que el aire, lo cual se traduce en una densidad energética volumétrica (densidad de energía por unidad de volumen) mucho más pequeña de la de otros combustibles. El hidrógeno presenta una densidad energética gravimétrica (densidad de energía por unidad de masa) mucho más elevada que la de otros combustibles: 1 kg contiene la misma energía que 2,4 kg de metano o que 2,8 kg de gasolina. En consecuencia, almacenar el hidrógeno a temperatura y presión ambiente no es viable porque ocuparía demasiado espacio: se necesita un volumen de 11 m³ para contener 1 kilo de hidrógeno.

	Densidad del gas (0°C, 1 bar)
Hidrógeno	0,089 kg/m ³
Hidrógeno líquido (-253°C, 1 atm)	70,79 kg/m ³
Gasolina	740 kg/m ³
Metano	0,71 kg/m ³
Gas Natural Licuado (-163°C, 1 atm)	430 kg/m ³

Tabla 1 - Densidad del hidrógeno en comparación con otras fuentes energéticas

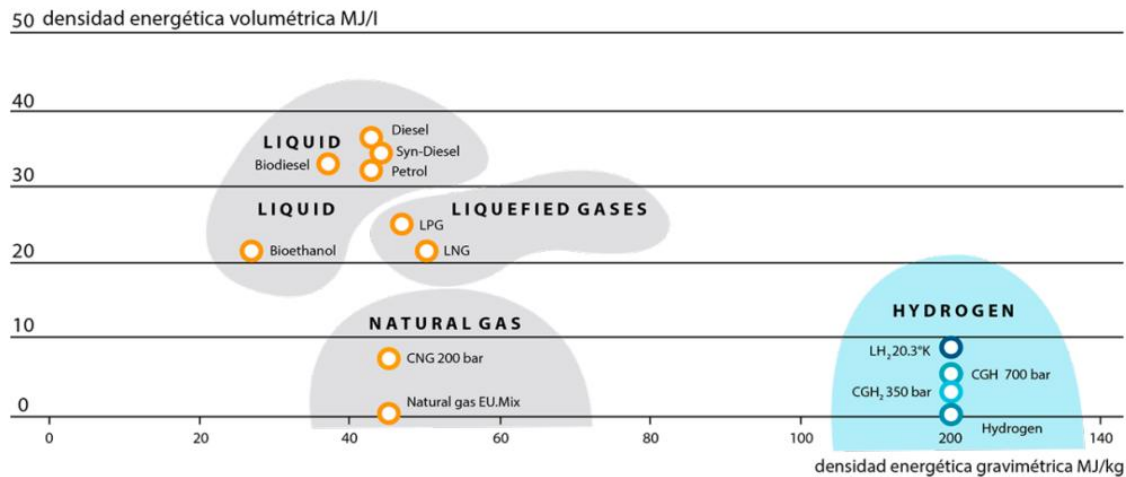


Figura 12 - Comparación densidad energética volumétrica frente a gravimétrica. fuente: asociación peruana del hidrógeno.

Para almacenar una gran cantidad de hidrógeno (kg) en un recipiente necesitamos comprimirlo a elevadas presiones o bajar su temperatura para convertirlo en estado líquido. El almacenamiento a presión es la forma más comúnmente utilizada, ya que para conseguir licuar el H₂ se requieren temperaturas extremadamente bajas (-253 °C), lo cual se traduce en un elevado consumo energético y un elevado coste.

En la actualidad, para uso en transporte y almacenamiento estacionario a pequeña escala, el hidrógeno se suele almacenar principalmente como gas a presión en diferentes tipos de depósitos. Entre estos usos tenemos por ejemplo las estaciones de repostaje de vehículos, pequeñas empresas, laboratorios, etc. Para las aplicaciones a gran escala e intercontinentales que se pretenden implantar en un futuro próximo el uso de portadores de Hidrogeno, como el amoniaco o el metanol, son las opciones más rentables.

En consecuencia, el medio de almacenamiento más adecuado dependerá del volumen que se vaya a almacenar, la duración del almacenamiento, la velocidad de descarga requerida y la disponibilidad geográfica de las distintas opciones.

La elección del almacenamiento requiere un compromiso entre rendimiento técnico y competitividad de costes. Actualmente hay establecidos cinco tipos de depósitos para uso de hidrógeno a elevadas presiones:

- **Tipo I:** Diseño totalmente metálico

Es el menos costoso de fabricar y está formado por un cilindro de acero o aluminio, generalmente fabricado mediante procesos de extrusión sin soldadura (salvo los depósitos de gran tamaño). Se pueden fabricar desde depósitos pequeños para lugares de baja demanda hasta depósitos de mayor tamaño si se requieren grandes volúmenes.

Son más pesados y suelen funcionar a presiones más bajas que los otros tipos de depósitos, hasta 300 bar. La masa del metal necesaria para contener la presión en un depósito de tipo I permite almacenar entre un 1% y un 2% de hidrógeno en comparación con la masa de la botella.

- **Tipo II:** Depósito metálico con enrollamiento parcial de fibra de carbono

Los depósitos denominados de Tipo II son una mejora de los depósitos de tipo I. Estos cilindros son también totalmente metálicos, de acero o aluminio, pero reforzados adicionalmente con materiales compuestos (resina de fibra de carbono o vidrio) solo en la parte recta del cilindro, y únicamente en dirección circunferencial, lo que permite aumentar la presión de almacenamiento hasta unos 500 bares.

Siguen siendo muy pesados, lo que no les hace viables para su uso en vehículos, pero son utilizables en aplicaciones estacionarias. En particular, dada las elevadas presiones que son capaces de soportar suelen emplearse como depósitos de alta presión en las hidrogeneras. La capacidad de almacenamiento sube respecto al Tipo I hasta los 20 gr por litro.

- **Tipo III:** Depósito metálico con enrollamiento total de fibra de carbono

Este depósito de almacenamiento de hidrógeno tiene una capacidad mucho más eficiente pudiendo utilizar botellas más pequeñas y ligeras para almacenar la misma cantidad de hidrógeno. Están formados por un depósito interior metálico, el cual está completamente revestido de materiales compuestos de resina con fibra de carbono tanto la parte recta como en las cabezas, lo que les proporciona una elevada capacidad resistente. Además, se les aplica además una resina protectora reforzada con fibra de vidrio en el exterior.

Son usados en vehículos a una presión de 350 bar llegan a una capacidad de almacenamiento de 25gr/. Se pueden utilizar hasta presiones más altas (700 bar), llegando a los 40 gr/litro.

- **Tipo IV:** Depósito de material compuesto con enrollamiento total de material compuesto

Los depósitos tipo IV son una evolución de los depósitos Tipo III. Son más ligeros y no metálicos para evitar los problemas de fragilización de metales en ambiente de hidrógeno, ha

En este caso, se trata de un depósito interior de material polimérico, completamente envuelto con revestimientos de material compuesto, que suelen consistir en nuevo en enrollamiento de fibras de carbono y/o fibras de vidrio. Destaca la capacidad resistente combinada con la insensibilidad a la fragilización del interior del material polimérico.

Los depósitos estándar suelen operar a una presión máxima de 700 bares, aunque se han diseñado depósitos hasta 875 bares, lo que permite alcanzar densidades de almacenamientos de unos 40 gr por litro.

Los depósitos de tipo III y IV son los más caros de todos los depósitos de almacenamiento de hidrógeno debido al coste actual del material compuesto de fibra de carbono, así como requerir un proceso de fabricación un poco más complejo que los depósitos tipo I y II.

- **Tipo V:** Depósitos sin liner interior, y enrollamiento total de material compuesto. Se trata de una técnica de fabricación sin liner, simplemente utilizando un elemento de soporte para poder efectuar el bobinado del material compuesto. El elemento de soporte interior es retirado después del curado de las capas de enrollamiento. Se encuentran en desarrollo, pero representan una de las formas de diseño de depósitos más prometedoras en un futuro próximo.

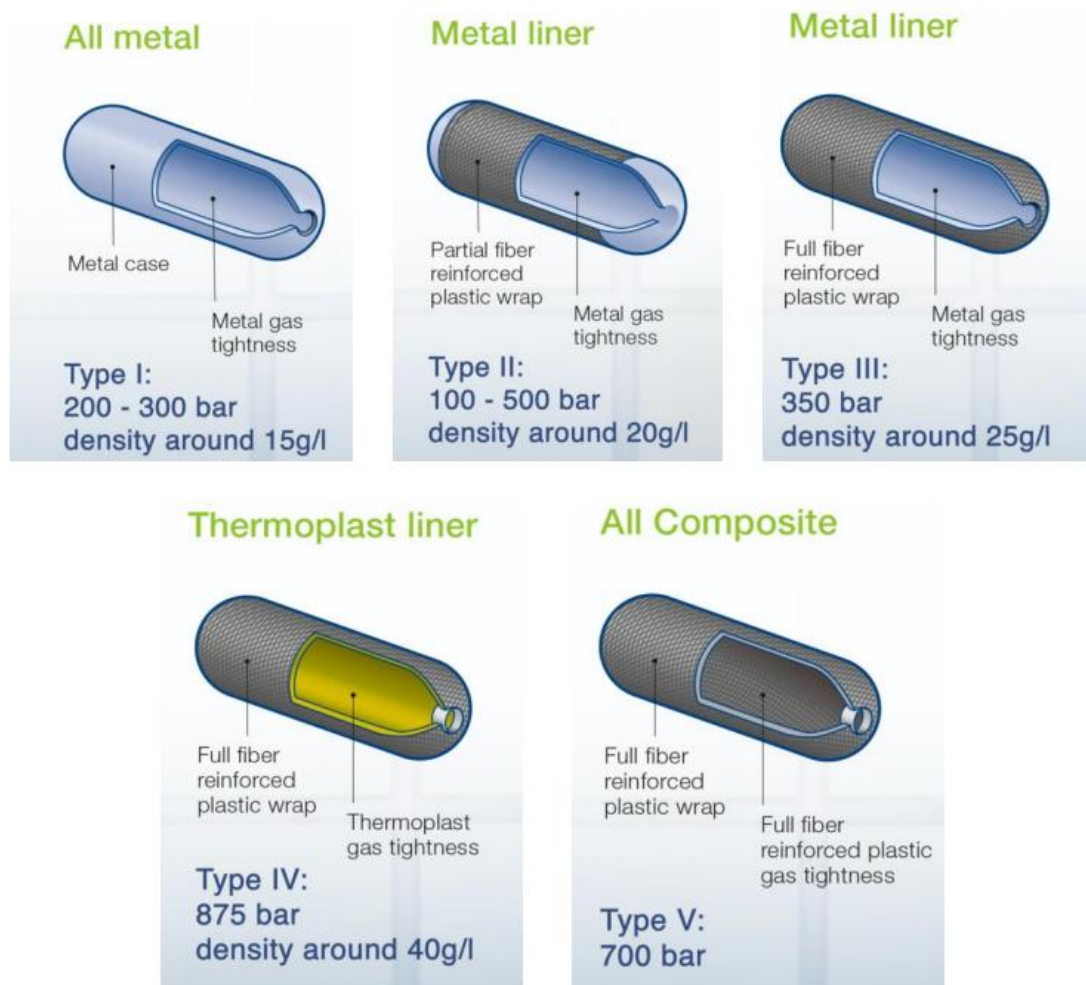


Figura 13 -Tipos de depósitos para hidrógeno.

2.3.4 DISPENSACIÓN

Seguido del almacenamiento de alta presión se encuentra el sistema de dispensación. Se encarga de unir la instalación con el vehículo que quiere realizar una recarga. Esta unidad cumple varias funciones que son realizadas por diferentes dispositivos y gestionadas por un sistema de control central:

- Conexión y desconexión segura del vehículo repostado a la instalación
- Identificación de las características del tanque a recargar y definición de los parámetros óptimos para el repostaje (si tiene conexión IrDA)
- Trasvase controlado del hidrógeno minimizando el tiempo de repostaje
- Filtraje del hidrógeno para limitar las impurezas en el gas suministrado
- Medida precisa de la cantidad de hidrógeno trasvasada al vehículo que garantice la legalidad de la transacción económica entre estación y cliente
- Seguridad de todo el proceso e interrupción inmediata del mismo en el caso de que ocurra cualquier incidencia
- Interfaz y comunicación del servicio realizado con el cliente (opcional, en caso de vender el hidrógeno y necesitar una medida fiscalizadora)

Este conjunto de funcionalidades puede representarse gráficamente tal y como se muestra a continuación:

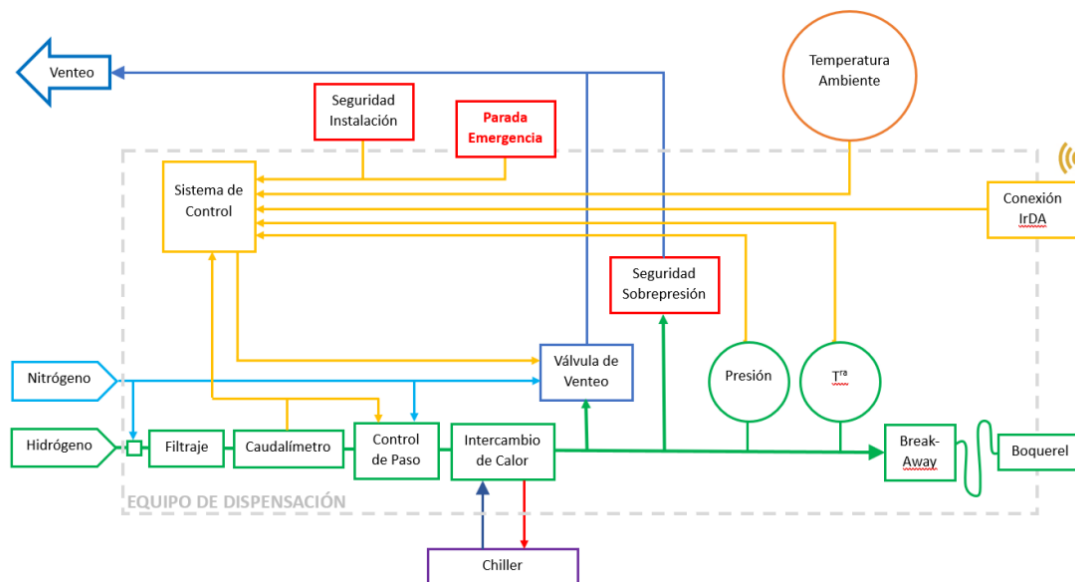


Figura 14 - Equipo de dispensación

En este equipo se incluyen filtros para asegurar la pureza del gas en el depósito destino. Esto se debe a que las tecnologías del hidrógeno son especialmente sensibles y las impurezas aceleran la degradación de los sistemas. El hidrógeno suministrado tiene que cumplir con la pureza determinada en la norma ISO 14687:2025.

Las válvulas cumplen una función esencial en el control y la seguridad del proceso de dispensación, operando mediante actuadores eléctricos, neumáticos o de forma manual. Los requisitos más exigentes para estos componentes están asociados a su compatibilidad con el

hidrógeno y a su capacidad para soportar las altas presiones de operación. Para maximizar la seguridad del sistema, se suelen emplear válvulas de tipo normalmente cerradas (NC), las cuales permanecen cerradas en estado de reposo o ante la ausencia de señal de control. Además, para garantizar la integridad del sistema, se incorporan válvulas pilotadas automáticamente por el propio proceso, como las válvulas antirretorno y las válvulas de alivio de presión. En algún caso en el que sea necesario disponer de válvulas en algún espacio confinado, por ejemplo, un armario, se optará si se considera necesario por válvulas aptas para zonas ATEX.

