



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Máster

ESTUDIO TECNO-ECONÓMICO SOBRE LA AMPLIACIÓN DE LA  
CAPACIDAD DE RECARGA DE LA HIDROGENERA DE FUNDACIÓN  
HIDRÓGENO ARAGÓN

TECHNO-ECONOMIC STUDY ON THE EXPANSION OF THE  
RECHARGE CAPACITY OF THE FUNDACIÓN HIDRÓGENO  
ARAGÓN HYDROGEN FUELLING STATION

Autor

**Alejandro García Rodríguez**

Director

**Pedro Casero Cabezón**

Codirector

**Luis Miguel Romeo Giménez**

Máster en Ingeniería Industrial  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
Departamento de Ingeniería Mecánica, Área de Máquinas y Motores Térmicos  
2.020

# ESTUDIO TECNO-ECONÓMICO SOBRE LA AMPLIACIÓN DE LA CAPACIDAD DE RECARGA DE LA HIDROGENERA DE FHA

## Resumen

La estación de recarga de vehículos de hidrógeno de la Fundación Hidrógeno Aragón se caracteriza por disponer de una capacidad de recarga de 350 bar. Dicha capacidad de recarga se encuentra obsoleta frente a la capacidad de recarga de los vehículos actuales, definida a 700 bar. Con la finalidad de adaptarse al nuevo estándar, se dimensiona una estación de recarga de vehículos de hidrógeno con capacidad de recarga a 700 bar basada en la instalación existente. Para ello se proponen cinco posibles configuraciones. En base a los requerimientos establecidos y al análisis tecno-económico de las cinco configuraciones propuestas se selecciona la configuración óptima para su implantación. Finalmente, la configuración seleccionada resulta ser la opción que permite un mayor número de recargas consecutivas y que presenta el menor tiempo de recarga al tratarse de una recarga en cascada. Además, la configuración seleccionada, integra los equipos de la instalación actual y presenta un alto grado de adaptabilidad ante futuras ampliaciones de la instalación.

[Este documento debe entregarse en la Secretaría de la ENA, dentro del plazo de depósito del TFG/TFM para su evaluación].

D./D<sup>a</sup>. ALEJANDRO GARCÍA RODRÍGUEZ ,en

aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

Máster en Ingeniería Industrial (Título del Trabajo)

Estudio tecno-económico sobre la ampliación de la capacidad de recarga de la hidrogenera de Fundación Hidrógeno Aragón

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 17 de septiembre de 2020



Fdo: Alejandro García Rodríguez

<b>Índice</b>	<b>iv</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>v</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>vi</b>
<b>Listado de siglas</b>	<b>vii</b>

## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	OBJETIVOS .....	3
3.	NORMATIVA.....	4
3.1.	Normativa general:.....	4
3.2.	Normativa específica de estaciones de recarga de hidrógeno .....	4
4.	CONTEXTO GENERAL.....	8
4.1.	Descripción general de una hidrogenera.....	10
4.2.	Principales equipos de una hidrogenera .....	11
5.	DESCRIPCIÓN DE LA HIDROGENERA ACTUAL-MODO DE OPERACIÓN .....	13
6.	CONFIGURACIONES PROPUESTAS.....	18
6.1.	Configuración propuesta 1.....	19
6.2.	Configuración propuesta 2.....	20
6.3.	Configuración propuesta 3.....	21
6.4.	Configuración propuesta 4.....	22
6.5.	Configuración propuesta 5.....	23
7.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CONFIGURACIONES PROPUESTAS.....	24
8.	ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS CONFIGURACIONES PRESELECCIONADAS .....	28
8.1.	Análisis económico .....	28
8.2.	Análisis complementario.....	30
9.	CONFIGURACIÓN SELECCIONADA.....	40
10.	CONCLUSIÓN.....	44
11.	ANEXOS.....	46
11.1.	ANEXO 1 Planos de instalación de la hidrogenera actual y de las configuraciones preseleccionadas.....	46
11.2.	ANEXO 2. Cálculo de la temperatura alcanzada en el interior del depósito del vehículo durante la recarga.....	51
12.	BIBLIOGRAFÍA.....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Condiciones límite de operación fijadas por la norma SAE J2601. [9].....	6
Figura 2. Producción de hidrógeno bajo en carbono, 2013-2030, histórico y previsión.[11] .....	8
Figura 3. Distribución de FCEV, HRS y tipo de vehículo por países en 2019.[11] .....	9
Figura 4. Esquema tipo de una instalación de recarga de hidrógeno. [13].....	10
Figura 5. Diagrama principales equipos de una hidrogenera con generación in-situ de hidrógeno. Fuente: Elaboración propia .....	11
Figura 6. Principales componentes del sistema de dispensado de una hidrogenera. [13] .....	12
Figura 7. Vista aérea de las instalaciones de FHA.....	13
Figura 8. Evolución de la presión en el almacenamiento (350 bar) y en el depósito del vehículo durante la recarga. Fuente: FHA.....	14
Figura 9. Evolución de la temperatura en el almacenamiento (350 bar) y en el depósito del vehículo durante la recarga. Fuente: FHA.....	15
Figura 10. Esquema hidrogenera FHA. Fuente: Elaboración propia .....	16
Figura 11. Diagrama modo de operación Configuración propuesta 1. Fuente: Elaboración propia .....	19
Figura 12. Diagrama modo de operación Configuración propuesta 2. Fuente: Elaboración propia .....	20
Figura 13. Diagrama modo de operación Configuración propuesta 3. Fuente: Elaboración propia .....	21
Figura 14. Diagrama modo de operación Configuración propuesta 4. Fuente: Elaboración propia .....	22
Figura 15. Diagrama modo de operación Configuración propuesta 5. Fuente: Elaboración propia .....	23
Figura 16. Representación ciclo1 Configuración 2. Fuente: Elaboración propia.....	31
Figura 17. Representación ciclo2 Configuración 2. Fuente: Elaboración propia .....	32
Figura 18. Representación ciclo 1 Configuración 3: 2 recargas consecutivas. Fuente: Elaboración propia .....	34
Figura 19. Representación ciclo 2 Configuración 3. Fuente: Elaboración propia .....	35
Figura 20. Representación ciclo 1 Configuración 4: 2 recargas consecutivas. Fuente: Elaboración propia .....	37
Figura 21. Representación ciclo 2 Configuración 4. Fuente: Elaboración propia .....	38
Figura 22. Croquis de ubicación de los equipos para la Configuración seleccionada.....	42
Figura 23. Volumen de control considerado para las configuraciones 2 y 3.....	51
Figura 24. Volumen de control considerado para la configuración 4. ....	52
Figura 25. Evolución de la temperatura en el interior del depósito del vehículo durante la recarga sin enfriador para las configuraciones 2 y 3. ....	54
Figura 26. Evolución de la temperatura en el interior del depósito del vehículo durante la recarga con enfriador para las configuraciones 2 y 3. ....	55
Figura 27. Evolución de la temperatura en el interior del depósito del vehículo durante la recarga sin enfriador para la configuración 4.....	59

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de selección de gradiente de presión durante la recarga según SAE J2601. [9] ....	7
Tabla 2. Características del electrolizador de la hidrogenera actual. ....	16
Tabla 3. Características del tanque de almacenamiento inicial de la hidrogenera actual. ....	16
Tabla 4. Características del compresor de la hidrogenera actual. ....	16
Tabla 5. Características de las botellas del almacenamiento de la hidrogenera actual. ....	17
Tabla 6. Características del dispensador de la hidrogenera actual. ....	17
Tabla 7. Resumen configuraciones propuestas. ....	24
Tabla 8. Relación de equipos a adquirir y valoración económica. Configuración 2. ....	29
Tabla 9. Relación de equipos a adquirir y valoración económica. Configuración 3. ....	29
Tabla 10. Relación de equipos a adquirir y valoración económica. Configuración 4. ....	29
Tabla 11. Presupuesto configuraciones preseleccionadas. ....	29
Tabla 12. Ciclos de recarga Configuración 2. ....	32
Tabla 13. Ciclos de recarga Configuración 3. ....	35
Tabla 14. Ciclos de recarga Configuración 4. ....	38
Tabla 15. Resultados análisis complementario. ....	39
Tabla 16. Características Configuración 2. ....	41

## LISTADO DE SIGLAS

**BEV:** Battery Electric Vehicle (Vehículo Eléctrico de Batería)

**COP25:** Conference of Parties

**EERR:** Energías Renovables

**FCEV:** Fuel Cell Electric Vehicle (Vehículo de Pila de Combustible)

**FHA:** Fundación para el Desarrollo de Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón

**GEI:** Gases de efecto invernadero

**HRS:** Hydrogen Refueling Station-Hidrogenera

**H2:** Hidrógeno

**IEA:** International Energy Agency

**IPCC:** Panel Intergubernamental del Cambio Climático

**PHEV:** Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Vehículo Híbrido Eléctrico Enchufable)

**SAE:** Society of Automotive Engineering

**UE:** Unión Europea

## 1. INTRODUCCIÓN

El sistema energético actual se caracteriza por su elevada dependencia de los combustibles fósiles. En 2019 el 84,7% de la energía primaria consumida a nivel mundial fue de origen fósil [1]. En el escenario actual de cambio climático y con un aumento anual de las emisiones de gases de efecto invernadero, GEI, [2] es acuciante reducir las emisiones de GEI para limitar los efectos del cambio climático. Según apunta el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) en su Informe Especial sobre Cambio Climático y Tierra de 2019, la evolución del calentamiento global se ha producido a un ritmo más rápido de lo previsto [3].

Reflejo de esta realidad son los múltiples acuerdos internacionales adoptados por la mayoría de los países con el objetivo de limitar las emisiones en el futuro. A nivel mundial, en la COP25, celebrada en noviembre de 2019, se propuso limitar el incremento de la temperatura global por debajo de 1,5°C, lo que supone una neutralidad de emisiones de carbono en 2050 [4]. Desde la UE los objetivos fijados para 2030 han sido reducir más de un 40% los GEI con respecto a 1990, alcanzar una cuota mínima del 32% de EERR en el consumo final de energía y mejorar en al menos un 32,5% la eficiencia energética [5].

El consumo energético actual se compone principalmente de tres sectores; transporte, industrial y residencial y comercial. En 2015, cada uno de ellos representó el 41,6 %, 23,5 % y 31 % de la energía final consumida en España [6].

En base a la situación de cambio climático y según los acuerdos internacionales tomados en esta materia, la transición energética hacia la descarbonización es un hecho evidente. El sistema energético futuro se vislumbra que se caracterizará por la integración de las EERR con una mayor cuota de generación, su electrificación, la integración de nuevos actores como la figura del prosumidor o la generación distribuida y la digitalización.

De acuerdo con los planes actuales de reducción de GEI, uno de los principales ejes sobre los que actuar en materia de transición energética es el sector del transporte, al ser un sector altamente carbonizado. En 2018, solo el transporte por carretera representó el 25% de los GEI en España [7].

Actualmente, el principal reto del sector del transporte consiste en reducir su impacto ambiental manteniendo su competitividad, dado que es un elemento clave en la cadena de distribución entre otros. En este sentido, la búsqueda de sinergias para alcanzar los objetivos del sector es positiva. Por una parte, el sector del transporte debe sustituir paulatinamente el uso de combustibles fósiles por otras fuentes de energía de origen renovable, siendo deseable mantener y/o mejorar las prestaciones de la tecnología actual, principalmente autonomía y coste. Por otra parte, el aumento de las EERR en la generación eléctrica añade gran variabilidad al sistema eléctrico, lo que imposibilita la casación entre la generación y la demanda de la red eléctrica, que, añadido a la dificultad para almacenar la electricidad, supone una limitación en la transición del sistema eléctrico actual.

Ante esta situación, el empleo del hidrógeno como vector energético representa una solución factible, pues permite almacenar la energía eléctrica y transformarla posteriormente en electricidad y/o calor.

Respecto al sector del transporte, son múltiples los Estados que están adoptando medidas para la renovación de su parque móvil por vehículos de bajas o nulas emisiones, algunos de ellos incluso prohibiendo la venta de vehículos térmicos a partir de un plazo temporal [8]. Ante esta situación existen principalmente dos alternativas a los vehículos de motor de combustión; los vehículos eléctricos y los vehículos de pila de combustible. En cualquier caso, la sostenibilidad queda condicionada a que la fuente energética origen de ambos vectores energéticos (electricidad e hidrógeno) sea renovable.

Si bien, los vehículos eléctricos se caracterizan por ser más eficientes al reducir elementos mecánicos y aumentar considerablemente el rendimiento del motor eléctrico frente al térmico. Los FCEV presentan mayor autonomía y un tiempo de recarga similar al de un vehículo térmico convencional. Esta diferencia permite reducir los tiempos de recarga de la batería por un repostaje de hidrógeno de unos 5 minutos de duración y ofrecer autonomías similares a las de un vehículo convencional. Aunque su eficiencia es menor que la de un vehículo eléctrico, la tecnología de pila de combustible es más apropiada en vehículos pesados donde un vehículo eléctrico requeriría una alta capacidad de carga (batería), implicando gran volumen y peso de esta.

A pesar de que la tecnología de la pila de combustible aplicada a vehículos está ampliamente desarrollada a nivel técnico, su principal impedimento es la falta de una amplia red de hidrogeneras que permitan repostar con un nivel de servicio similar al de la actual red de gasolineras. Esto implica que el consumidor no apueste por esta tecnología y que a su vez los costes de los vehículos no se reduzcan al ser mínima su cuota de mercado y con ello su volumen de producción.

## 2. OBJETIVOS

En la actualidad la Fundación para el Desarrollo de Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón (FHA) dispone de una hidrogenera con capacidad de recarga máxima de 350 bar. Dicha capacidad de recarga representaba el estándar de presión en el momento de su instalación en 2009. Con el transcurso de los años la tecnología ha evolucionado bajo el objetivo principal de aumentar la autonomía de los vehículos de pila de combustible. Resultado de esta evolución ha sido el establecimiento de un nuevo estándar de presión, capacidad de recarga a 700 bar, siendo dicho estándar el actual en los vehículos comerciales del mercado. Ante esta evolución tecnológica, desde la FHA surge la necesidad de actualizar la capacidad de recarga de la hidrogenera actual al nuevo estándar.

El objetivo de este Trabajo Fin de Máster será realizar un análisis tecno-económico sobre la ampliación de la capacidad de recarga de la hidrogenera de FHA. Dicho análisis se realizará en los siguientes puntos:

- Estado de la técnica de las estaciones de recarga de hidrógeno
- Descripción de la instalación actual
- Propuesta de configuraciones para la ampliación a 700 bar de la hidrogenera actual
- Análisis comparativo de las configuraciones propuestas
- Análisis económico de las configuraciones preseleccionadas
- Análisis complementario centrado en la versatilidad de las configuraciones preseleccionadas. El objetivo será valorar el número máximo de recargas y la distribución en el tiempo de estas.
- Descripción detallada de la configuración seleccionada para la ampliación de la instalación actual.

En cuanto a las configuraciones propuestas para la ampliación de la hidrogenera actual, todas ellas deberán cumplir las siguientes especificaciones establecidas por la FHA:

- Capacidad de recarga a 200, 350 y 700bar.
- Capacidad de recarga mínima de un vehículo comercial una vez al día, aproximadamente 6kg de H<sub>2</sub> por recarga y día
- Considerar los equipos de la instalación actual e integrarlos en la medida de lo posible en las nuevas configuraciones propuestas, con el objetivo de reutilizar los equipos actuales y reducir el coste de la ampliación de la instalación.
- Valorar la versatilidad de las configuraciones propuestas en previsión de futuras ampliaciones. Se ha de considerar la adaptabilidad de los equipos contemplados en las configuraciones propuestas ante futuras actualizaciones.

## 3. NORMATIVA

Adicionalmente a los requisitos establecidos por FHA, las configuraciones propuestas deberán cumplir la normativa referente a instalaciones de recarga de vehículos de hidrógeno. A continuación, se hace referencia a las principales normativas de referencia consultadas, distinguiendo dos categorías; normativa general y normativa específica de estaciones de recarga de hidrógeno.