Los medidores de flujo son componentes especialmente críticos en las instalaciones de carga de hidrógeno, ya que implican una transacción económica basada en la cantidad de gas transferido al depósito del usuario. Por ello, es fundamental medir con alta precisión la cantidad de hidrógeno dispensado, tarea que recae en el sistema de medición de flujo. Para su uso en entornos públicos, estos equipos deben ser auditados y precintados conforme a la normativa legal vigente, con el fin de garantizar la fiabilidad del proceso y prevenir fraudes. Existen diversas tecnologías aplicables a la medición de caudal en gases, entre ellas la de presión diferencial, ultrasonidos y Coriolis, siendo esta última la que ofrece mejores prestaciones en términos de precisión y repetibilidad. Tanto la normativa OIML R139 como el estándar NIST HB44 establecen un margen de error máximo permitido del 1,5% para la medición del caudal másico.

El boquerel es el componente que el usuario manipula para acoplarlo al receptáculo del vehículo, permitiendo así la transferencia de hidrógeno al tanque. Además, en algunos casos incorpora una antena para la recepción de comunicaciones infrarrojas entre el dispensador y el vehículo. Su diseño debe cumplir con los requisitos establecidos en la norma SAE J2600 y estar preparado para operar de forma segura a las bajas temperaturas de suministro del hidrógeno, que suelen oscilar entre -30 y -40 °C cuando hay enfriamiento, garantizando siempre la protección del usuario durante la operación.

Conectado al boquerel, la manguera tiene que ser apta para el hidrógeno y las bajas temperaturas de suministro. Puede incluir un conducto de purga y un cable de transmisión de las comunicaciones.

Por último, el break-away es un elemento que enlaza la manguera con la instalación de dispensación. Su función es proteger a la instalación evitando escapes de combustible y daños adicionales al resto de la instalación cuando el conductor reanuda la marcha sin haber desconectado el boquerel del vehículo.

2.3.5 ENFRIAMIENTO

Según el tiempo de carga y condiciones de contorno (tanques, temperatura ambiente, presión objetivo) se necesitará unidad de enfriamiento. Siempre se debe garantizar que el proceso de dispensación se realiza dentro del rango de temperaturas entre -40 °C y 85 °C.

De forma básica, la unidad de enfriamiento se divide en dos elementos principales:

- La unidad de generación de frío (*chiller*) se encarga de transformar energía eléctrica en energía térmica y generar cambio de fase al gas de enfriamiento con la finalidad de absorber calor del hidrógeno.

- La unidad de intercambio de frío, responsable del acondicionamiento del hidrógeno a la temperatura adecuada para la dispensación. Suele localizarse lo más cerca posible del punto de suministro, para evitar ineficiencias energéticas.

3. DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 METODOLOGÍA

ITA, buscando sistematizar la ejecución de sus proyectos y conseguir la máxima calidad en el resultado y probabilidad de éxito, ha desarrollado la Metodología VinCi (Metodología en V para la Innovación aplicando principios de diseño Circular) para el diseño y desarrollo de productos y sistemas mecatrónicos.

La Metodología VinCi sigue un procedimiento de diseño y desarrollo en cascada, pasando por cada una de las fases del proyecto desde el lanzamiento hasta su consecución. Estas fases se dividen en dos etapas principales:

- ANTEPROYECTO: engloba las 3 primeras fases de definición de especificaciones, generación de conceptos y diseño conceptual.
- DISEÑO DETALLADO Y FABRICACIÓN: formado por el diseño Mecatrónico (o detallado), fabricación y montaje, pruebas de subsistemas, integración y pruebas del sistema, validación.

Cada etapa puede ser iterativa hasta conseguir cumplir las especificaciones. Por ello es muy importante la definición de las especificaciones al inicio del proyecto y una trazabilidad a medida que se van ejecutando cada una de las fases.

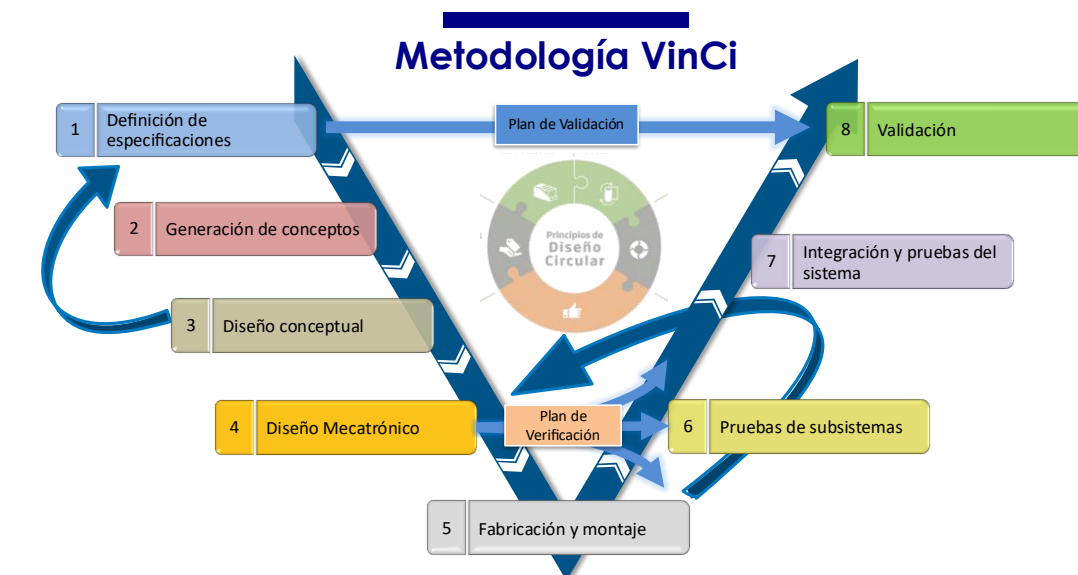


Figura 15 - Diagrama metodología VinCi

En nuestro caso vamos a realizar las 4 primeras fases para ajustarnos al tiempo disponible y porque no se va a fabricar.

3.2 DEFINICIÓN DE ESPECIFICACIONES

La primera fase trata de centrar los objetivos y conocer las expectativas para poder establecer los requerimientos y las características técnicas.

Se empieza recopilando y analizando información, el estado del arte, mercados, componentes, funcionamiento, etc. Posterior a ello, en una reunión los 3 técnicos implicados en el proyecto, se fijan los objetivos principales y las expectativas del proyecto.

PROYECTO:	Diseño y desarrollo de una hidrogenera como parte de un laboratorio "Zero Emisiones"
DOCUMENTO:	Objetivos
FECHA:	05/03/2025

OBJETIVOS GENERALES PROYECTO	
Desarrollar una hidrogenera para completar un laboratorio "Zero Emisiones"	
Disponer de un sistema para repostar vehículos de hidrógeno	

Figura 16 – Objetivos principales

Antes de comenzar con las expectativas había que definir los *stakeholders*, (el entorno o las partes interesadas). En este caso el uso e interés de esta instalación va a ser principalmente para el propio ITA, aunque también se baraja la posibilidad de poder dar servicio a usuarios externos al instituto en forma de servicio de I+D.

PROYECTO:	Diseño y desarrollo de una hidrogenera como parte de un laboratorio "Zero Emisiones"
DOCUMENTO:	Jobs to be done
FECHA:	26/03/2025

Stakeholders			
G1 (Beneficiarios)	G2 (Desarrolladores)	G3 (Restricciones)	G4 (Usuarios)
ITA	Técnicos I + D	PRL	Mantenimiento
Comerciales	Departamento de mecatrónica	Administraciones públicas	Operario
Dirección			Usuarios ITA
			Usuarios externos

Figura 17 - Stakeholders

Como principales beneficiarios están el instituto principalmente y, con una visión más allá del repostaje del camión, a los comerciales. Los desarrolladores somos los 3 técnicos que

formamos parte del departamento de mecatrónica. Como entidades que puedan restringir encontramos PRL (Prevención de Riesgos Laborales) y las administraciones públicas. Por último, los usuarios que van a usar la hidrogenera, del propio centro y externos a él.

A continuación, se realizó un ejercicio: *Jobs to be done*. Mediante una lluvia de ideas se recopilaban las expectativas del trabajo desde el punto de vista de cada grupo interesado y se clasificaron por colores en 3 grupos: funcionales, no funcionales y restricciones de diseño.

Jobs to be done			
Conseguir clientes para desarrollo de equipos	Plataforma para ensayos de componentes	Cumplimiento de normativas de hidrogeneras	El sistema será fácil de usar, sin necesidad de formación
Rentabilidad	Ensayos para diferentes condiciones climatológicas	Marcado CE	El sistema tendrá un mantenimiento reducido
Bajo coste	Uso para diferentes vehículos	El sistema será seguro	Accesibilidad a los componentes del sistema
Sistema innovador	Alimentación a diferentes rangos de presión	El sistema cumplirá legislación de PRL	La instalación tiene que ser fácil de montar y desmontar
Conseguir clientes para suministrar hidrógeno	Recarga de vehículos sencilla y económica		
	Sistema portátil		
	Respostar vehículos		
	Mostrar información del estado de la instalación via remota		
	Detección de averías		
	Monitorización de parametros de interés		
	El sistema usará componentes comerciales		
	Tamaño reducido para poder colocarlo junto al banco de electrolizadores		
Requerimientos funcionales		Requerimientos no funcionales	Restricciones de diseño

Tabla 2 – Jobs to be done

El siguiente paso es transformar las expectativas de los *stakeholders* en requerimientos y esos requerimientos en características técnicas.

Expectativas	Requerimientos
Plataforma para ensayos de componentes	Permitirá realizar ensayos de distintos componentes.
Ensayos para diferentes condiciones climatológicas	Permitirá ensayar para diferentes condiciones climatológicas.
Repostaje de vehículos	Repostaje del camión de H2
Detección de averías	Detectar averías.
Monitorización de parámetros de interés	Monitorizar parámetros de interés.
Mostrar información del estado de la instalación vía remota	Mostrar el estado del sistema vía remota.
Rentabilidad	Tendrá bajo coste y alto beneficio
Bajo coste	
Recarga de vehículos económica	
Sistema innovador	Será innovador
Sistema portátil	Portabilidad del sistema
El sistema será fácil de usar.	Uso de la instalación sencillo
El sistema tendrá un mantenimiento reducido	Mantenimiento reducido
Accesibilidad a los componentes del sistema	Montaje y desmontaje sencillo
La instalación tiene que ser fácil de montar y desmontar	
Conseguir clientes para desarrollo de equipos	Poder dar servicio de ensayo de componentes a clientes.
Conseguir clientes para suministrar hidrógeno	Poder suministrar hidrógeno a usuarios externos al ITA.
Uso para diferentes vehículos	Versatilidad del sistema para diferentes vehículos y presiones.
Alimentación a diferentes rangos de presión	
El sistema usará componentes comerciales	
Tamaño reducido para poder colocarlo junto al banco de electrolizadores	Tamaño reducido
Cumplimiento de normativas de hidrogeneras	Cumplimiento normativas de hidrogeneras
Marcado CE	Tener marcado CE
El sistema será seguro	Seguridad
El sistema cumplirá legislación de PRL	Cumplimiento legislación PRL

Tabla 3 - Requerimientos

Con todos estos requerimientos seleccionamos las características técnicas iniciales:

- Ensayo con variaciones de temperatura, presión y caudal.
- Capacidad mínima de una carga completa del camión de H2 (7,2 kg a 350 bar).
- Monitorizar temperatura, presión y caudal.
- Sistema con producción de hidrogeno y generación de electricidad con cerramiento que sea portable.
- No se necesitará formación para el uso de la instalación.
- Capacidad para repostar a 350 y 700 bar.
- Que pueda operar en un rango de temperatura exterior entre 0 - 40 °, con lluvia, viento o condiciones adversas que pueda tener la ciudad de zaragoza.
- Dimensiones pequeñas para colocar junto al banco de electrolizadores (producción de hidrógeno).

Por último, los 3 técnicos ponderamos los requerimientos no funcionales:

Requerimientos no funcionales		ITA		ITA		
		Media		JUAN	JOSÉ	ALEJANDRO
1	Tendrá bajo coste y alto beneficio	2	7,0	6	7	8
2	Será innovador	10	1,3	1	2	1
3	Portabilidad del sistema	3	6,7	6	9	5
4	Uso de la instalación sencillo	5	5,3	6	5	5
5	Mantenimiento reducido	9	2,3	4	2	1
6	Montaje y desmontaje sencillo	8	3,7	4	3	4
7	Versatilidad del sistema para diferentes vehículos y presiones.	4	6,3	7	7	5
8	Tamaño reducido	6	5,0	5	6	4
9	Poder dar servicio de ensayo de componentes a clientes.	1	8,0	8	8	8
10	Poder suministrar hidrógeno a usuarios externos al ITA.	7	4,3	3	1	9

Tabla 4 – Valoración requerimientos no funcionales

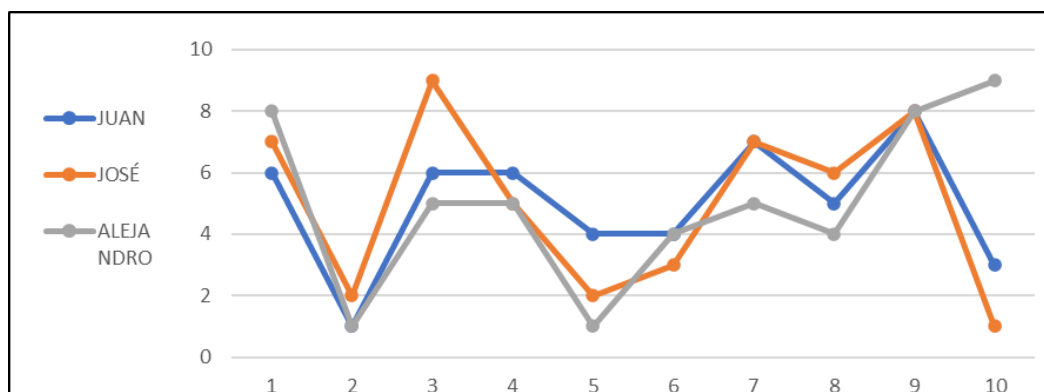


Figura 18 – Gráfica valoración requerimientos

Esta comparación muestra resultados generalmente similares entre los 3, aunque siempre hay alguna diferencia.

Por último, se realizó un primer esquema sencillo de nuestra hidrogenera el cuál se irá desarrollando.

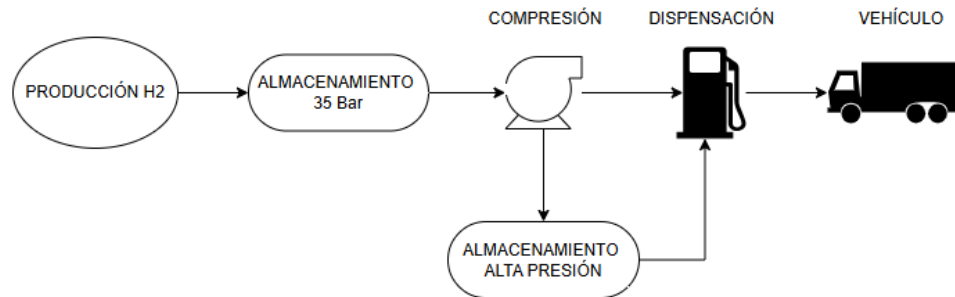


Figura 19 – Esquema hidrogenera

Cabe destacar que a lo largo del desarrollo del proyecto algunas de las características definidas se cumplirán o no, según las dificultades que se encuentren y como vaya evolucionando el mismo.