### 3.1. Normativa general:

- **Ley 31/1995** de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- **RD 400/1996**, de 1 de marzo, por el que se dicta las disposiciones de aplicación de la Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo 94//9/CE, relativo a los aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas.
- **RD 1215/1997**, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo.
- **RD 614/2001**, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico.
- **RD 842/2002**, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.
- **RD 681/2003**, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.
- **RD 314/2006**, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.
- **RD 1644/2008**, de 10 de octubre, por el que se establecen las normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas.
- **RD 186/2016**, de 6 de mayo, por el que se regula la compatibilidad electromagnética de los equipos eléctricos y electrónicos.
- **RD 513/2017**, de 22 de mayo, por el que se aprueban el Reglamento de instalaciones de protección contra incendios.

### 3.2. Normativa específica de estaciones de recarga de hidrógeno

En cuanto a la normativa consultada en materia de hidrogeneras o en aspectos referidos a la tecnología del hidrógeno, se han consultado las siguientes normas:

- **RD 639/2016**, de 9 de diciembre, por el que se establece un marco de medidas para la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos. Anexo II: 2. Especificaciones técnicas de los puntos de repostaje de hidrógeno para vehículos de motor.
- **SAE J2601** Fuelling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles
- **SAE J2719** Hydrogen Fuel Quality for Fuel Cell Vehicles
- **UNE-EN 181001:2010** Tecnologías del hidrógeno. Terminología.
- **ISO/FDIS 19880-1** Gaseous hydrogen-Fuelling stations
- **UNE-EN 17268:2020** Dispositivos de conexión para el reabastecimiento de hidrógeno gaseoso a los vehículos terrestres
- **UNE-EN 17127:2018** Puntos de recarga de hidrógeno al aire libre que dispensan hidrógeno gaseoso e incorporan protocolos de llenado En el apartado 5.3.2 de la norma, dedicado al protocolo de repostaje (Fuelling protocol process), se definen las especificaciones a cumplir durante el repostaje.
- **UNE-EN 17124:2018** Hidrógeno como combustible. Especificación de producto y aseguramiento de la calidad. Aplicaciones que utilizan las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM) para vehículos de carretera.
- **UNE-EN ISO 11114-4:2017** Botellas para el transporte de gas. Compatibilidad de los materiales de la válvula y de la botella con el gas contenido. Parte 4: Métodos de ensayo para la selección de materiales metálicos resistentes a la fragilización por hidrógeno
- **UNE-EN ISO 4126:2004** Dispositivos de seguridad para la protección contra la presión excesiva. Parte 1: Válvulas de seguridad. Parte 2: Dispositivo de seguridad con disco de ruptura.
- **UNE-EN ISO 7751:2017** Mangueras a base de elastómeros y plásticos y sus conjuntos con accesorios de unión. Relaciones de las presiones de prueba y de reventamiento con la presión máxima de servicio.
- **UNE-EN 60079-0:2013** Atmósferas explosivas. Parte 0: Equipo. Requisitos generales.
- **UNE-EN 60079-10-1:2016** Atmósferas explosivas. Parte 10-1: Clasificación de emplazamientos. Atmósferas explosivas gaseosas.
- **UNE-EN 60079-14:2016** Atmósferas explosivas. Parte 14: Diseño, elección y realización de las instalaciones eléctricas.
- **UNE-EN 60079-29-1:2017** Atmósferas explosivas. Parte 29-1: Detectores de gas. Requisitos de funcionamiento para los detectores de gases inflamables.
- **UNE-EN 61508:2011** Seguridad funcional de los sistemas eléctricos/electrónicos/electrónicos programables relacionados con la seguridad.
- **UNE-EN 66305:2011** Protección contra el rayo.

De entre las normas citadas en este apartado cabe destacar la norma SAE J2601. Esta norma describe el protocolo de abastecimiento de combustible para vehículos de hidrógeno gaseoso ligeros. Representa el estándar sobre el que se basan los vehículos comerciales actualmente. Las principales especificaciones del protocolo de abastecimiento son:

- Temperatura ambiente entre  $-40^{\circ}\text{C}$  y  $50^{\circ}\text{C}$
- Presión menor que la presión máxima de operación ( $\text{MOP}=1,25*700 = 875\text{bar}$ )
- Temperatura del hidrógeno  $> -40^{\circ}\text{C}$
- Caudal de hidrógeno  $< 60\text{g/s}$  (para vehículos ligeros), excluyendo momento de comienzo del repostaje.
- Cuando se emplean comunicaciones, la temperatura del tanque del vehículo debe ser inferior a  $85^{\circ}\text{C}$
- Un máximo de 10 pausas durante el repostaje donde el caudal de hidrógeno sea menor a  $0,6\text{g/s}$
- 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 (200-350-700bar).
- El dispensador no deberá transferir hidrógeno al vehículo si el estado de carga del tanque del vehículo es superior al 100%.

La Figura 1 define las condiciones límite de operación establecidas por el protocolo de recarga de vehículos de hidrógeno según la norma SAE J2601.

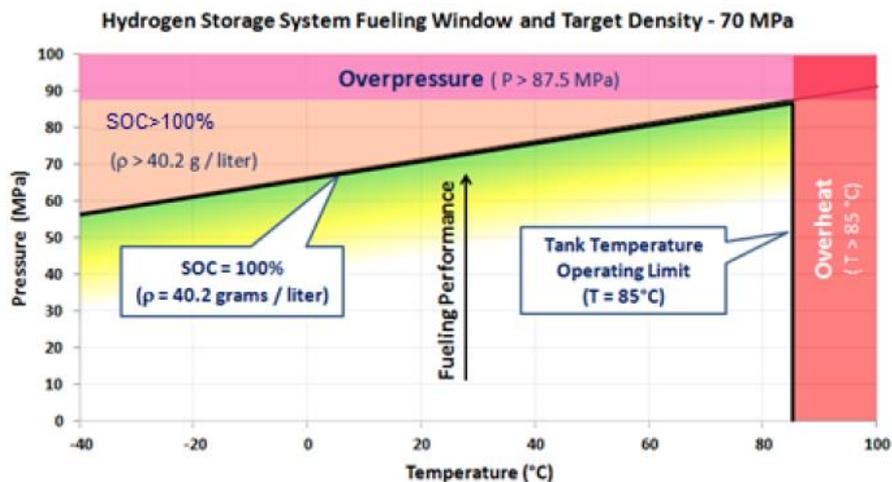


Figura 1. Condiciones límite de operación fijadas por la norma SAE J2601. [9]

En la tabla 1, se define el incremento de presión que se debe producir en el interior del depósito del vehículo durante la recarga. Dicho incremento depende de la temperatura ambiente en el momento de la recarga y de la presión inicial en el interior del depósito al iniciar de la recarga. Así, el tiempo de la recarga quedará definido por el incremento de presión establecido para la misma. En el caso que se muestra a continuación, para una temperatura ambiente de  $20^{\circ}\text{C}$  y una presión inicial del depósito de  $10\text{MPa}$ , la norma SAE J2601 establece un incremento de presión en el depósito de  $21,8\text{MPa}$  por minuto, alcanzándose una presión final de  $86,8\text{MPa}$  y siendo el tiempo estimado de la recarga de 4 minutos.

H70-T40 4-7kg comm		Average Pressure Ramp Rate, APRR [MPa/min]	Target Pressure P <sub>target</sub> [MPa]	Target Pressure Top-Off [MPa]	Top-Off- APRR [MPa/min]	Target Pressure, P <sub>target</sub> [MPa]							
						Initial Tank Pressure, P <sub>0</sub> [MPa]							
						0,5 - 5 (no interpolation allowed)				0,5	2	5	10
Ambient Temperature, T <sub>amb</sub> [°C]	> 50	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
	50	5,1	78,2	87,5	2,6	see Top-Off	see Top-Off	80,8	85,7	86,8	86,5	85,8	85,8
	45	8,1	76,3	87,5	4,0	see Top-Off	see Top-Off	81,1	86,9	86,6	86,2	85,3	84,7
	40	11,5	73,2	87,5	5,4	see Top-Off	see Top-Off	81,1	86,9	86,4	85,9	84,7	83,8
	35	12,4	72,9	87,5	5,6	see Top-Off	see Top-Off	81,2	86,9	86,4	85,9	84,7	83,8
	30	15,3	70,6	87,5	6,6	see Top-Off	see Top-Off	81,0	86,8	86,3	85,6	84,3	82,6
	25	18,5	69,0	87,4	7,2	see Top-Off	see Top-Off	81,0	86,8	86,1	85,4	83,8	82,6
	20	21,8	67,9	87,4	7,6	see Top-Off	see Top-Off	81,2	86,8	85,9	85,1	83,3	81,8
	15	25,0	66,3	87,4	9,0	see Top-Off	see Top-Off	81,2	86,8	85,7	84,7	82,6	80,6
	0	23,5	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	78,4	84,6	86,8	85,6	84,4	83,1	80,6	78,4
	-10	23,5	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	82,2	87,1	86,4	85,2	84,0	82,8	80,4	77,7
	-20	23,5	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	86,0	86,8	86,1	84,9	83,7	82,4	80,0	77,7
	-30	23,5	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	86,8	86,5	85,7	84,5	83,3	82,1	79,6	77,7
-40	23,5	no Top-Off	no Top-Off	no Top-Off	86,5	86,2	85,4	84,2	83,0	81,8	79,3	77,7	
< -40	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	

4 Minute Fueling

Tabla 1. Tabla de selección de gradiente de presión durante la recarga según SAE J2601. [9]

**Nota:** Durante la realización del presente Trabajo Fin de Máster la siguiente normativa consultada ha sido derogada:

- **UNE-EN ISO 17268:2017** Dispositivos de conexión para el reabastecimiento de hidrógeno gaseoso a los vehículos terrestres (ISO 17268:2012). Derogada 01/04/2020

Siendo sustituida por:

- **UNE-EN ISO 17268:2020 (RATIFICADA)** Dispositivos de conexión para el reabastecimiento de hidrógeno gaseoso a los vehículos terrestres (ISO 17268:2020) (Ratificada por la Asociación Española de normalización en abril de 2020). Vigente 01/04/2020

## 4. CONTEXTO GENERAL

En el panorama actual del sector energético, caracterizado por la descarbonización y la transición energética, existe un creciente interés por la tecnología del hidrógeno. Sus principales virtudes son la capacidad del hidrógeno como vector energético, que permite almacenar la energía eléctrica generada a partir de otras fuentes de EERR, y su idoneidad para sustituir a los combustibles fósiles en el sector del transporte, permitiendo autonomías similares y una buena adaptabilidad a diversos tipos de transporte (terrestre, marítimo y aéreo) y a distintas tipologías de vehículos (ligeros, pesados, transporte público, ...). Un ejemplo del interés que suscita esta tecnología es la reciente apuesta de la Unión Europea impulsando el uso del hidrógeno renovable con el objetivo de avanzar hacia un escenario de emisiones cero para 2050. Resultado de ello es la estrategia definida por la UE estructurada en tres fases; 2020 a 2024, 2024 a 2030 y 2030 a 2050 para implantar la tecnología del hidrógeno en el sector energético [10]. Actualmente la principal limitación para la implantación de la tecnología del hidrógeno renovable ha sido la falta de producción y como consecuencia de ello elevados costes al no democratizarse su producción. En la figura 2 se muestra la producción de hidrógeno bajo en carbono para el periodo 2013-2019 y la previsión futura de producción. [11]

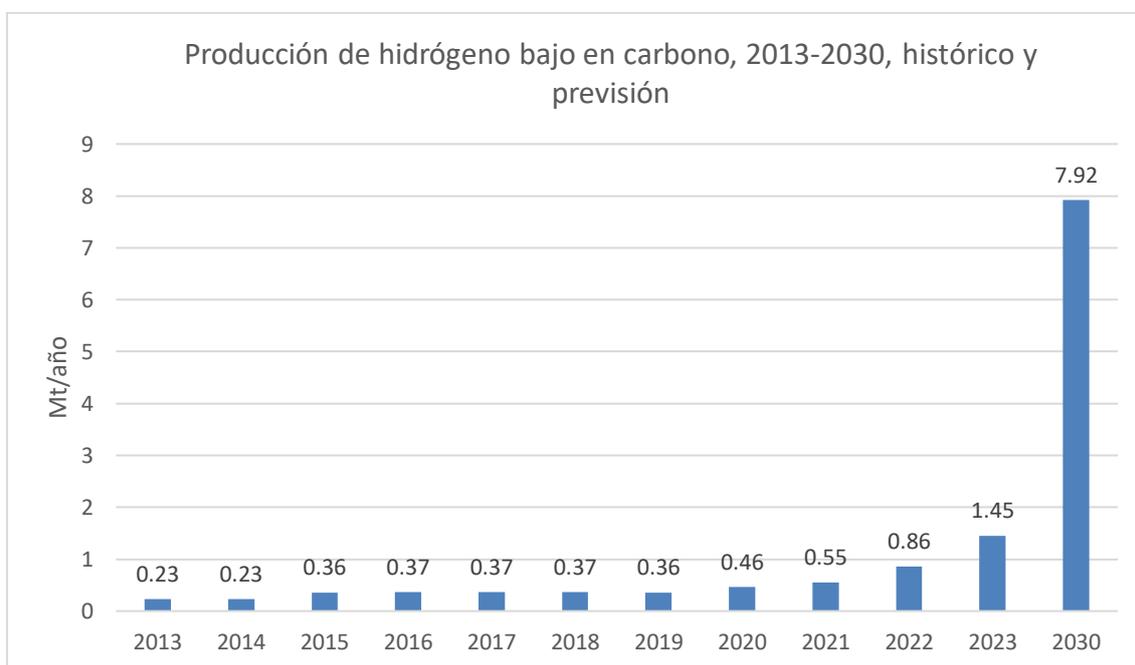


Figura 2. Producción de hidrógeno bajo en carbono, 2013-2030, histórico y previsión.[11]

A nivel mundial en 2019 había 470 HRS en servicio, siendo el aumento de HRS de más de un 20% respecto al año anterior. Los países que cuentan con un mayor número de estaciones de recarga son Japón con 113 HRS en servicio, Alemania con 81 y Estados Unidos con 64. Destaca la tendencia de China al triplicar el número de HRS instaladas en 2019 (de 20 a 61). Por continentes Asia y Europa disponen individualmente de aproximadamente el 40% de las hidrogeneras instaladas a nivel mundial. A pesar de estas cifras el número actual de instalaciones es testimonial frente a la red de gasolineras o de puntos de recarga de vehículos eléctricos. En lo que respecta a España dispone de 3 hidrogeneras con capacidad de recarga a 350 bar [12]. La Figura 3 representa la distribución de los FCEV y de las hidrogeneras en 2.019 [11].

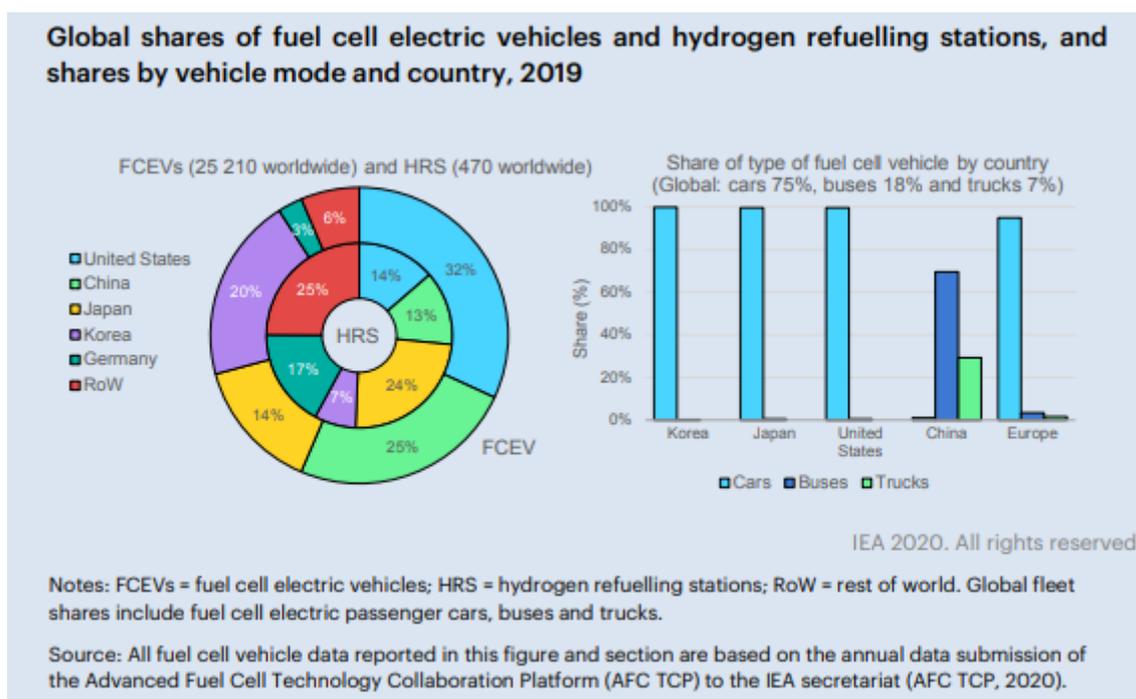


Figura 3. Distribución de FCEV, HRS y tipo de vehículo por países en 2019.[11]