3.3 GENERACIÓN DE CONCEPTOS

En esta segunda fase es muy importante la recopilación de información, en especial el estado del arte de estos dispositivos y se siguen aportando ideas de cómo puede ser la hidrogenera. Se observan especialmente otras hidrogeneras existentes que sirvan como referencia. En este momento y con el primer esquema realizado se comienzan a desarrollar las partes de nuestras instalaciones.

La producción de hidrógeno se realiza en el propio instituto mediante un proceso de electrolisis con un caudal de 2000 NI/h. Actualmente hay un almacenamiento inicial de 135 l a una presión de 35 bar. Desde el primer momento se ve que este almacenamiento requerirá una ampliación.

La compresión del hidrógeno es fundamental para las hidrogeneras y el compresor es el componente más costoso. Además, existen diversos tipos, cada uno apropiado para unas presiones y caudales.

Se realizó un segundo diagrama incluyendo las características de la instalación actuales y el concepto elegido de dispensación en cascada mixto. En este queda definido las 3 partes principales de nuestra hidrogenera compresión, almacenamiento a alta presión y dispensación, y se indica la producción y almacenamiento actuales, y las características del camión.

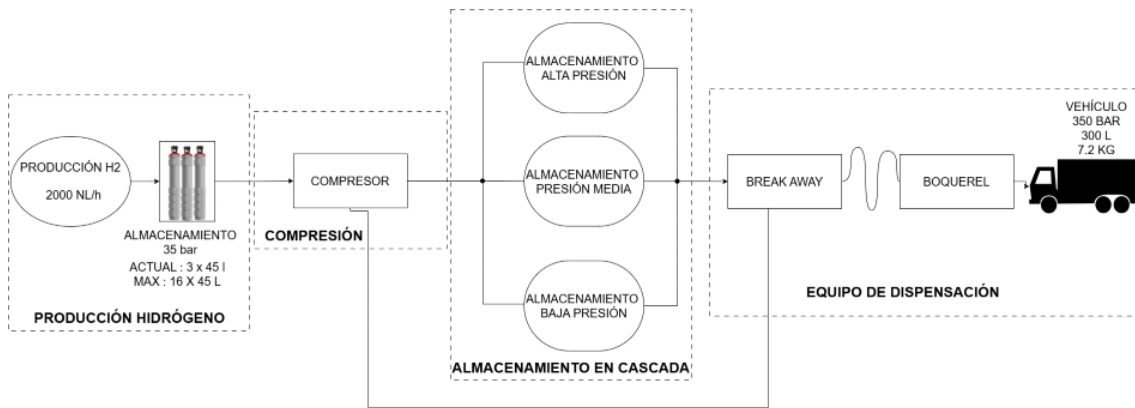


Figura 20 – Diagrama 2 hidrogenera

3.4 DISEÑO CONCEPTUAL

En este apartado lo más importante es echar la vista atrás, mirar las características que habíamos definido y revisarlas. De todos los requerimientos que fijamos mantendremos los siguientes:

- Permitirá realizar ensayos de distintos componentes.
- Permitirá repostar el camión de H₂, es decir, al menos 7 kg de trasvase
- Monitorizar parámetros de interés.
- Mantenimiento reducido.
- Mostrar el estado del sistema vía remota.
- Tamaño reducido

Al final, lo que el ITA busca es un hidrogenera que sea capaz de repostar una vez al día el camión. Entonces no se requiere una recarga rápida del vehículo, ni siquiera que el almacenamiento a alta presión esté rápidamente disponible para volver a usarse.

Se descartan las ideas de que sea portable, poder suministrar a otras presiones superiores a 350 bar o tener un diseño innovador.

Puesto que la compresión del hidrógeno es la base para el funcionamiento de estos dispositivos se profundizó en la información de las fases anteriores del proyecto. Se revisaron los distintos tipos de compresores y se llegó a la conclusión de que los compresores de pistón y de diafragma eran los más apropiados. Teniendo esto claro el siguiente paso era seleccionar uno comercial.

Previo al compresor hay un almacenamiento inicial pequeño. Es un factor que se va a definir en función de la diferencia del caudal de succión del compresor y el caudal de producción del banco de electrolizadores para que nunca se quede sin caudal a la entrada.

Tras el compresor está el almacenamiento a alta presión, que también habrá que definir.

3.4.1 CONFIGURACIONES PROPUESTAS

En este apartado se van a presentar las 3 configuraciones que se plantearon:

1. Configuración 1: 3 depósitos en cascada a diferentes presiones.
2. Configuración 2: 3 depósitos en cascada con la misma presión.
3. Configuración 3: 1 único depósito a alta presión.

De estas opciones la 1 y la 2 son habitualmente usadas en estaciones de servicio de hidrógeno. Las presiones de la primera inicialmente se pensaron para seguir el orden de 200, 350 y 500 bar. Para la configuración 2 se usará una presión de 400 bar en cada uno de los tres depósitos.

Por otro lado, la configuración 3 nos supondría tener unas condiciones de dispensación desfavorables en comparación con las cascadas. Además, para poder dar servicio I+D y asemejarnos a una hidrogenera real lo suyo sería ir a cascadas, que nos permita también poder estudiar protocolos de dispensado y comparar datos con simulaciones CFD que se están realizando en la actualidad en el Instituto. Es por ello que se descarta la idea de recargar a través de un único depósito, que también necesitará mayor volumen de almacenamiento.

Como añadido a las configuraciones propuestas se pensó en la posibilidad de recargar directamente desde el compresor, sin necesidad de almacenar. Esta opción queda como añadido al resto de configuraciones.

En conclusión, la mejor opción es el almacenamiento en cascada ya sea a la misma presión o escalonada.

Para definir del todo la cascada faltaba comprobar la presión a la que deberían encontrarse los depósitos y que volúmenes sería necesarios para la recarga del camión de hidrógeno.

Por último, el diagrama de nuestra instalación fue desarrollado, quedando definido al nivel de detalle más bajo al que se va a llegar. En él se muestran los componentes y las conexiones con el sistema eléctrico (amarillo) y el control (azul).

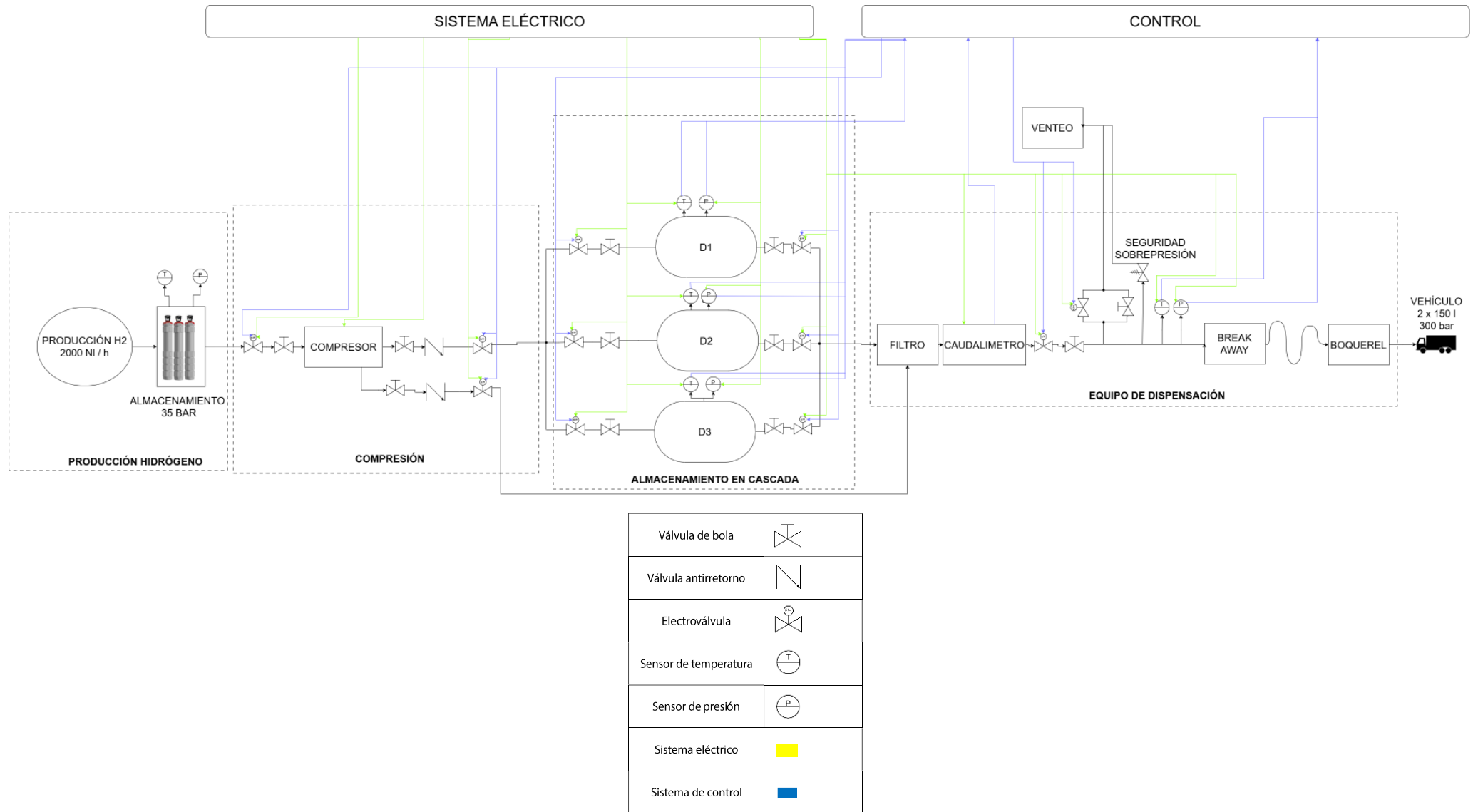


Figura 21 – Diagrama final hidrogenera.

3.5 DISEÑO MECÁNICO DETALLADO

La última fase del proyecto es el diseño detallado. En este apartado se van a seleccionar los componentes y a comprobar que son adecuados para la instalación.

3.5.1 NORMATIVA

El diseño de la hidrogenera se ha basado especialmente en el protocolo de dispensación de hidrógeno SAE J2601. Desarrollado por la Sociedad de Ingenieros de Automoción para el repostaje de vehículos ligeros terrestres, es el estándar de referencia empleado por todas las hidrogeneras. También hay que destacar el uso de la norma UNE-ISO 19880-1: 2022.

Al principio la normativa se enfocaba más en el vehículo ligero y por ello presenta limitaciones en el tamaño de los tanques y restringe el flujo máximo de hidrógeno a 60 g/s. Esto es adecuado para un vehículo con un almacenamiento de unos 6 kg de hidrógeno, pero supone un problema para vehículos pesados que consumen unos 10 kg cada 100 km. Además, el tiempo de recarga de estos vehículos se dispara. Por eso crearon la SAE J2601-2 donde se aumenta el caudal máximo a 120 g/s pero se limita la presión nominal a 350 bar.

El principal objetivo del ITA es el abastecimiento a su camión de hidrógeno que tienen 2 depósitos de 150 l a 350 bar con una frecuencia establecida de 1 recarga por día. Estas condiciones de partida permiten que el diseño lo centremos en la SAE J2601, aunque no sea un vehículo ligero, ya que por similitudes en capacidad se asemeja más que a la SAE J2601-2. y de esta manera la inversión para los componentes será menor. Esta norma dice:

- La temperatura ambiente estará entre -40 °C y 50 °C en el momento del dispensado.
- Temperatura del hidrógeno > -40 °C y < 85 °C
- Caudal de hidrógeno < 60g/s, excluyendo momento de comienzo del repostaje.
- Un máximo de 10 pausas durante el repostaje donde el caudal de hidrógeno sea menor a 0,6 g/s
- El dispensador no deberá transferir hidrógeno al vehículo si la presión en el tanque de este es inferior a 5 bar o superior a la presión nominal.
- El dispensador no deberá transferir hidrógeno al vehículo si el estado de carga del tanque del vehículo es superior al 100%.

Aunque para el instituto con esta norma sería suficiente, dado que las exigencias que tenemos que cumplir son bajas debido a que no se va a utilizar para uso comercial se ha completado con:

- UNE-ISO 19880-1:2022 Hidrógeno gaseoso. Estaciones de servicio. Parte 1: Requisitos generales.
- ISO 14687, Hydrogen fuel. Product specification.
- UNE 181001:2010, Tecnologías del hidrógeno. Terminología

- UNE-EN 17127:2022, Puntos de suministro al aire libre que dispensan hidrógeno gaseoso e incorporan protocolos de llenado
- UNE-EN 17124:2022, Hidrógeno combustible. Especificación de producto y garantía de calidad para los puntos de suministro de hidrógeno que dispensan hidrógeno gaseoso
- UNE-EN ISO 17268:2022, Dispositivos de conexión para el suministro de hidrógeno gaseoso a los vehículos terrestres

3.5.2 COMPRESOR

En primera instancia se encuentra el "corazón de la hidrogenera". Para este elemento la mayor dificultad ha sido encontrar un compresor con un caudal adecuado y que funcione en el rango de presiones que nos interesa. Finalmente, tras consultar empresas como Hoerbiger, Hiperbaric, H2Vector o Hidropack, se encontró un compresor de pistón de la marca Hofer que se adaptaba a nuestras limitaciones.

Es un compresor de pistón de funcionamiento en seco de dos etapas accionado mediante un sistema hidráulico de aceite. Está diseñado para un mantenimiento fácil y permite la compresión sin lubricante. La fuerza necesaria para la compresión del gas se genera mediante la presión del aceite y la relación correspondiente entre los diámetros de los pistones.

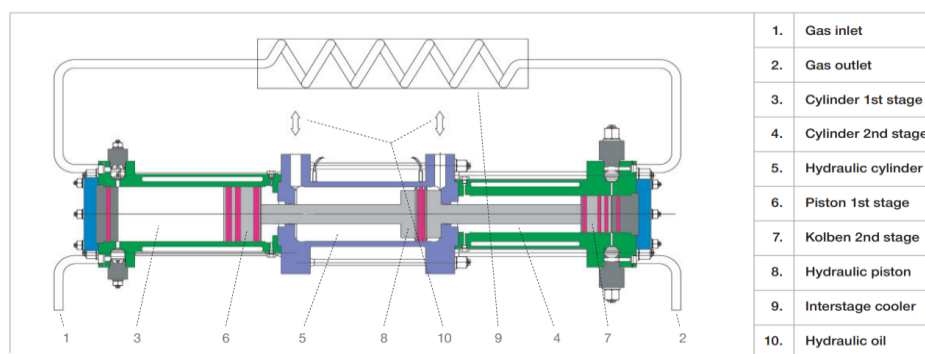


Figura 22 - Compresor de pistón Hofer.

El gas comprimido en las diferentes etapas se enfría mediante el refrigerador intermedio y el refrigerador posterior correspondientes. En este caso, la diferencia de temperatura es de aproximadamente 10 K con respecto a la temperatura de entrada del agua de refrigeración.

Además, estos compresores pueden venir como unidad operativa completa, lo que nos interesa para tener un sistema de control y de seguridad para este componente.

Model	Suction Pressure (min. allowable)		Capacity		Suction Pressure (max.)		Capacity		Discharge Pressure (max.)		Installed Motor Power
	psi	bar	scfm	Nm ³ /h	psi	bar	scfm	Nm ³ /h	psi	bar	kW
TKH 36/18-100-50	218	15	1,2	2	725	50	4,7	8	7.250	500	2

Figura 23 - Características del compresor.

La presión de succión está definida por la producción de hidrógeno, 35 bar. Por ello, el caudal de salida será de 5,428 Nm³/h. El diámetro de la primera etapa es de 36 mm, el de la segunda etapa es de 18 mm y la presión máxima de salida son 500 bares.

Este compresor cumple las Directiva para Maquinaria 98/37/EG, Directiva de Equipos a Presión 97/23/EG, Directiva ATEX 94/9/EG, Directiva de Baja Tensión 93/68/EWG y tiene la certificación del marcado CE.

3.5.3 ALMACENAMIENTO EN CASCADA

Finalmente, se va a optar por realizar una cascada de 3 depósitos para el almacenamiento de alta presión. Hay 2 posibilidades, realizar una cascada con 3 presiones distintas o una cascada con todos los depósitos a la misma presión. Para ambos casos los depósitos van a ser los mismos.

Se ha optado por botellas de la marca Whorthington. Son de tipo 1, de acero y están diseñadas para almacenar hidrógeno a altas presiones.

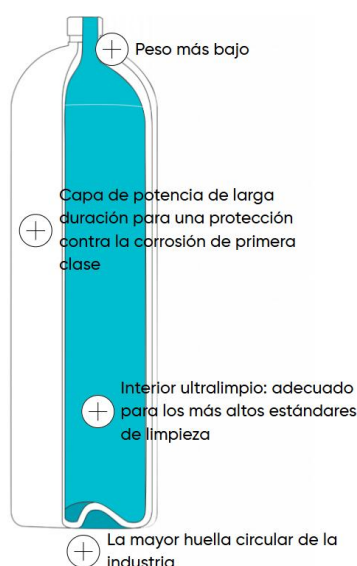


Figura 24 - Botella de la marca whorthington.

Tienen una capacidad de 50 l, pueden trabajar hasta 550 bar, un diámetro de 267 mm y una longitud de 1400 mm. En función del volumen que necesitemos en los almacenamientos se formarán 3 racks de varias botellas.

1. Configuración 1: 3 depósitos a diferentes presiones.

La primera idea era plantear 3 depósitos de 300 litros (mismo volumen que el almacenamiento del camión) a 200, 350 y 500 bar. Mediante una hoja Excel se realizaron los cálculos necesarios para ver la cantidad de hidrógeno que seríamos capaces de repostar. Para ese almacenamiento no se conseguía la presión final de 350 bar y como más adelante se muestra, mantener la presión de 500 bar iba limitar la elección de las tuberías. Finalmente se decide disminuir la última presión de 500 a 450 bares y aumentar el volumen de ese depósito de la cascada 150l.

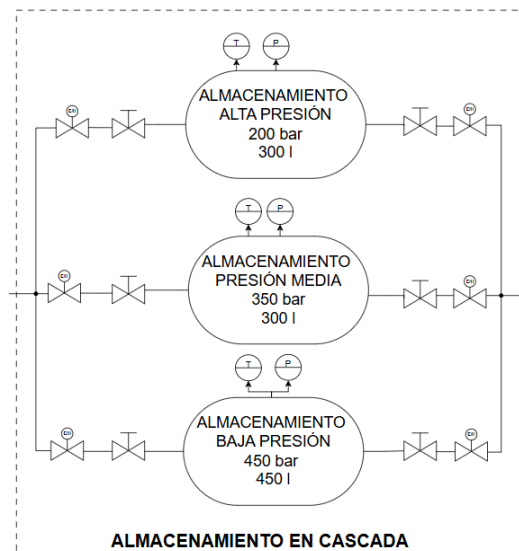


Figura 25 - Diagrama almacenamiento en cascada.

Para realizar estos cálculos es necesario entender que el hidrógeno se comporta como un gas ideal para presiones inferiores a 50 bares. Cuando pasamos esa presión el comportamiento de este pasa a ser de un gas real. En este caso se va a utilizar la ecuación de los gases ideales, a la que se le aplica un factor de compresibilidad para los gases reales.

$$p \cdot V = Z \cdot n \cdot R \cdot T$$

Los valores del factor de compresibilidad están tabulados en función de la presión y la temperatura.

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

Figura 26 - Factor de compresibilidad.

Con los datos de esta tabla, para la temperatura de 0° C, se realizó un gráfico de dispersión para sacar la línea de tendencia y la ecuación de la recta, y así poder conocer el factor de compresibilidad para todas las presiones.

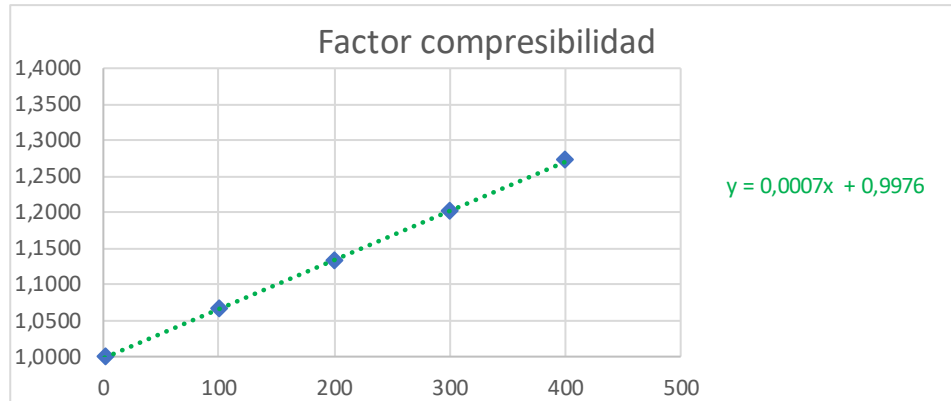


Figura 27 - Gráfica factor de compresibilidad.

Con los parámetros conocidos del almacenamiento en cascada (presión y temperatura) y el volumen y la presión inicial del camión se puede estimar la cantidad de hidrógeno que va a ser capaz de transferir y la presión final que se alcanzará. La temperatura por simplificación de cálculo se considera ambiente, es decir que se asume que hay tiempo de enfriamiento infinito durante los trasvases de hidrógeno.

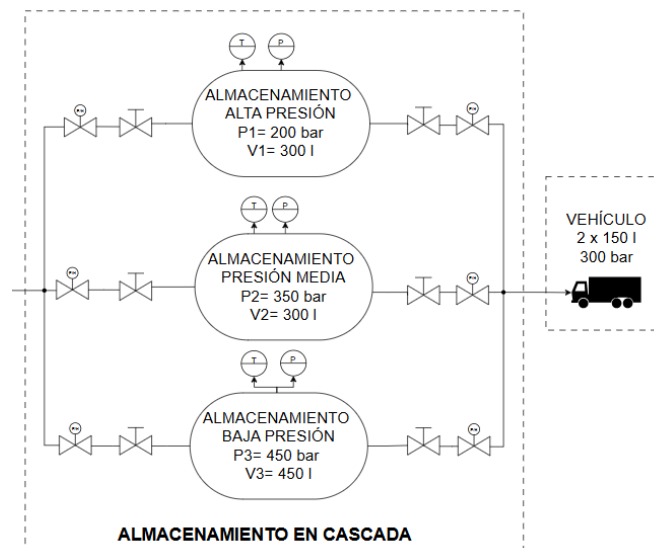


Figura 28 - Diagrama configuración 1.

Para realizar estos cálculos se supone que cada vez que el camión vaya a repostar, va a estar vacío completamente. Por ello, la recarga en cascada comienza siempre conectando el depósito de baja presión, seguido del depósito de media presión y terminando por el de alta presión para realizar una recarga controlada. Las ecuaciones que se han utilizado son:

- Caso 1: Conexión con depósito vacío

$$P_{\text{final}} = (P_1 * V_1 * Z_{\text{final}}) / (Z_1 * (V_1 + V_c)), \text{ siendo } V_c \text{ el volumen del camión.}$$

- Caso 2 y 3: Conexión con depósito parcialmente vacío

$$P_{\text{final}} = (((P_2 * V_2) / Z_2) + ((P_c * V_c) / Z_c) * Z_{\text{final}}) / (V_2 + V_c)$$

Cuando se conecta el camión con el primer depósito la cantidad de hidrógeno que hay se mantiene constante pero el volumen cambia. En el primer caso, al ser los volúmenes iguales de los dos depósitos, se puede hacer una primera suposición de que la presión final cuando se produzca toda la transferencia va a ser la mitad que la inicial, asumiendo que no hay pérdidas de carga en un caso ideal. Es decir, que la presión en el vehículo tras la conexión con el primer almacenamiento de la cascada serán 100 bar. Estimando esa presión se puede calcular el factor de compresibilidad y calcular la presión final, iterando hasta que la presión de cálculo y la presión estimada coincidan.

Se incluye también el tiempo de llenado del depósito de la cascada tras el repostaje ya que conocemos cuanta masa de hidrógeno le falta y el flujo másico constante del compresor.

1. DEPÓSITO 1 Y CAMIÓN

Si Pf1 va a ser aproximadamente P1/2:

Pf1	94,12	bar
Iteramos para Pf = 94 bar		
Pf1	93,96	bar
Iteramos para Pf= 93,87 bar		
Pf1	93,96	bar
n1 H2	4,71	kg
n1 H2 D1	4,70	kg
600	4,71	
300	2,36	

Pc1	93,96	bar
-----	-------	-----

factor de compresibilidad para Pf 1=	100	bar
Z =	1,0652	
para Pf 1=	94	bar
Z =	1,0634	
para Pf 1=	93,96	bar
Z =	1,0634	

Cantidad de hidrogeno en el camion =	2,36	kg
Cantidad de hidrogeno en el D1 =	2,36	kg

t llenado D1 tras una recarga =	4,81	h
---------------------------------	------	---

Figura 29 - Cálculos primer depósito de la cascada.

Para los siguientes casos el único cambio es que el vehículo ya tiene una cantidad de hidrogeno en su interior y está a una presión.

2. DEPÓSITO 2 Y CAMIÓN			
Si Pf1 va a ser aproximadamente (Pf1+P2) /2:			
Pf2	213,062	bar	
Iteramos para Pf = 213 bar			
Pf2	212,155	bar	
Iteramos para Pf = 212 bar			
Pf2	212,026	bar	
Iteramos para Pf = 212,02 bar			
Pf2	212,030	bar	
n2 H2	9,85	kg	
n H2 D2	7,50	kg	
600	9,8488		
300	4,924		
Cantidad de hidrogeno en el camion =		4,924	kg
Cantidad de hidrogeno en el D2 =		4,924	kg
factor de compresibilidad para Pf 2= 220 bar			
Z =	1,1516		
para Pf 2 213 bar			
Z =	1,1467		
para Pf 2= 212 bar			
Z =	1,1460		
para Pf 2= 212,03 bar			
Z =	1,1460		
Pf2 =		212,03	bar
t llenado D2 tras una recarga =		5,27	h
Z2	1,24		
Zc	1,0634		

Figura 30 - Cálculos segundo depósito de la cascada.

3. DEPÓSITO 3 Y CAMIÓN			
Si Pf1 va a ser aproximadamente (Pf2+P3) /2:			
Pf3	347,562	bar	
Iteramos para Pf = 346 bar			
Pf3	346,975	bar	
Iteramos para Pf = 346,9 bar			
Pf3	346,955	bar	
Iteramos para Pf = 346,97 bar			
Pf3	346,969	bar	
n3 H2	18,6120	kg	
n H2 D3	13,69	kg	
750	18,612		
300	7,445		
Cantidad de hidrogeno en el camion =		7,445	kg
Cantidad de hidrogeno en el D2 =		11,167	kg
factor de compresibilidad para Pf 3= 350 bar			
	1,2426		
para Pf 3= 347 bar			
	1,2405		
para Pf 3= 346,9 bar			
	1,2404		
para Pf 3= 346,97 bar			
	1,2405		
Pf3 =		346,97	bar
t llenado D3 tras una recarga =		5,17	h
Z3	1,31		
Zc	1,1460		

Figura 31 - Cálculos tercer depósito de la cascada.

La cantidad de hidrógeno que hay según la presión y el volumen del tanque la definimos a través de la siguiente tabla:

Valor deseado de H₂ **5 Kg** (Entre 0,15 y 33 Kg)