Actualmente, la instalación de HRS no es una inversión rentable al ser una tecnología poco extendida. En un futuro próximo se espera alcanzar costes más competitivos debido al aumento de la producción y al aumento del factor de utilización de estas instalaciones, ello permitirá mejorar la rentabilidad de estas instalaciones. Paralelamente la previsible reducción de costes del FCEV favorecerá la apuesta por esta tecnología por parte del consumidor. En la etapa actual de desarrollo comercial es crucial la ubicación y el dimensionamiento de las HRS. Ello traslada una imagen de seguridad al consumidor, fomentando la apuesta por esta tecnología.

Las ventas de FCEV solo han comenzado a superar los millares en los últimos años. El impulso de las políticas se está acelerando y los volúmenes de ventas en 2019 han sido notables. Sin embargo, la cantidad de FCEV actualmente en uso es significativamente menor que los niveles de BEV o PHEV; por cada automóvil eléctrico de pila de combustible en la carretera en 2019, había alrededor de 120 PHEV y casi 250 BEV. Esto refleja diversos factores como la posterior

introducción de los FCEV al mercado, menos modelos de vehículos en el mercado comercial y mayores requisitos de inversión por estación de servicio.

En cuanto a los FCEV en 2019 se vendieron 12.350, frente a 5.800 en 2.018, alcanzándose un parque móvil de FCEV a nivel mundial de 25.210 unidades. La mayor parte de los vehículos vendidos fueron automóviles de transporte de pasajeros (turismos). Dentro de este segmento destacan tres modelos comerciales que dominan el mercado; Toyota Mirai, Hyundai Nexo y Honda Clarity Fuel Cell. Exceptuando la situación en China donde el parque móvil de FCEV se compone principalmente de autobuses y camiones.[11]

#### 4.1. Descripción general de una hidrogenera

Una hidrogenera o instalación de recarga de vehículos de hidrógeno, HRS, es una estación de servicio que permite el abastecimiento de los vehículos de pila de combustible, también denominados FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle). El funcionamiento de una hidrogenera es análogo al de una estación de servicio convencional de gasolina o diésel. La hidrogenera dispone de un almacenamiento desde el que se suministra el hidrógeno a los vehículos. El hidrógeno dispensado puede ser producido in situ o suministrado desde una instalación productora de hidrógeno, ya sea por gaseoducto (denominado hidroducto) o por transporte por carretera, bien con botellas de gas a presión o en forma líquida. El elemento que permite la conexión entre el hidrógeno almacenado y el vehículo es el dispensador, similar al de una estación convencional, aunque considerando medidas de seguridad particulares debido a la elevada volatilidad del hidrógeno. La Figura 4 muestra las principales áreas de una hidrogenera.



Figura 4. Esquema tipo de una instalación de recarga de hidrógeno. [13]

## 4.2. Principales equipos de una hidrogenera

A continuación, se describen los principales equipos de una instalación hidrogenera y su modo de operación más general.

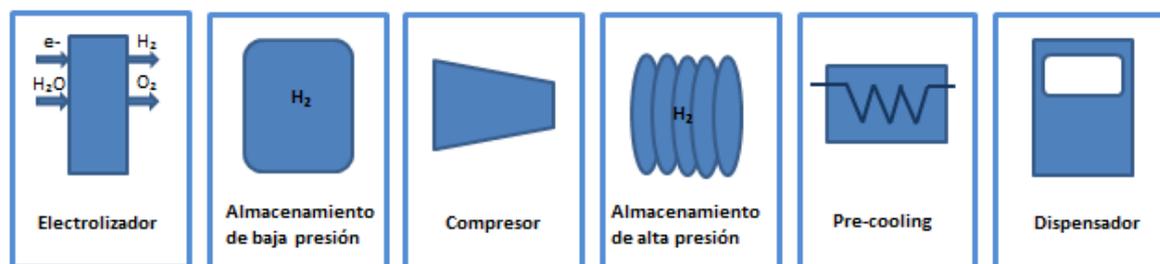


Figura 5. Diagrama principales equipos de una hidrogenera con generación in-situ de hidrógeno. Fuente: Elaboración propia

**Suministro de hidrógeno:** el abastecimiento de la hidrogenera puede ser propio o externo. Si es propio, el hidrógeno es producido en la hidrogenera con un electrolizador, o mediante el reformado del gas natural. Mientras que, si es externo, la hidrogenera se abastece a través de botellas de hidrógeno provenientes de una instalación generadora, pudiendo ser suministrado como gas comprimido o líquido.

**Almacenamiento de baja presión:** en el caso del hidrógeno producido por un electrolizador, este se almacena en tanques a la presión de salida del electrolizador para su posterior compresión. En cuanto al hidrógeno suministrado en botellas, es extraído por el compresor para su almacenamiento a la presión de recarga del vehículo. En caso del hidrógeno suministrado en estado líquido este se transfiere a tanques de almacenamiento propios de la hidrogenera.

**Compresor:** es el equipo encargado de elevar la presión del hidrogeno desde la presión inicial del almacenamiento de baja presión hasta la presión deseada del almacenamiento de alta presión (superior a presión de recarga nominal de 700 bar, generalmente 900 bar). La estación de recarga puede contar con varios compresores para suministrar hidrógeno a varios niveles de presión.

**Almacenamiento de alta presión:** se compone de bombonas que permiten almacenar el hidrógeno proveniente del compresor a presión suficiente para que se produzca posteriormente la recarga del vehículo por transferencia de presión, normalmente 900 bar.

**Pre-cooling:** es el equipo encargado de enfriar el hidrógeno transferido al vehículo antes de su paso por el dispensador. Este equipo es necesario para limitar la temperatura alcanzada dentro del depósito del vehículo durante la recarga de este. Según la norma SAE J2601 la temperatura máxima alcanzada durante la recarga debe ser inferior a 85°C.

**Dispensador:** es el equipo encargado de controlar la transferencia de hidrógeno desde el almacenamiento de alta presión hasta el depósito del vehículo. Incluye unidad de control de la recarga y manguera para el repostaje.

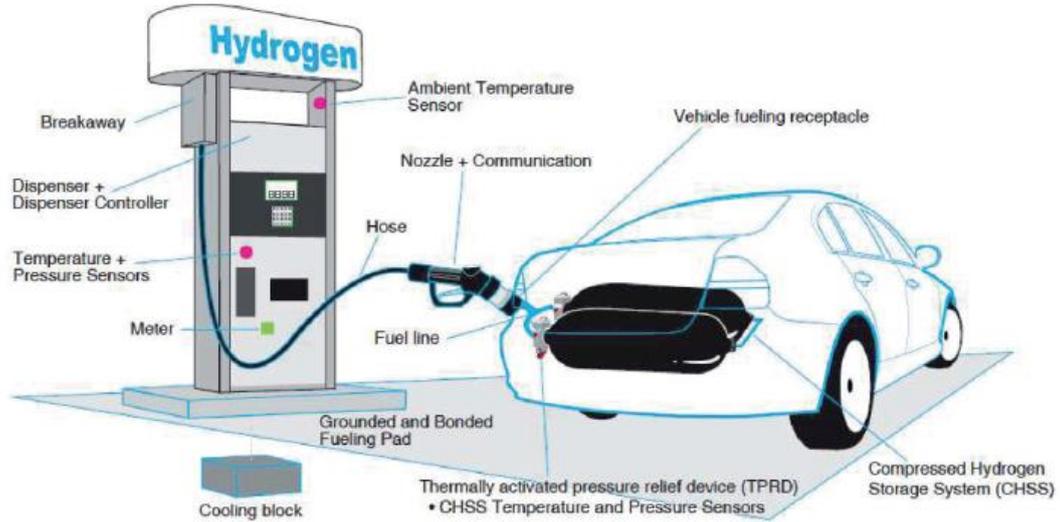


Figura 6. Principales componentes del sistema de dispensado de una hidrogenera. [13]

## 5. DESCRIPCIÓN DE LA HIDROGENERA ACTUAL-MODO DE OPERACIÓN

La Fundación Hidrógeno Aragón dispone de una estación de recarga de vehículos de hidrógeno o hidrogenera en sus instalaciones situadas en el polígono tecnológico de WALQA (Huesca). La hidrogenera se encuentra operativa desde 2009. En cuanto a la tipología de la hidrogenera, se trata de una estación de recarga con capacidad de 200 - 350 bar, correspondiente con el estándar de capacidad en el momento de su puesta en marcha, 200 bar para recarga de autobuses y 350 bar para recarga de vehículos ligeros. Respecto al modo de operación, implementa el modo más estandarizado, recarga en cascada. Además de las instalaciones propias de la hidrogenera, la FHA integra en sus instalaciones la producción del hidrógeno empleado por la hidrogenera y a su vez la generación eléctrica necesaria para la producción del hidrógeno. La generación eléctrica integrada en la instalación es de origen renovable, estando compuesta por 62 kWp de potencia fotovoltaica (proyecto ELY4OFF). De esta forma el hidrógeno producido es de origen renovable, también denominado “hidrógeno verde”.



Figura 7. Vista aérea de las instalaciones de FHA.

A continuación, se describe el modo de operación de la estación de recarga de FHA, el cual corresponde con el modo de operación más general de una hidrogenera.

La hidrogenera de la FHA se caracteriza por disponer de capacidad de recarga para vehículos de 200 - 350 bar y realizar una recarga en cascada. En este tipo de recarga, el hidrógeno es transferido al vehículo debido al gradiente de presión positivo existente entre el almacenamiento de H<sub>2</sub> a 350bar de la hidrogenera y el depósito del vehículo.

La Figura 8 representa el perfil de recarga definido en una recarga en cascada a 350 bar en la instalación actual. En ella, se puede observar como la recarga se realiza en tres etapas, correspondientes cada una de ellas con la transferencia de hidrógeno desde un rack de botellas de 350 bar hacia el depósito del vehículo. Dado que el mecanismo de recarga se basa en el gradiente de presión entre el rack de botellas correspondiente y el depósito del vehículo, tras cada etapa, el depósito se encuentra a una presión mayor y la transferencia es más limitada en etapas sucesivas.

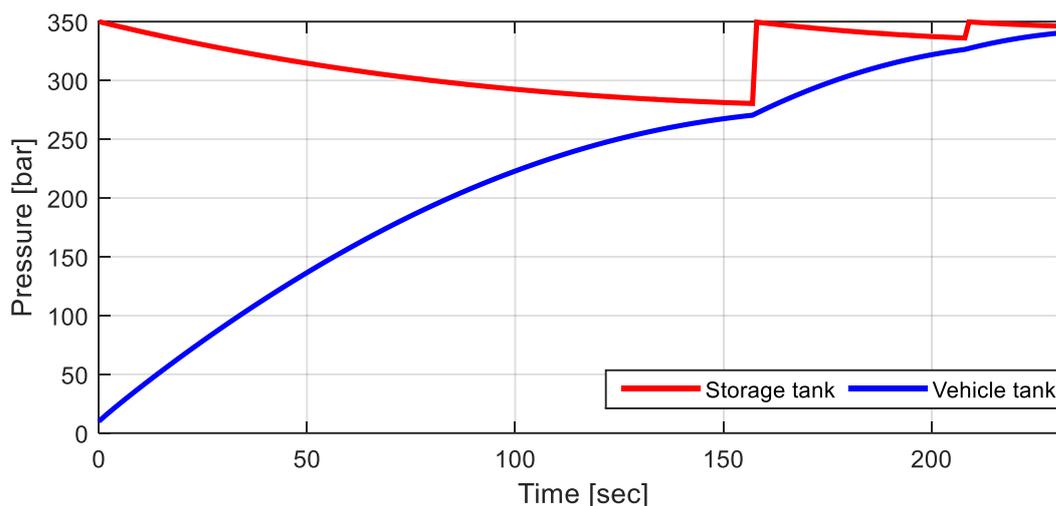


Figura 8. Evolución de la presión en el almacenamiento (350 bar) y en el depósito del vehículo durante la recarga. Fuente: FHA.

La Figura 9 representa la evolución de la temperatura en el almacenamiento a 350 bar como en el interior del depósito del vehículo durante la recarga de este. Como se puede observar, durante la transferencia del hidrógeno, la temperatura en el interior del depósito se eleva, principalmente al inicio de la recarga donde el gradiente de presión entre el hidrógeno transferido y el depósito es mayor lo que provoca un rápido calentamiento de este. Conforme la recarga avanza en el tiempo, la presión en el interior del depósito aumenta y el gradiente de presión con el almacenamiento disminuye, por lo que se reduce el calentamiento del hidrógeno del depósito. En cuanto a la temperatura del almacenamiento, constituido por 3 racks de 6 botellas, durante la transferencia de hidrógeno de cada uno de ellos su temperatura se reduce debido a la bajada de presión que se produce en el interior. Puesto que durante la recarga el caudal transferido es decreciente, al igual que el gradiente de presión entre el almacenamiento y el depósito del vehículo, la mayor reducción de temperatura en el almacenamiento se producirá en el primer rack, siendo menor el enfriamiento de los racks de botellas en las etapas sucesivas.

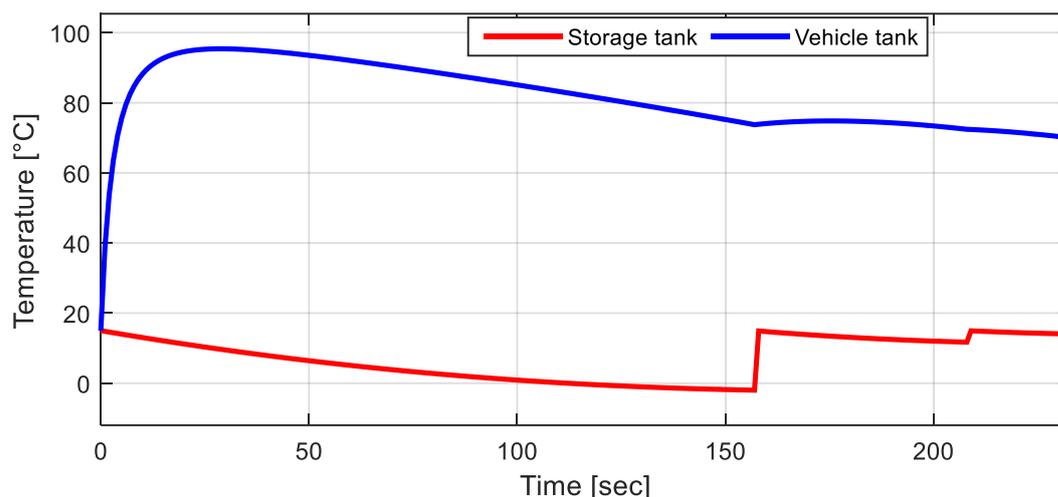


Figura 9. Evolución de la temperatura en el almacenamiento (350 bar) y en el depósito del vehículo durante la recarga. Fuente: FHA.

Tanto la Figura 8 como la Figura 9 corresponden a simulaciones realizadas por la FHA.