KG H2	VOLUMEN (L)																				
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	
PRESIÓN (bar)	35	0,16	0,31	0,47	0,62	0,78	0,93	1,09	1,24	1,40	1,55	1,71	1,86	2,02	2,17	2,33	2,48	2,64	2,79	2,95	3,11
	50	0,22	0,44	0,67	0,89	1,11	1,33	1,55	1,77	2,00	2,22	2,44	2,66	2,88	3,11	3,33	3,55	3,77	3,99	4,21	4,44
	60	0,26	0,51	0,77	1,02	1,28	1,54	1,79	2,05	2,30	2,56	2,82	3,07	3,33	3,58	3,84	4,10	4,35	4,61	4,86	5,12
	70	0,30	0,59	0,89	1,19	1,48	1,78	2,08	2,37	2,67	2,97	3,26	3,56	3,86	4,15	4,45	4,75	5,04	5,34	5,64	5,93
	80	0,34	0,67	1,01	1,35	1,68	2,02	2,36	2,69	3,03	3,37	3,71	4,04	4,38	4,72	5,05	5,39	5,73	6,06	6,40	6,74
	90	0,38	0,75	1,13	1,51	1,88	2,26	2,64	3,01	3,39	3,76	4,14	4,52	4,89	5,27	5,65	6,02	6,40	6,78	7,15	7,53
	100	0,42	0,83	1,25	1,67	2,08	2,50	2,92	3,33	3,75	4,16	4,58	5,00	5,41	5,83	6,25	6,66	7,08	7,50	7,91	8,33
	110	0,45	0,91	1,36	1,82	2,27	2,72	3,18	3,63	4,09	4,54	5,00	5,45	5,90	6,36	6,81	7,27	7,72	8,17	8,63	9,08
	120	0,49	0,98	1,48	1,97	2,46	2,95	3,45	3,94	4,43	4,92	5,41	5,91	6,40	6,89	7,38	7,87	8,37	8,86	9,35	9,84
	130	0,53	1,06	1,59	2,12	2,65	3,18	3,71	4,24	4,77	5,30	5,83	6,36	6,89	7,42	7,95	8,48	9,01	9,54	10,07	10,60
	140	0,57	1,13	1,70	2,27	2,83	3,40	3,97	4,54	5,10	5,67	6,24	6,80	7,37	7,94	8,50	9,07	9,64	10,20	10,77	11,34
	150	0,60	1,21	1,81	2,41	3,02	3,62	4,22	4,83	5,43	6,04	6,64	7,24	7,85	8,45	9,05	9,66	10,26	10,86	11,47	12,07
	160	0,64	1,28	1,92	2,56	3,20	3,84	4,48	5,12	5,76	6,40	7,04	7,68	8,32	8,96	9,60	10,23	10,87	11,51	12,15	12,79
	170	0,68	1,35	2,03	2,70	3,38	4,05	4,73	5,40	6,08	6,75	7,43	8,10	8,78	9,46	10,13	10,81	11,48	12,16	12,83	13,51
	180	0,71	1,42	2,13	2,84	3,55	4,26	4,97	5,69	6,40	7,11	7,82	8,53	9,24	9,95	10,66	11,37	12,08	12,79	13,50	14,21
	190	0,75	1,49	2,24	2,98	3,73	4,47	5,22	5,96	6,71	7,46	8,20	8,95	9,69	10,44	11,18	11,93	12,67	13,42	14,16	14,91
	200	0,78	1,57	2,35	3,14	3,92	4,70	5,49	6,27	7,06	7,84	8,62	9,41	10,19	10,98	11,76	12,54	13,33	14,11	14,89	15,68
	210	0,81	1,63	2,44	3,26	4,07	4,88	5,70	6,51	7,33	8,14	8,95	9,77	10,58	11,39	12,21	13,02	13,84	14,65	15,46	16,28
	220	0,85	1,69	2,54	3,39	4,24	5,08	5,93	6,78	7,63	8,47	9,32	10,17	11,02	11,86	12,71	13,56	14,41	15,25	16,10	16,95
	230	0,88	1,76	2,64	3,52	4,40	5,28	6,16	7,05	7,93	8,81	9,69	10,57	11,45	12,33	13,21	14,09	14,97	15,85	16,73	17,61
	240	0,91	1,83	2,74	3,65	4,57	5,48	6,39	7,31	8,22	9,13	10,05	10,96	11,87	12,79	13,70	14,61	15,53	16,44	17,36	18,27
	250	0,95	1,89	2,84	3,78	4,73	5,67	6,62	7,57	8,51	9,46	10,40	11,35	12,30	13,24	14,19	15,13	16,08	17,02	17,97	18,92
	260	0,98	1,96	2,93	3,91	4,89	5,87	6,84	7,82	8,80	9,78	10,76	11,73	12,71	13,69	14,67	15,64	16,62	17,60	18,58	19,56
	270	1,01	2,02	3,03	4,04	5,05	6,06	7,07	8,08	9,08	10,09	11,10	12,11	13,12	14,13	15,14	16,15	17,16	18,17	19,18	20,19
	280	1,04	2,08	3,12	4,16	5,20	6,24	7,28	8,33	9,37	10,41	11,45	12,49	13,53	14,57	15,61	16,65	17,69	18,73	19,77	20,81
	290	1,07	2,14	3,21	4,29	5,36	6,43	7,50	8,57	9,64	10,72	11,79	12,86	13,93	15,00	16,07	17,14	18,22	19,29	20,36	21,43
	300	1,11	2,22	3,32	4,43	5,54	6,65	7,76	8,86	9,97	11,08	12,19	13,30	14,41	15,51	16,62	17,73	18,84	19,95	21,05	22,16
	310	1,13	2,26	3,40	4,53	5,66	6,79	7,93	9,06	10,19	11,32	12,45	13,59	14,72	15,85	16,98	18,12	19,25	20,38	21,51	22,64
	320	1,16	2,32	3,49	4,65	5,81	6,97	8,13	9,30	10,46	11,62	12,78	13,94	15,11	16,27	17,43	18,59	19,76	20,92	22,08	23,24
	330	1,19	2,38	3,57	4,77	5,96	7,15	8,34	9,53	10,72	11,92	13,11	14,30	15,49	16,68	17,87	19,06	20,26	21,45	22,64	23,83
	340	1,22	2,44	3,66	4,88	6,10	7,32	8,54	9,77	10,99	12,21	13,43	14,65	15,87	17,09	18,31	19,53	20,75	21,97	23,19	24,41
	350	1,25	2,50	3,75	5,00	6,25	7,50	8,75	10,00	11,25	12,50	13,74	14,99	16,24	17,49	18,74	19,99	21,24	22,49	23,74	24,99
	360	1,28	2,56	3,83	5,11	6,39	7,67	8,95	10,22	11,50	12,78	14,06	15,34	16,61	17,89	19,17	20,45	21,73	23,00	24,28	25,56
	370	1,31	2,61	3,92	5,22	6,53	7,84	9,14	10,45	11,76	13,06	14,37	15,67	16,98	18,29	19,59	20,90	22,21	23,51	24,82	26,12
	380	1,33	2,67	4,00	5,34	6,67	8,00	9,34	10,67	12,01	13,34	14,68	16,01	17,34	18,68	20,01	21,35	22,68	24,01	25,35	26,68
390	1,36	2,72	4,08	5,45	6,81	8,17	9,53	10,89	12,25	13,62	14,98	16,34	17,70	19,06	20,42	21,79	23,15	24,51	25,87	27,23	
400	1,39	2,79	4,18	5,58	6,97	8,37	9,76	11,16	12,55	13,95	15,34	16,74	18,13	19,53	20,92	22,32	23,71	25,11	26,50	27,90	
410	1,42	2,83	4,25	5,66	7,08	8,50	9,91	11,33	12,74	14,16	15,57	16,99	18,41	19,82	21,24	22,65	24,07	25,49	26,90	28,32	
420	1,44	2,89	4,33	5,77	7,21	8,66	10,10	11,54	12,98	14,43	15,87	17,31	18,75	20,20	21,64	23,08	24,52	25,97	27,41	28,85	
430	1,47	2,94	4,41	5,88	7,34	8,81	10,28	11,75	13,22	14,69	16,16	17,63	19,10	20,57	22,03	23,50	24,97	26,44	27,91	29,38	
440	1,50	2,99	4,49	5,98	7,48	8,97	10,47	11,96	13,46	14,95	16,45	17,94	19,44	20,93	22,43	23,92	25,42	26,91	28,41	29,90	
450	1,52	3,04	4,56	6,08	7,60	9,13	10,65	12,17	13,69	15,21	16,73	18,25	19,77	21,29	22,81	24,33	25,85	27,38	28,90	30,42	
460	1,55	3,09	4,64	6,19	7,73	9,28	10,82	12,37	13,92	15,46	17,01	18,56	20,10	21,65	23,20	24,74	26,29	27,84	29,38	30,93	
470	1,57	3,14	4,72	6,29	7,86	9,43	11,00	12,57	14,15	15,72	17,29	18,86	20,43	22,00	23,58	25,15	26,72	28,29	29,86	31,43	
480	1,60	3,19	4,79	6,39	7,98	9,58	11,18	12,77	14,37	15,97	17,56	19,16	20,76	22,35	23,95	25,55	27,14	28,74	30,34	31,93	
490	1,62	3,24	4,86	6,49	8,11	9,73	11,35	12,97	14,59	16,21	17,84	19,46	21,08	22,70	24,32	25,94	27,57	29,19	30,81	32,43	
500	1,65	3,30	4,95	6,60	8,25	9,90	11,55	13,20	14,85	16,50	18,16	19,81	21,46	23,11	24,76	26,41	28,06	29,71	31,36	33,01	

Figura 32 - Cantidad de hidrógeno según volumen y presión.

2. Configuración 2: 3 depósitos a la misma presión.

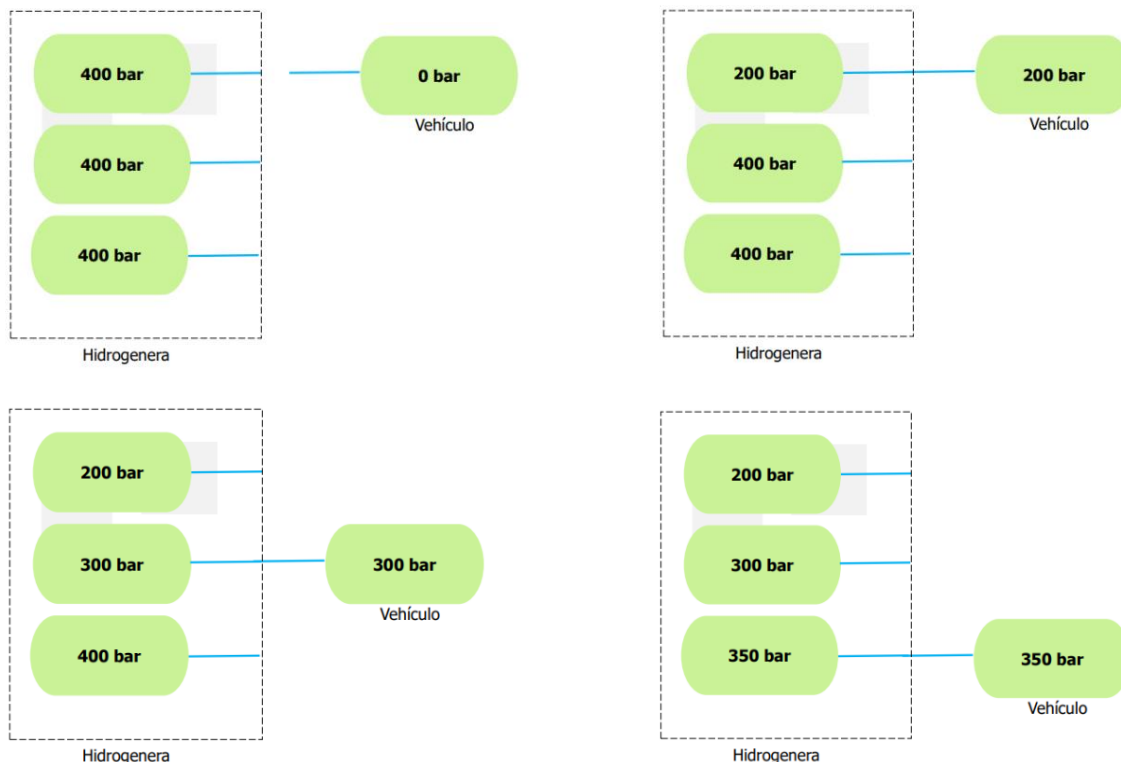


Figura 33 - Esquemas configuración 2.

Esta configuración se diferencia de la anterior en que la cascada se realiza con los 3 depósitos a 400 bar. En este caso todos los volúmenes son iguales. Los cálculos de la anterior se pueden aplicar a este caso también:

1. DEPÓSITO 1 Y CAMIÓN			
Si Pf1 va a ser aproximadamente P1/2:		factor de compresibilidad para Pf 1= 200 bar	
Pf1	200,00 bar	Z=	1,1318
n1 H2 D1	8,37 kg		
n1 H2	9,41 kg		
600	9,41	Pc1	200 bar
300	4,70		
Cantidad de hidrogeno en el camion =		4,70 kg	
Cantidad de hidrogeno en el D1 =		4,70 kg	t llenado D1 tras una recarga = 7,51 h

Figura 34 - Cálculos primer depósito de la cascada.

2. DEPÓSITO 2 Y CAMIÓN			
Si Pf1 va a ser aproximadamente (Pf1+P2) / 2:			
Pf2	294,93	bar	
Iteramos para Pf = 295 bar			
Pf2	295,69	bar	
Iteramos para Pf = 296 bar			
Pf2	295,86	bar	
Iteramos para Pf = 295,827 bar			
Pf2	295,83	bar	
n2 H2	13,11	kg	
n H2 D2	8,37	kg	
600	13,11		
300	6,56		
Cantidad de hidrogeno en el camion =		6,56	kg
Cantidad de hidrogeno en el D2 =		6,56	
		t llenado D2 tras una recarga =	3,71 h

factor de compresibilidad para Pf 2= 300 bar	
Z=	1,20101
para Pf 2= 295 bar	
Z=	1,2041
para Pf 2= 296 bar	
Z=	1,2048
para Pf 2= 295,83 bar	
Z=	1,2047

Z2	1,27
Zc	1,1318

Pf2 =	295,83	bar
-------	--------	-----

Figura 35 - Cálculos segundo depósito de la cascada.

3. DEPÓSITO 3 Y CAMIÓN			
Si Pf1 va a ser aproximadamente (Pf2+P3) / 2:			
Pf3	347,92	bar	
Iteramos para Pf = 347 bar			
Pf3	347,33	bar	
Iteramos para Pf = 347,4 bar			
Pf3	347,41	bar	
Iteramos para Pf = 347,408 bar			
Pf3	347,41	bar	
n3 H2	14,90	kg	
n H2 D3	8,37	kg	
600	14,90		
300	7,45		
Cantidad de hidrogeno en el camion =		7,45	kg
Cantidad de hidrogeno en el D3 =		7,45	kg
		t llenado D2 tras una recarga =	1,88 h

factor de compresibilidad para Pf 3= 350 bar	
Z=	1,2426
para Pf 3= 347 bar	
Z=	1,2405
para Pf 3= 347,4 bar	
Z=	1,2408
para Pf 3= 347,41 bar	
Z=	1,2408

Z3	1,27
Zc	1,2047

Pf3 =	347,41	bar
-------	--------	-----

Figura 36 - Cálculos tercer depósito de la cascada.

En conclusión, para la configuración 1 se necesitan 1050 l, es decir, 21 botellas de 50 l y para la configuración 2900 l, que equivalen a 18 botellas. Como uno de los requisitos es el tamaño de la instalación y, desde el punto de vista económico, cuantas más botellas más dinero cuesta. Se elige la configuración 2. Además, según la simulación que se recoge en el Anexo I la configuración seleccionada es más rápida.

3.5.4 SISTEMA DE DISPENSACIÓN

El sistema de dispensación está compuesto por 3 elementos principales: el boquerel, la manguera y el breakaway. Los 3 componentes han sido elegidos del fabricante Walther präzision.

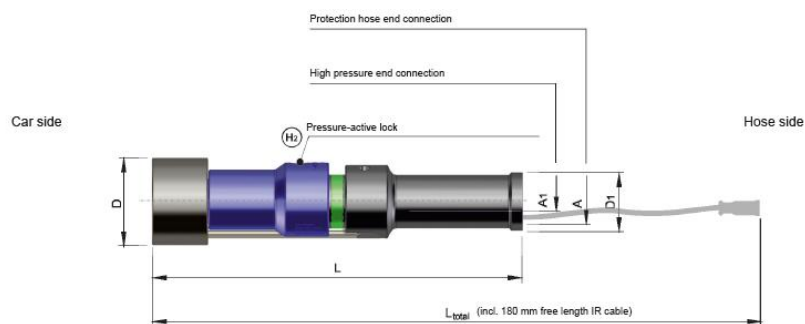
1. Boquerel:

En este caso se elige la serie NF (normal Flow) ya que el flujo másico va a ser menor o igual a 60 g/s.

Available nozzle	Flow rates [g/s]	Operating pressure max. [MPa]	Nominal pressure [MPa]	Cv value
35 MPa / NF*	30	43,8	35	0,55
35 MPa / HF*	120	43,8	35	0,55
70 MPa / NF*	60	87,5	70	0,2

Figura 37 – Boquerel.

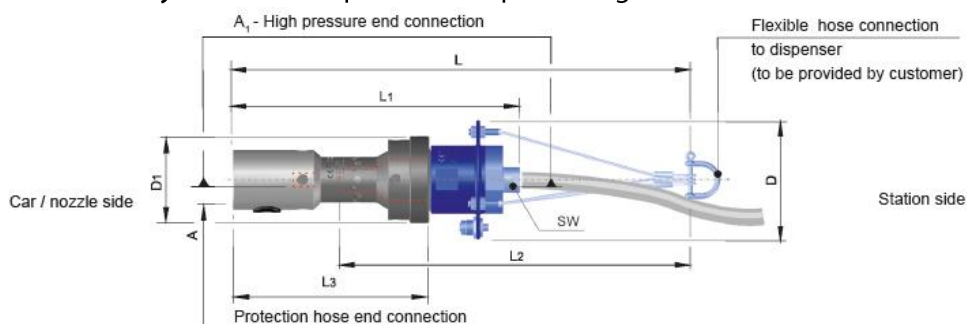
Este componente tiene la opción de incluir o no la conexión con el vehículo (conexión IR), que no va a ser necesaria.