A continuación, se describen las diferentes etapas realizadas en la hidrogenera:

1. El H<sub>2</sub>, generado por el electrolizador a una presión de 20 bar, es almacenado en el tanque de almacenamiento inicial a esa misma presión. Dicho tanque dispone de una capacidad de 4m<sup>3</sup>, equivalente a 6,74 kg de H<sub>2</sub>.
2. El compresor eleva la presión del H<sub>2</sub> procedente del almacenamiento inicial y lo transfiere al almacenamiento de media presión con capacidad de 350 bar.
3. Dicho almacenamiento se compone de 3 racks de 6 botellas cada uno de ellos. Donde cada botella tiene una capacidad de 50l, que a 350 bar equivale a 1,18 kg de hidrógeno.
4. En el momento en que se realiza la recarga del vehículo, el dispensador permite la transferencia del H<sub>2</sub> almacenado en los racks de botellas al depósito del vehículo. Este tipo de recarga presenta un tiempo de recarga del vehículo de aproximadamente 5 min.

La recarga realizada, denominada recarga en cascada, adquiere esta denominación ya que la recarga del vehículo se realiza por las sucesivas transferencias de H<sub>2</sub> entre las diferentes botellas de almacenamiento y el depósito del vehículo. En cada transferencia la botella seleccionada reduce su presión en favor del depósito del vehículo que aumenta su presión debido a la masa de H<sub>2</sub> transferida. El dispensador se encarga de controlar las condiciones de operación durante la recarga, principalmente la presión y el caudal del hidrógeno transferido al depósito del vehículo. En caso de anomalía actúa deteniendo la recarga.

En la Figura 10, se ha representado mediante un diagrama de bloques el proceso de operación de la hidrogenera actual.

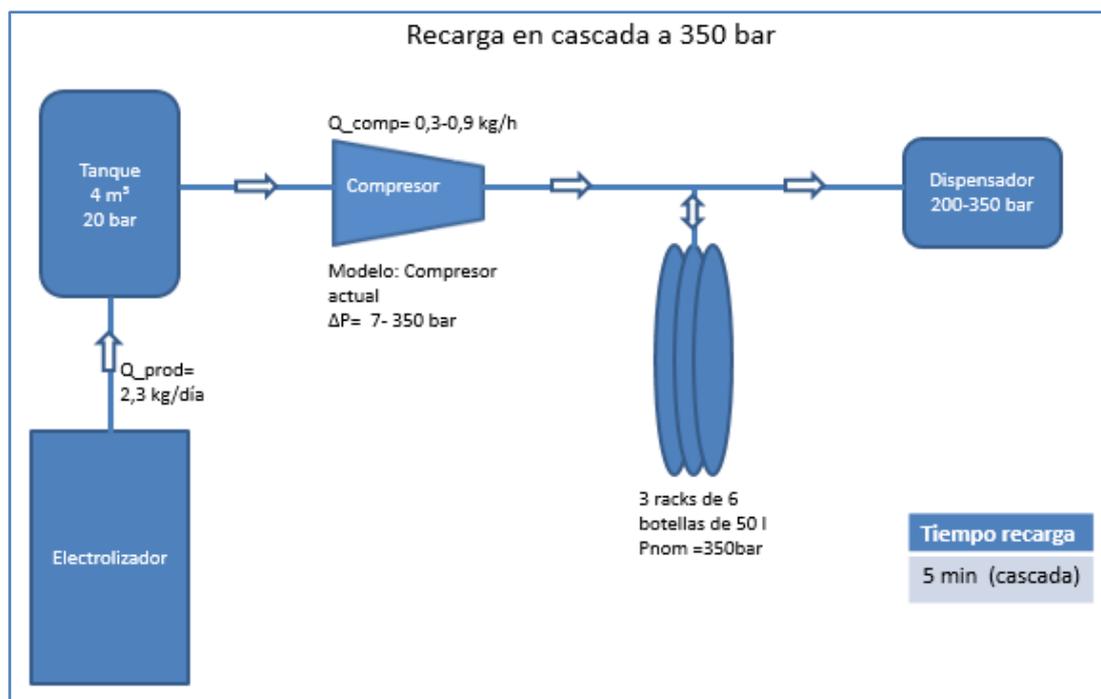


Figura 10. Esquema hidrogenera FHA. Fuente: Elaboración propia

Tras describir el modo de operación de la hidrogenera, se va a detallar una relación de los principales equipos que la componen y de sus características técnicas.

Equipo	Fabricante	Potencia stack [kW]	Presión salida [bar]	Caudal [kg/día]
Electrolizador	ITM	50	20	2,3

Tabla 2. Características del electrolizador de la hidrogenera actual.

Equipo	Fabricante	Presión diseño [bar]	Capacidad [m3]
Tanque de almacenamiento inicial	LAPESA	35	4

Tabla 3. Características del tanque de almacenamiento inicial de la hidrogenera actual.

Equipo	Fabricante	Potencia [kW]	Relación de compresión	Presión máxima salida [bar]	Caudal [kg/h]
Compresor	HOFER	4,8	3,4/2 etapas	350	0,3-0.9

Tabla 4. Características del compresor de la hidrogenera actual.

Equipo	Fabricante	Presión nominal [bar]	Capacidad [m3]
Botellas de almacenamiento	WYSTRACH	350	1 botella= 0.050 3 racks de 6 botellas cada uno= 0.9

Tabla 5. Características de las botellas del almacenamiento de la hidrogenera actual.

Equipo	Fabricante/ Modelo	Presión salida [bar]	Caudal máx.[kg/min]
Dispensador	FTI	200-350	20

Tabla 6. Características del dispensador de la hidrogenera actual.

Además de los equipos descritos en las tablas 2 a 6, la estación de recarga se compone de diversos elementos propios de la instalación como válvulas, tuberías y los sistemas de seguridad correspondientes.

## 6. CONFIGURACIONES PROPUESTAS

Tras realizar un análisis de la instalación actual, de las características de los equipos que la conforman y en base a los requisitos establecidos desde FHA para la actualización de la hidrogenera actual, se han propuesto diferentes configuraciones que se adaptan a los requisitos establecidos.

En esta primera fase, de confección de diferentes configuraciones para la ampliación de la capacidad de recarga de la hidrogenera de FHA, el objetivo ha sido desarrollar todas las alternativas posibles bajo el cumplimiento de los requisitos establecidos. En cuanto a los requisitos fijados por la FHA, en esta primera fase inicial de planteamiento de diferentes configuraciones, se han tenido en cuenta los siguientes requisitos:

- Capacidad de recarga a 200, 350 y 700 bar.
- Capacidad de recarga mínima de un vehículo comercial una vez al día, aproximadamente 6kg de H<sub>2</sub> por recarga y día

Posteriormente, en una segunda fase, se evaluará el potencial de cada alternativa propuesta y seleccionará la configuración óptima, teniendo en cuenta el resto de los requisitos establecidos:

- Considerar los equipos de la instalación actual e integrarlos en la medida de lo posible en las nuevas configuraciones propuestas, con el objetivo de reutilizar los equipos actuales y reducir el coste de la ampliación de la instalación.
- Valorar la versatilidad de las configuraciones propuestas en previsión de futuras ampliaciones. Se ha de considerar la adaptabilidad de los equipos contemplados en las configuraciones propuestas ante futuras actualizaciones.

Así, para cada una de las configuraciones propuestas se han calculado tanto los parámetros de operación como la selección de equipos necesarios. A continuación, se describe cada una de las configuraciones propuestas para la ampliación de la capacidad de recarga de la hidrogenera de FHA. Cada una de las configuraciones propuestas presenta condiciones de operación e instalación de los equipos diferentes, resultado del dimensionamiento realizado en cada una de ellas. Como factor común todas ellas cumplen el objetivo fijado, capacidad de recarga de 700 bar.

**Nota:** en los diagramas de bloques de las diferentes configuraciones propuestas, los equipos representados en color azul corresponden a los equipos instalados en la hidrogenera actual de FHA, mientras que los equipos representados en color naranja corresponden a equipos que habría que adquirir en caso de seleccionar la configuración correspondiente.