NB	Product type	A	A1	D / D1 [mm]	L [mm]	Nominal / maximal-pressure [MPa]	Weight [kg]	ID	Part number	Cable lenght [mm]
8	35 MPa - NF* Refueling Nozzle (KTL)	M40 x 1,5	9/16-18 UNF with sealing cone 37°	75 / 50	319	35 / 43,8	1,82	237783	HG-008-0-XX005-NBAA-Y016-BB-A0086-S035	500

Figura 38 – Características del boquerel.

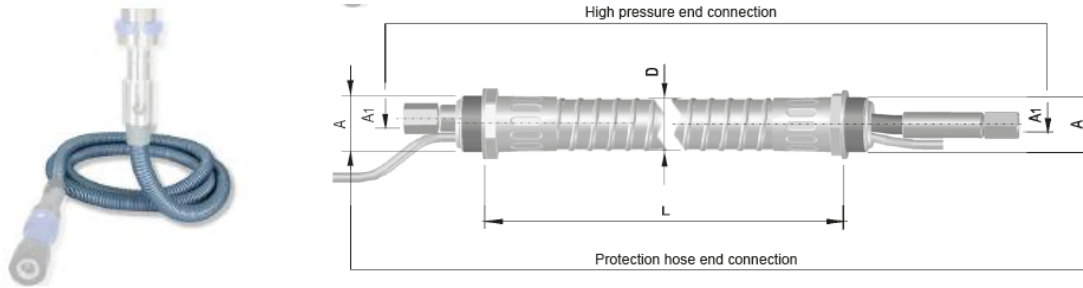
2. Break-away: elemento imprescindible para la seguridad de las instalaciones.



NB	Product type	A	A1	SW	D / D1 [mm]	L / L1 [mm]	Nominal / maxial-pressure [MPa]	Weight [kg]	ID	Part number	Cable
8	35 MPa - NF* Breakaway coupling complete	M40 x 1,5 (female)	9/16-18 UNF with sealing cone 37°	21	127 / 76	440 / 260	35 / 43,8	4,8	233434	HG-008-B-02001-ACFA-Y216-BB-S035	LEMO

Figura 39 – Características del break-away.

3. Manguera:



NB	Product type	A	A1	Cable	L [mm]	D [mm]	Weight [kg]	ID	Part number
4	Hose set without IR cable 70 MPa - NF*	M40 x 1,5	High pressure hose: (Spir Star)** 9/16-18 UNF M-Swivel*	without cable	4000	ca.40	k.A.	141099	95721-B-00008-AAAD-BB

Figura 40 – Características de la manguera.

3.5.5 TUBERÍAS

Según empresas del sector del hidrógeno, para las presiones y caudales con las que vamos a trabajar, se recomienda un diámetro de media pulgada. A la hora de buscar tuberías comerciales había muchas con ese diámetro, pero no aguantaban la presión que se había definido. Por ello, como se ha comentado anteriormente, se decidió bajar de 500 bar a 450 bar.

La marca escogida es Fitok. Dentro de sus catálogos se encuentran las tuberías de acero 316 y 316 L, muy utilizadas para aplicaciones con hidrógeno.

Tube O.D. in.	Wall Thickness in.															
	0,010	0,012	0,014	0,016	0,020	0,028	0,035	0,049	0,065	0,083	0,095	0,109	0,120	0,134	0,156	0,188
	Working Pressure psig															
1/16	5600	6800	8100	9400	12000											
1/8						8500	10900									
3/16						5400	7000	10200								
1/4						4000	5100	7500	10200							
5/16							4000	5800	8000							
3/8							3300	4800	6500	7500						
1/2							2600	3700	5100	6700						
5/8								2900	4000	5200	6000					
3/4								2400	3300	4200	4900	5800				
7/8								2000	2800	3600	4200	4800				
1									2400	3100	3600	4200	4700			
1 1/4										2400	2800	3300	3600	4100	4900	
1 1/2											2300	2700	3000	3400	4000	4900

Figura 41 - Medidas de la tubería

La tubería tiene 1/2", un espesor de 0,083" y aguanta una presión de 6700 psig (462 bar).

Una vez seleccionada la tubería y conocido el caudal que nos fija el compresor se comprobó que la velocidad no superaba los 20 m/s con la siguiente fórmula:

$$v = (378 * Q * Z) / (P * D^2) [1]$$

El caso más desfavorable está en el llenado del depósito de las cascadas, ya que el llenado del vehículo va a estar controlado por un medidor de flujo masico que regulará una válvula de paso. Dicho esto, la velocidad máxima se alcanza cuando los depósitos están vacíos, la cual pese a no entrar en el rango se considera aceptable ya que es cercana a los 20 m/s y el número de Mach es menor que 0,3. Si el número de Mach es inferior a 0,3 quiere decir que el hidrógeno se puede aproximar como un fluido incompresible.

D	8,48	mm		
m2	30	g/s		
m2	108	kg/h	v	28,48
Q	5,428	Nm3/h		
Z	0,9983			
P	1	bar		

Figura 42 - Cálculos de la velocidad para 1 bar.

Para presiones elevadas la velocidad es muy pequeña pero no resulta un problema ya que el compresor nos asegura un flujo másico constante.

D	8,48	mm		
m2	30	g/s		
m2	108	kg/h	v	0,10
Q	5,428	Nm3/h		
Z	1,2426			
P	350	bar		

Figura 43 - Cálculos de la velocidad para 350 bar.

Por otro lado, se comprueba en Excel que la longitud máxima de tubería, pese a que estas van a ser pequeñas, mediante la siguiente fórmula:

$$4f \frac{L_{\max}}{D} = \frac{(1 - M^2)}{\gamma M^2} + \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \ln \left[\frac{(\gamma + 1) M^2}{2 + (\gamma + 1) M^2} \right]$$

Figura 44 - Fórmula para calcular la longitud máxima de tubería.

Z	1,2776		
P	400	bar	
gamma	1,4		
R	8,314		
T	293	K	
Dint	0,00848	m	
a	1300	m/s	
V(Ma)	390	m/s	
Ma	0,3		
epsilon	0,000015	mm	
rho	25,9106302	kg/m ³	
M	2,016	g/mol	
Mu	0,0000089		
f	0,0225		
Lmax	80,1910626	m	
Re	9,63E+06		
Rug	0,00176887		

Figura 45 - cálculos Longitud máxima de la tubería.

Para estos cálculos se ha usado el diagrama de moody para saber el factor de fricción a través del número de Reynolds y de la rugosidad relativa. La longitud máxima que podríamos usar son 80 m aproximadamente, muy grande en comparación con los, aproximadamente, 2 m que se usarán.

3.5.6 ALMACENAMIENTO INICIAL

Previo al compresor es necesario almacenar suficiente hidrógeno para que pueda funcionar todo el tiempo que necesite. El tiempo máximo de trabajo del compresor va a ser cuando necesitemos recargar los 3 depósitos del almacenamiento de alta presión y estén completamente vacíos.

Conociendo que hay un total de 25,11 kg a recargar (18 botellas de 50 l a 400 bar), el ritmo al cual se va a vaciar el depósito inicial, y durante cuánto tiempo va a funcionar el compresor se necesitará un volumen de 5,1 m³.

Total a llenar	25,11	
rho	0,0899	kg/Nm ³
me	2	Nm ³ /h = 0,1798 kg/h
ms	5,428	Nm ³ /h = 0,488 kg/h
Dif. m	0,308	kg/h

Si los depósitos están totalmente vacíos el compresor estará funcionando 51,45 h

Si funciona 51,45h y el buffer se descaraga 0,308 kg/h necesitaremos, a 35 bar, un tanque que permita almacenar 15,856 kg H₂

Viendo la tabla de almacenamiento a 35 bar necesitamos 5,1m³ de volumen

Figura 46 - Cálculos depósito inicial.

En este caso la Lapesa es un fabricante de recipientes a presión que realiza depósitos específicos para hidrógeno gas comprimido, destinados a estaciones de suministro de hidrógeno o uso industrial.



Figura 47 - Depósito inicial.

3.5.7 INSTRUMENTACIÓN

En este apartado se va a mostrar los distintos componentes necesarios para el correcto funcionamiento de la hidrogenera. Hay que mencionar que todos los componentes que se van a mostrar a continuación son aptos para trabajar con hidrógeno, en el rango de presiones que necesitamos y para el tamaño de tubería seleccionado.

1. **Válvula de bola:** dispositivo que se encarga de regular el flujo de hidrógeno. Lo usaremos especialmente para cuando haya averías o queramos sustituir componentes y necesitemos asegurarnos de que la línea está cerrada. El fabricante es Fitok y se elige la BPSS-FNS8-10.

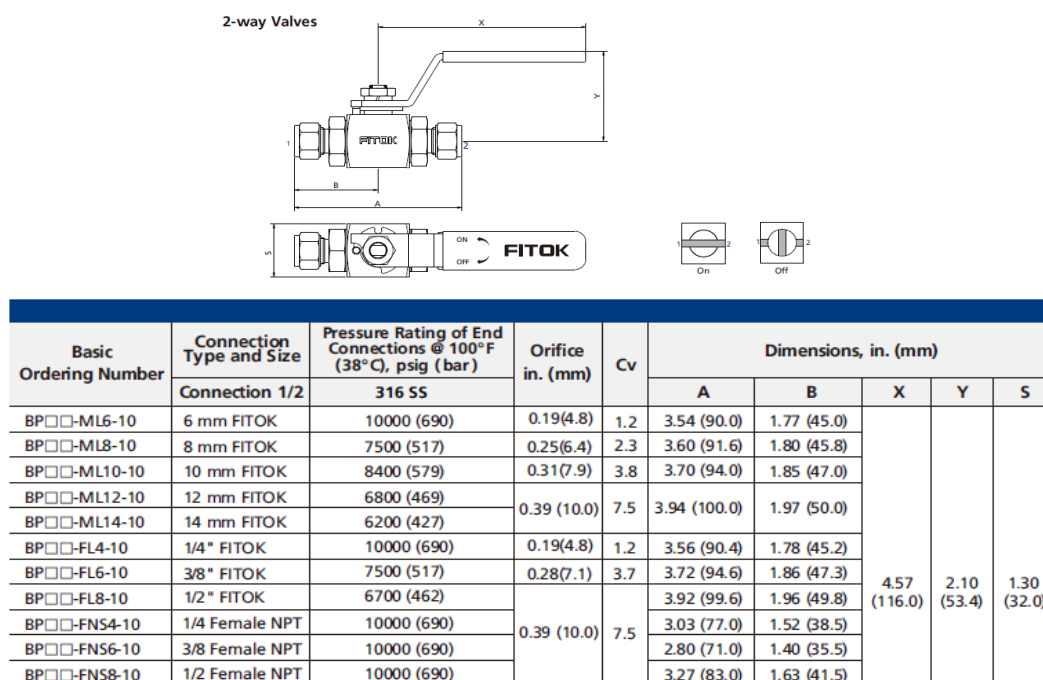


Figura 48 - Válvula de bola.

2. **Válvula antirretorno:** permiten el flujo en una única dirección. Necesarias para la salida del compresor, para que no pueda ir hacia atrás el flujo de hidrógeno y se produzcan averías. El fabricante es Fitok.

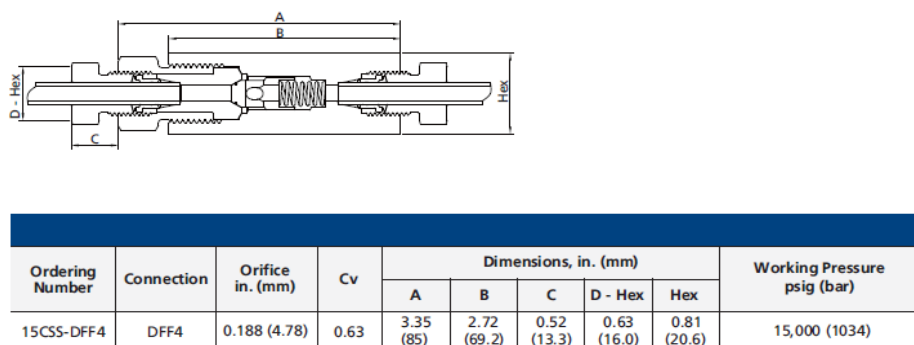


Figura 49 - Válvula antirretorno.

3. **Válvula de alivio:** esta válvula nos asegura que en caso de sobrepresión no tengamos riesgo de seguridad. La escogemos del fabricante Fitok. Esta válvula actuará cuando sobrepasemos la presión en la línea de 414 bar.

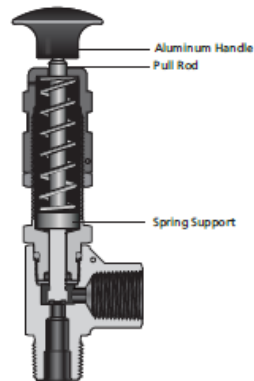


Figura 50 - Válvula de alivio.

4. **Electroválvula:** con el fin de poder tener un control remoto de la hidrogenera se dispondrá de este tipo de válvulas. El fabricante de ellas es Burket.



Figura 51 - Electroválvula.

5. **Controlador de flujo másico:** Es necesario para que el flujo másico no sobrepase los 30 g/s que marca el sistema de dispensación elegido. El fabricante es Burket.



Figura 52 - Controlador de flujo másico.

3.5.8 SIMULACIÓN

Se ha utilizado el software H2Fills para realizar una simulación del llenado del vehículo. H2Fills es un software de simulación desarrollado para analizar y modelar el proceso de recarga de vehículos con pila de combustible en estaciones de hidrógeno, con la finalidad de dar ver la evolución de los parámetros clave durante dicho proceso.

Permite simular la transferencia de hidrógeno desde un tanque de alta presión hasta el depósito del vehículo. Como va a ser orientativo me he basado en una configuración que el propio programa te proporciona, poniendo las características de mis componentes. Con ella no logramos un resultado exacto, pero si una aproximación válida.

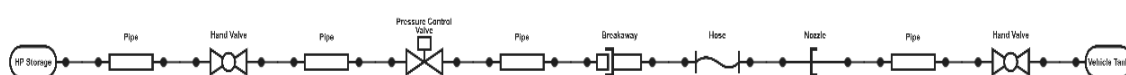


Figura 53 - Configuración en serie.

Al no estar la opción del almacenamiento en cascada he realizado la simulación por separado de cada uno, fijando las condiciones iniciales y a las que queremos llegar con cada depósito de la cascada.

La finalidad de esta simulación es comprobar las presiones obtenidas con el cálculo, ver cuánto tiempo tarda en repostar y comprobar que la temperatura es adecuada y no supera los 85° C.

Este software nos proporciona todos los datos en un Excel. Gracias a ello podemos generar gráficos para observar la evolución de los parámetros:

1. **Temperatura en el tanque del vehículo:** Para este parámetro vamos a partir de una temperatura inicial de 20° C y nunca pasaremos de los 85° C. Como esto sucedía me he visto obligado a realizar paradas para que el gas se enfríe en las que la presión se ha supuesto que no va a variar, como se observa en la gráfica.

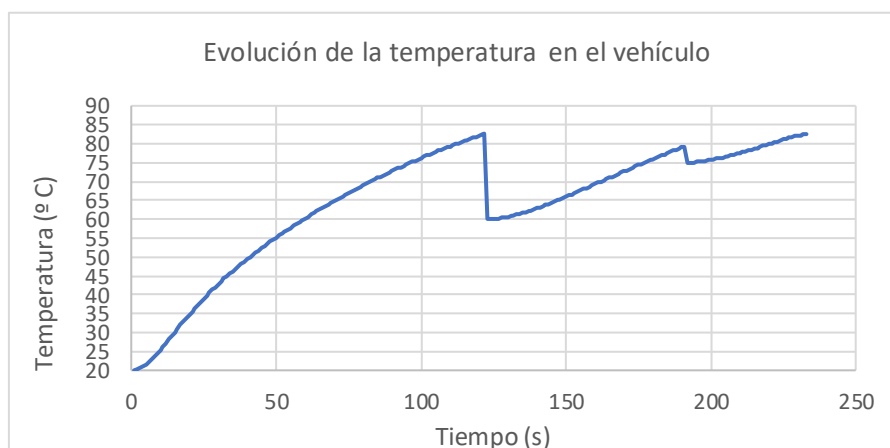


Figura 54 - Evolución de la temperatura en el depósito del vehículo.

2. **Presión en el tanque del vehículo:** La presión mínima desde la que se comienza a simular son 20 bar (2 MPa) y se simula hasta los 350 bar. Se puede observar 3 tramos en la evolución de la presión que corresponden al cambio de depósitos de la cascada en el repostaje.

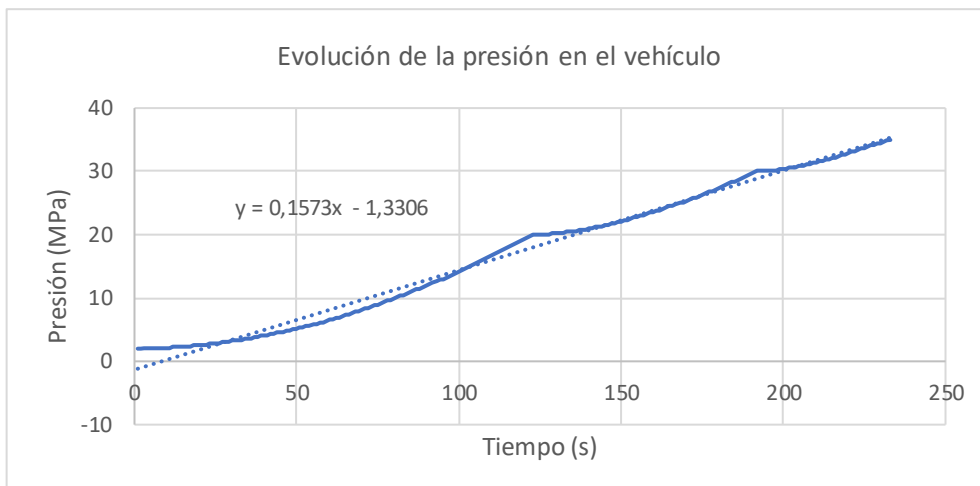


Figura 55 – Grafica de la evolución de la presión en el depósito del vehículo.

De esta gráfica se ha sacado la línea de tendencia y con ella la ecuación que sigue para comprobar que la rampa aumento de presión corresponde con los 15 MPa/min. Dado que el término que indica la pendiente es el que acompaña a la x y este es 0,1573 es correcto. Además, la SAE J2601 recomienda un APRR (Average pressure ramp rate) de 150-200 bar/min

3. **Tiempo recarga:** Este parámetro no se pudo definir con exactitud, ya que el programa genera resultados sin tener en cuenta las paradas necesarias para no exceder la temperatura máxima. Si no se tuviera en cuenta estos parones tardaríamos aproximadamente 4 minutos, muy similar a un tiempo de repostaje de otros combustibles como la gasolina.

3.5.9 PRESUPUESTO

Se ha realizado un presupuesto estimado de los componentes de la hidrogenera. Los precios han sido estimados en base a componentes similares, a otros proyectos y mediante ofertas previas.

Componente	Fabricante	Coste/Ud.	Uds	Coste
Compresor	Hofer	50.000,00 €	1	50.000,00 €
Tanque tipo 1 (botellas)	Worthington	1000,00 €	18	18.000,00 €
Boquerel	Walther präzision	150.000,00 €	1	150.000,00 €
Manguera	Walther präzision		1	

Break away	Walther präzision		1	
Regulador másico	Burket		1	
Filtro	Fitok		1	
Tubería	Fitok	-	-	-
Válvula de bola	Fitok	400,00 €	20	8.000,00 €
Electroválvula	Burket	400,00 €	20	8.000,00 €
Válvula antirretorno	Fitok	400,00 €	2	800,00 €
Válvula de alivio	Fitok	400,00 €	1	400,00 €

Tabla 5 – Presupuesto.

El coste total asciende a 235.600,00 €.

4. CONCLUSIÓN

Con el inminente desarrollo y evolución de las tecnologías del hidrógeno, y de este como vector energético, el Instituto Tecnológico de Aragón planteó un proyecto para dispensar hidrógeno. Es la pieza que le falta para completar su laboratorio "zero emisiones" y con la que se podría aprovechar la producción de hidrógeno y recargar la cabeza tractora que funciona con pila de hidrógeno.

Durante el proyecto se estudió la actualidad de esta tecnología, el comportamiento del hidrógeno y se diseñó una hidrogenera empezando por definir los requisitos y características de esta hasta seleccionar los componentes principales y ofrecer una pequeña simulación y un presupuesto orientativo.

Se valoraron 3 posibles configuraciones, las cuales se fueron descartando según avanzaba el proyecto. Se realizaron cálculos para comprobar que era correcta la selección de las botellas del almacenamiento de alta presión y de las tuberías.

Cabe destacar que, aunque principalmente se ha tenido en cuenta las SAE J2601, el diseño de la hidrogenera es para uso privado del ITA, para investigación, y no requiere del cumplimiento exhaustivo de la legislación y las directivas de aplicación que permitan obtener el marcado CE.

Para finalizar, el resultado del proyecto cumple con las expectativas que se fijaron en el inicio y tiene un amplio desarrollo en el futuro. Desde ampliar la capacidad de recarga hasta 700 bar, hasta optimizar el llenado del tanque del vehículo y del almacenamiento en cascada o incluir un sistema de enfriamiento para reducir los tiempos de recarga. Todo esto queda como líneas futuras para mejorar la hidrogenera que se ha diseñado.

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] De Miranda Santos, B. (2019). *Cómo calcular tuberías de gas*. Recuperado de: [Cómo calcular tuberías de gas - IngenierosIndustriales.com](https://www.ingenierosindustriales.com)

Armiño, B., & Pollos, J. (2023). Módulo 1. TEMA 1. ¿Qué es el hidrógeno? Pilar clave en la transición energética. Documentación Máster, Universidad de Burgos.

Armiño, B., & Pollos, J. (2023). Módulo 2. TEMA 1. Propiedades del hidrógeno. Documentación Máster, Universidad de Burgos.

Armiño, B., & Pollos, J. (2023). Módulo 4. TEMA 1. Introducción al almacenamiento de H₂. Documentación Máster, Universidad de Burgos.

Alegre, J.M., & Cuesta, I.I. (2023). Módulo 4. TEMA 2. Almacenamiento de H₂ gaseoso a presión. Tuberías y depósitos tipo I, II y III. Documentación Máster, Universidad de Burgos.

García, O., & Lahuerta, F. (2023). Módulo 4. TEMA 3. Almacenamiento de H₂ gaseoso a presión. Depósitos tipo IV y V. Documentación Máster, Universidad de Burgos.

Ballorca-Juez, D. (2023). Módulo 4. TEMA 5. Sistemas de compresión de hidrógeno. Documentación Máster, Universidad de Burgos.

Lozano, L.M. (2023). Módulo 5. TEMA 5. Sistemas de compresión de hidrógeno. Documentación Máster, Universidad de Burgos.

García Rodríguez, A. (2014). Estudio tecno-económico sobre la ampliación de la capacidad de recarga de la hidrogenera de fundación hidrógeno Aragón. Trabajo Fin de Master, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, Zaragoza.

Rosa Palma, A. (2023). Ingeniería básica de una hidrogenera en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla. Trabajo Fin de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Sevilla.

Márquez Gil, A.M, (Julio de 2021). Estación de producción y distribución de hidrógeno para flota de vehículos (hidrogenera). Trabajo Fin de Master, Escuela de ingenierías industriales, Universidad de Extremadura, Badajoz.

Marcuello Fernandez, P., & Romero Elu, L. (2008). "HIDROGENERA EXPO ZARAGOZA". *Dyna*, 83(9), pp. 579-582.

T. Kuroki, K. Nagasawa, M. Peters, D. Leighton, J. Kurtz, N. Sakoda, M. Monde, Y. Takata, "Thermodynamic Modeling of Hydrogen Fueling Process from High Pressure Storage Tanks to Vehicle Tank," *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 42, 22004-22017, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.037>

6. ANEXO I. SOFTWARE H2FILLS

Se ha utilizado el software H2Fills para realizar una simulación aproximada de la hidrogenera. Este programa desarrolla un modelo termodinámico de una estación de abastecimiento de hidrógeno que simula el proceso real de abastecimiento, en el que el hidrógeno se suministra desde un tanque de almacenamiento de alta presión al tanque de un vehículo eléctrico de pila de combustible.

Para que el modelo sea preciso, utiliza los mismos componentes y especificaciones que en los sistemas de almacenamiento de hidrógeno reales. Después de ello se configuran los componentes y sus especificaciones, y se establecen los perfiles de presión y temperatura. Con base en estos perfiles, el modelo calcula la temperatura, la presión y el caudal másico de hidrógeno en cada posición aguas abajo, incluido el interior del tanque del vehículo.

Los valores predichos por el modelo se comparan con datos experimentales, y demostramos que el modelo desarrollado permite simular con precisión dichos valores en cualquier posición durante el proceso de repostaje.

Lo cierto es que se han encontrado distintas dificultades a la hora de encontrar componentes y definir las características. Pese a ello y gracias a que este incorpora configuraciones básicas para poder realizar simulaciones con los mínimos componentes se ha logrado simular.

Al abrir el programa se muestra la pantalla principal. En ella se encuentra un espacio en blanco para insertar los componentes que se encuentran en la columna de la izquierda que se pueden unir para configurar la estación de servicio.



Figura 56 - Pantalla principal del H2Fills

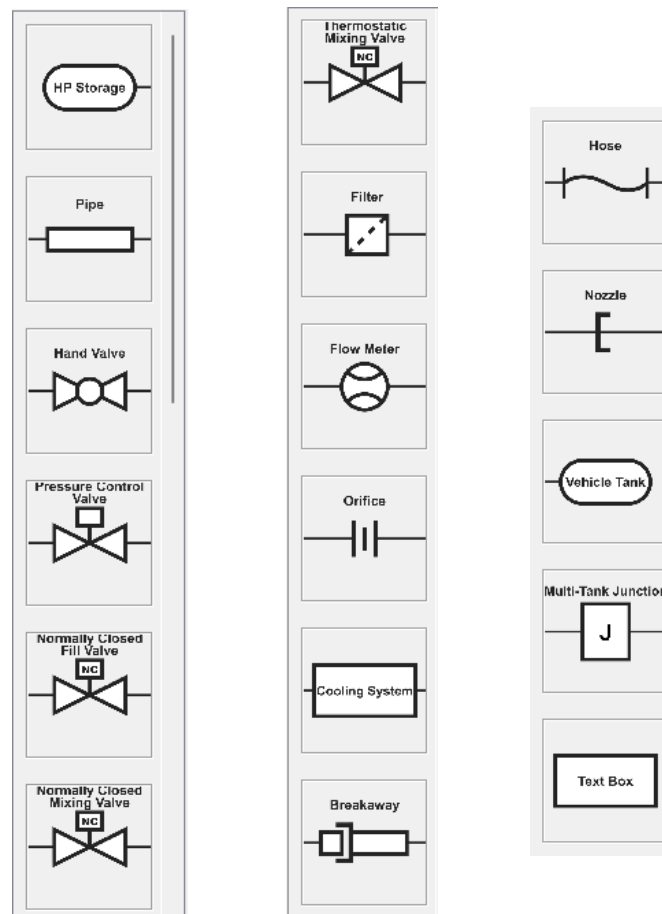


Figura 57 - Componentes disponibles para el software.

Como se ha dicho, este software ofrece 4 configuraciones:

1. **Configuración en serie:** esta es la configuración más simple para el programa. Muestra los componentes mínimos necesarios para ejecutar la simulación.

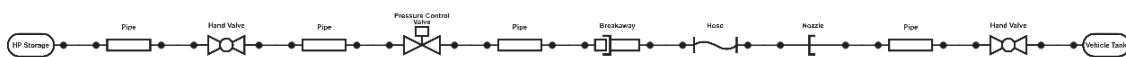


Figura 58 - Configuración en serie.

2. **Configuración en paralelo:** demuestra la capacidad de dividir los flujos anteriores y posteriores de un sistema de enfriamiento.



Figura 59 - Configuración en paralelo.

3. Configuración de la estación NREL (Laboratorio Nacional de Energía Renovable):

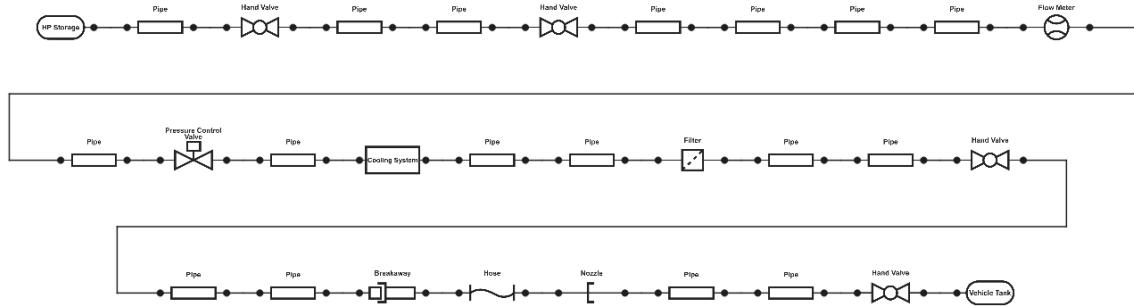


Figura 60 - Configuración de la estación NREL.

4. Configuración de varios tanques: Esta demostración muestra una configuración que utiliza una unión de múltiples tanques para simular el llenado de varios tanques de vehículos.

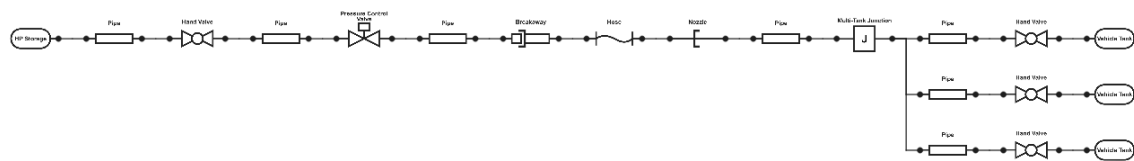


Figura 61 - Configuración de varios tanques.

Una vez se tiene la configuración seleccionada o formada hay que fijar las características de los componentes. Si se le da doble click encima de cada uno se abre una pestaña con los parámetros que se pueden modificar.

Por último, hay que definir el perfil de llenado, comprobar que no hay fallos para simular pulsando las teclas ctrl + T y realizar la simulación.

General Conditions	
Ambient Temperature [degC]:	20
Pressure Ramp Rate [MPa/min]:	15
Fuel Delivery Temperature [degC]:	-40
Terminating Conditions	
<input checked="" type="radio"/> Pressure [MPa]:	70
<input type="radio"/> Temperature [degC]:	85
<input type="radio"/> State of Charge [%]:	97

Figura 62 - Perfil de llenado.

Cuando comienza la simulación se abre una pantalla donde van apareciendo la temperatura y presión cada segundo de simulación que va realizando el programa:

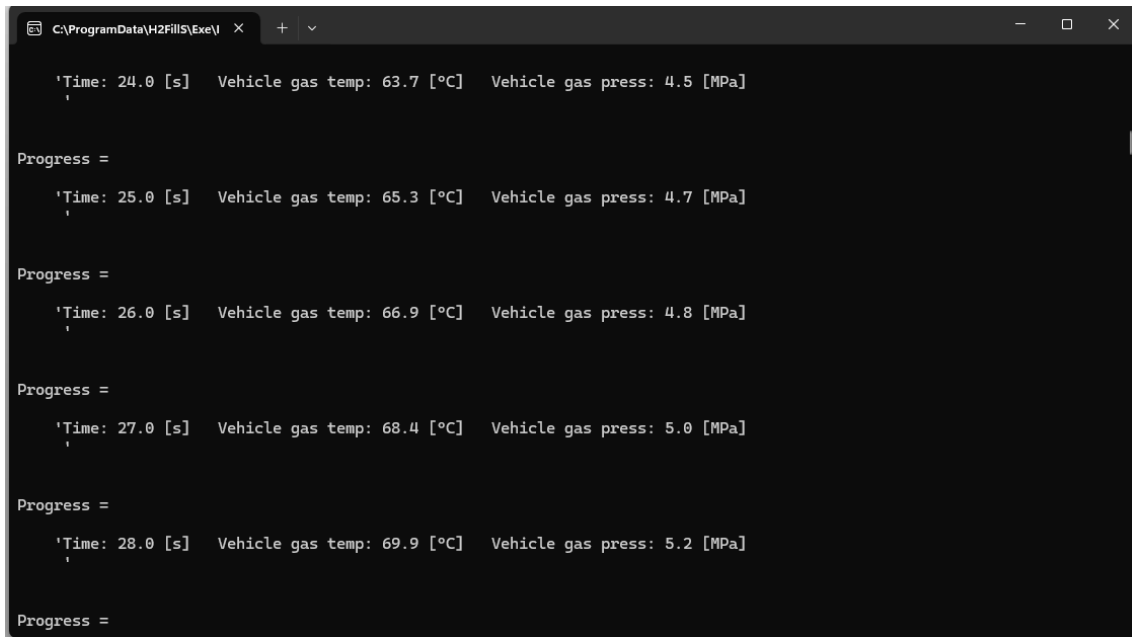


Figura 63 - Pantalla de simulación

Tras finalizar la simulación el software nos proporciona un archivo excel con todos los datos y la siguiente representación grafica:

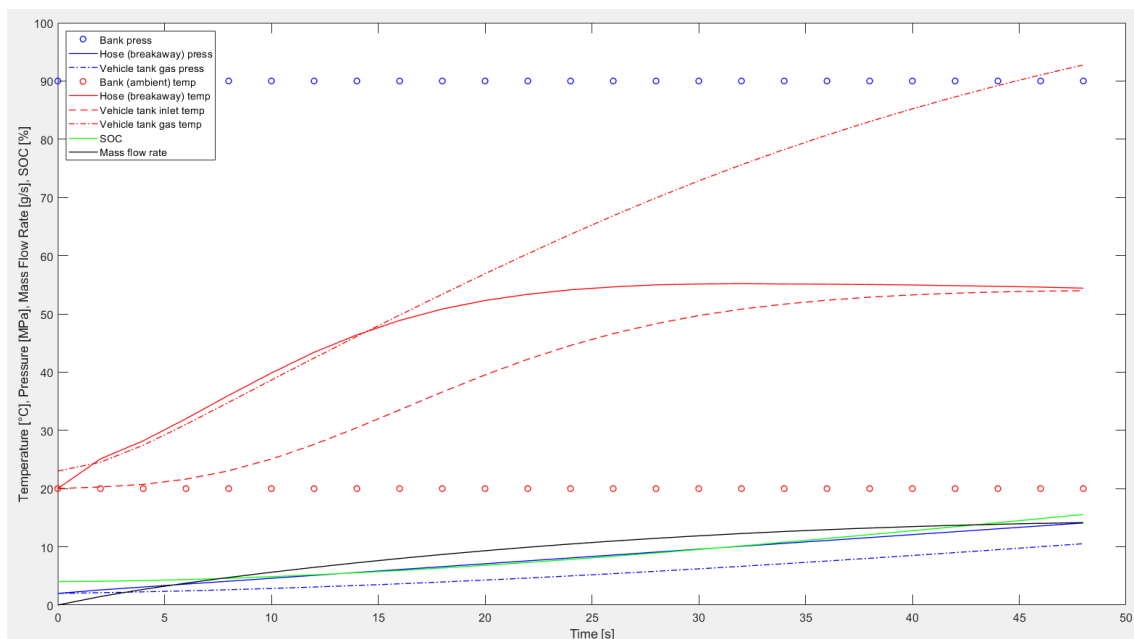


Figura 64 - Resultados simulación.

La mayor dificultad que se ha encontrado ha sido al definir las características de los componentes, ya que en muchos casos no podíamos fijar parámetros que nos interesaban o no disponíamos de la información que pedían. Para intentar solucionarlo se indagó mas en los componentes seleccionados, pero finalmente se optó por dejar los que venían por defecto.

Se ha usado una configuración que el propio programa proporciona ya que no pudimos implementar nuestra configuración con exactitud y no obteníamos resultados adecuados. Es por ello por lo que esta simulación es una aproximación a la realidad.

A continuación, se van a comparar los resultados de diferentes pruebas que se han realizado, todas ellas con la misma configuración, pero con distintos parámetros que representan las configuraciones propuestas en el proyecto en mayor o menor medida. Cabe destacar que las configuraciones en cascada se han realizado en 3 archivos diferentes ya que no daba la opción de hacer una simulación de ese tipo. Es por ello, que las gráficas que se van a mostrar se han realizado desde la hoja Excel en la que hemos juntado todos los datos.

- Cascada de 3 depósitos a diferentes presiones (configuración 1).

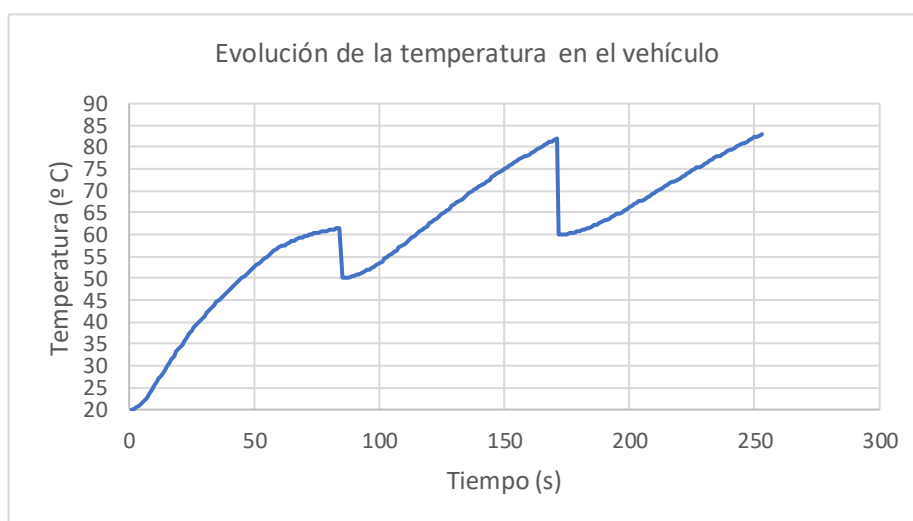


Figura 66 - Evolución de la temperatura en el depósito del vehículo.

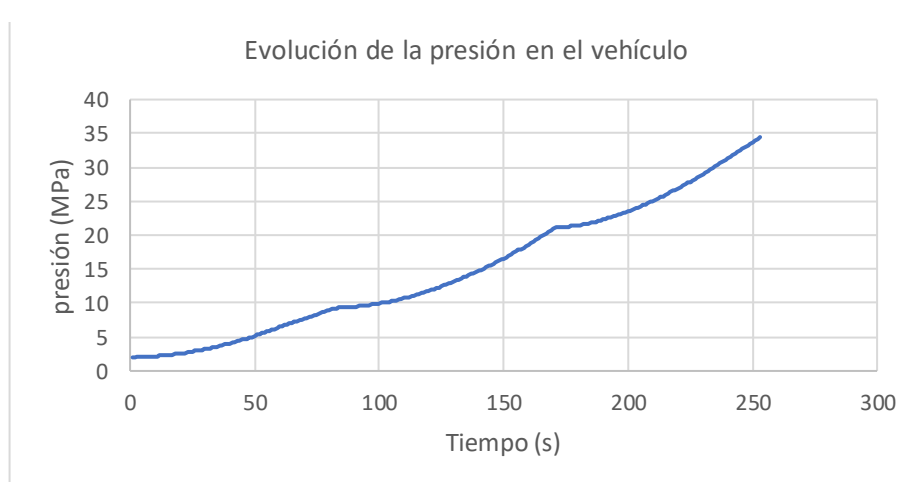


Figura 65 - Evolución de la presión en el depósito del vehículo.

- Cascada de 3 depósitos a la misma presión (configuración 2).

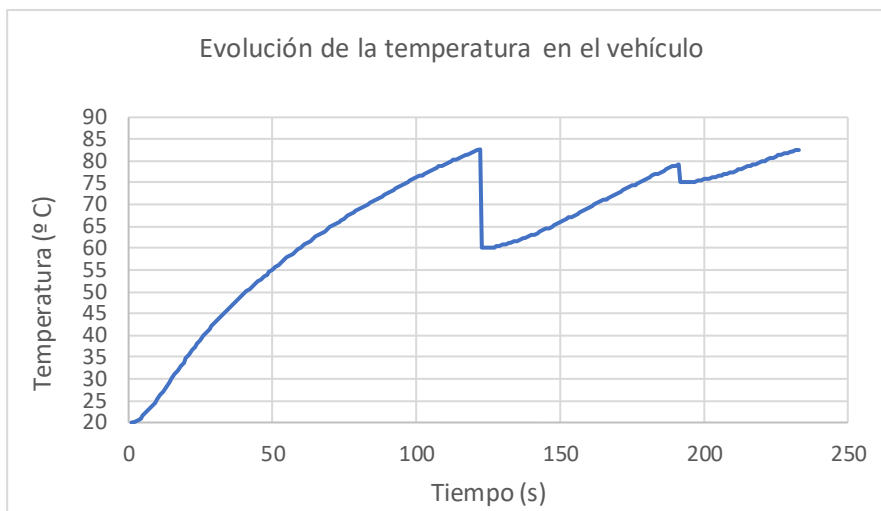


Figura 67 - Evolución de la temperatura en el depósito del vehículo.

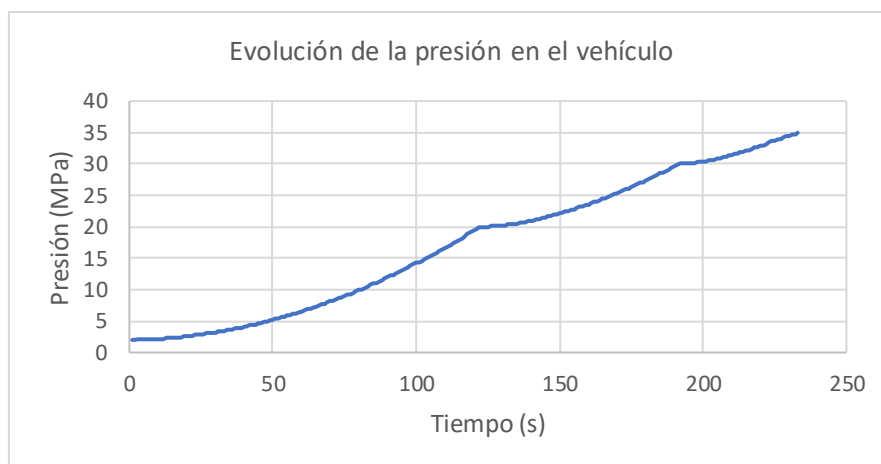


Figura 68 - Evolución de la presión en el depósito del vehículo.

- 1 único depósito (configuración 3)

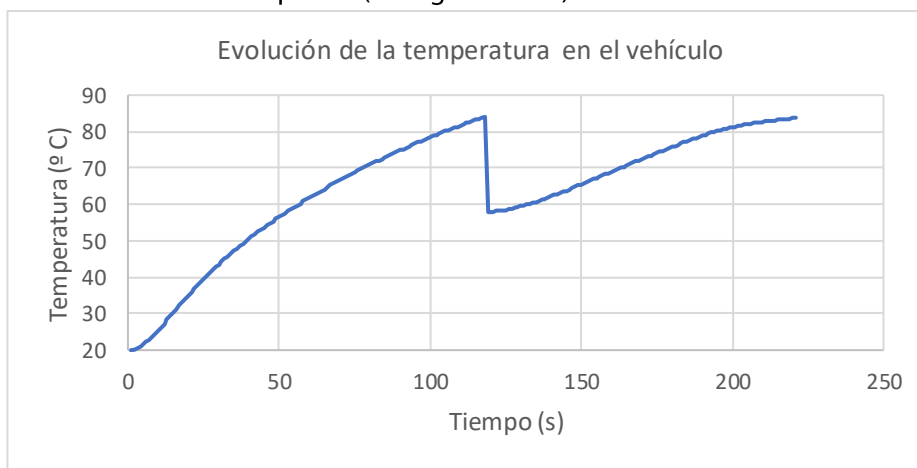


Figura 69 - Evolución de la temperatura en el depósito del vehículo.

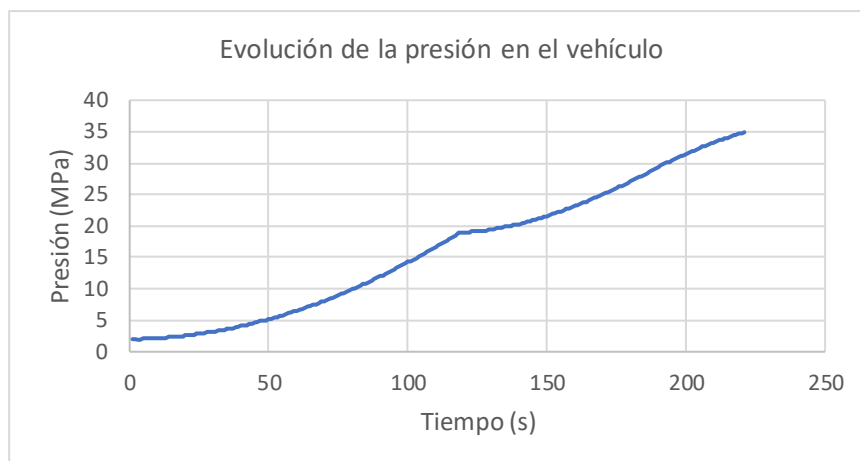


Figura 70 - Evolución de la presión en el depósito del vehículo.

Los resultados de las 3 simulaciones son muy parecidos. El tiempo que necesitan es similar en la configuración 2 y 3 y aumenta en la 1. Todas necesitan parar de repostar para que disminuya la temperatura y la evolución de la temperatura es similar, siendo los parones para reducir la temperatura de magnitudes cercanas a los 20 o 15 °C.

El resultado es que no se obtiene una simulación que se pueda utilizar de cara a elegir una opción u otra, pero sí para complementar a los cálculos realizados y la información usada para la elección.