## 6.1. Configuración propuesta 1

La configuración propuesta 1 presenta el siguiente modo de operación:

Se caracteriza por realizar una compresión directa, es decir, no incluye almacenamiento. La compresión del hidrógeno se realiza en dos etapas. El compresor 1 se alimenta desde el tanque y expulsa el hidrógeno al buffer. En esta primera etapa la presión de salida del hidrógeno es de 100 bar y este es almacenado en el buffer de forma transitoria. El compresor 2 realiza la segunda etapa de compresión, en la que el hidrógeno proveniente del buffer a 100 bar se comprime hasta 800 bar. El dispensador transfiere el caudal de salida del compresor 2 hasta el tanque del vehículo. El tiempo de repostaje se obtiene como función del caudal de compresión, en este caso limitado por el compresor 2 al ser el que cuenta con un caudal de compresión menor. Para una capacidad de recarga de 6kg a 700 bar el tiempo de repostaje es de 37 min.

En esta configuración, cabe destacar que durante el repostaje el caudal de salida del tanque de almacenamiento es mucho mayor que el caudal de entrada proveniente del electrolizador. Esto supone una caída de presión en el tanque, inicialmente a 20 bar. Dado que el compresor 1 presenta una presión de entrada mínima de 13,3 bar, es necesario aumentar la capacidad del tanque, para que al extraer los 6kg de hidrógeno de un repostaje la presión en el tanque sea durante la recarga superior a la mínima requerida por el compresor 1. Para los compresores seleccionados, ambos con una relación de compresión de 8, la presión de salida del compresor 1 ha de ser de 100 bar y la presión de entrada debe ser superior a 13,3 bar. Esto implica que la capacidad del tanque debe ser de al menos 12,9 m<sup>3</sup> para que la presión en el mismo no sea inferior a la requerida por el compresor 1 durante el servicio de repostaje.

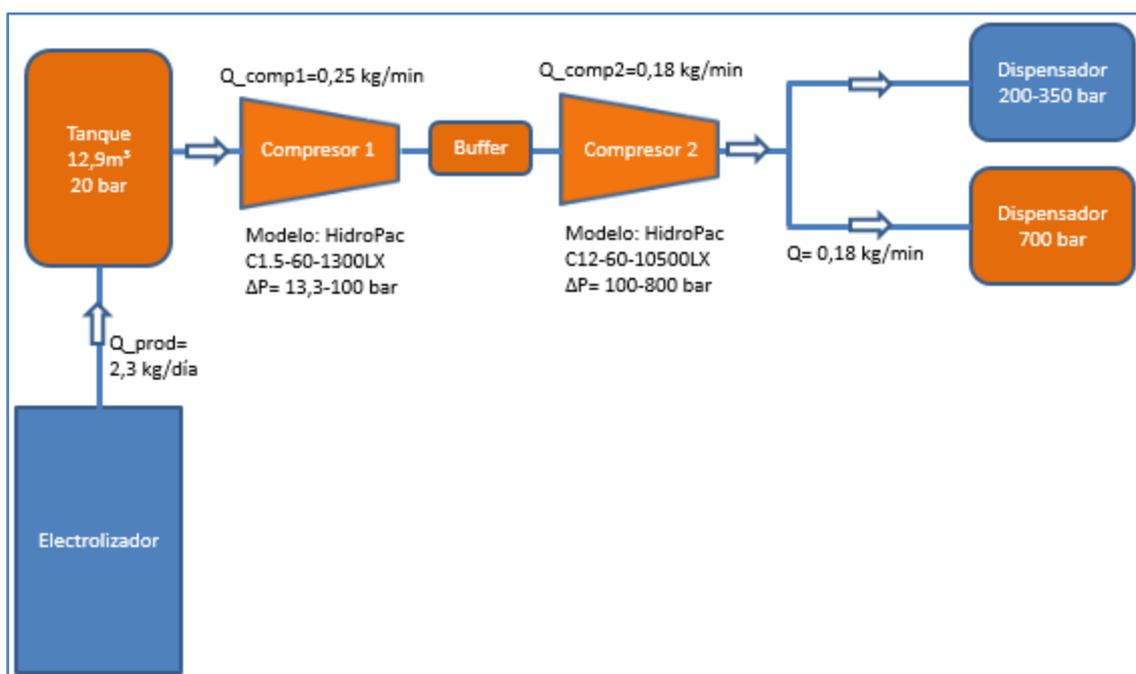


Figura 11. Diagrama modo de operación Configuración propuesta 1. Fuente: Elaboración propia

## 6.2. Configuración propuesta 2

La configuración propuesta 2 presenta el siguiente modo de operación:

Implementa una recarga de tipo recarga en cascada. La compresión del hidrógeno se realiza en dos etapas. El compresor 1 se alimenta desde el tanque y expulsa el hidrógeno al almacenamiento intermedio (racks de botellas existentes, presión nominal de 350 bar). En esta primera etapa la presión de salida del hidrógeno es de hasta 350 bar. El compresor 2 realiza la segunda etapa de compresión, en la que el hidrógeno proveniente del almacenamiento intermedio se comprime hasta 800 bar y se almacena en el almacenamiento final compuesto por 3 racks de 6 botellas cada uno, con presión nominal de 1000 bar. En el momento del repostaje a 700 bar el dispensador transfiere el hidrógeno contenido en el almacenamiento intermedio y en el almacenamiento final hasta el depósito del vehículo. Primero se transfiere el hidrógeno del almacenamiento intermedio al ser menor su presión y posteriormente el del almacenamiento final. Previo paso del hidrógeno por el dispensador se ha de considerar un enfriador que permite reducir la temperatura del hidrógeno transferido al depósito, el objetivo de este equipo es que la temperatura dentro del depósito no supere los 85°C establecidos por norma, durante la recarga. (Ver anexo 2)

Para una capacidad de recarga de 6kg a 700 bar el tiempo de repostaje es de aproximadamente 5 min. En el caso del repostaje a 350 bar, este se realizaría de la misma forma, pero existiendo la posibilidad de emplear el almacenamiento intermedio, el almacenamiento final o ambos.

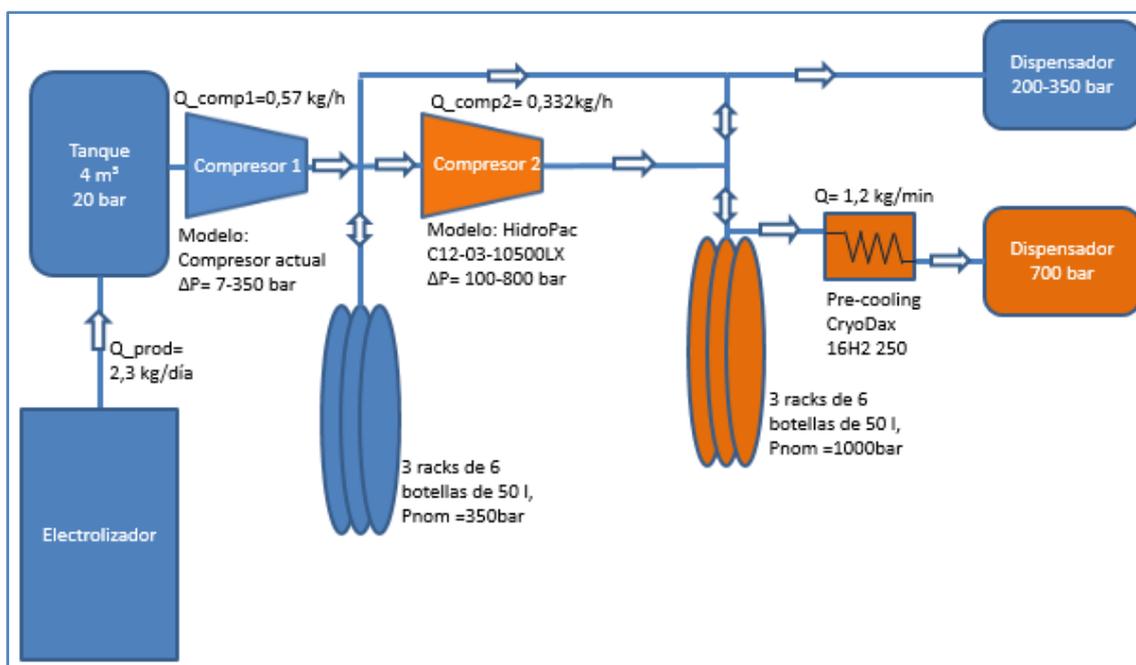


Figura 12. Diagrama modo de operación Configuración propuesta 2. Fuente: Elaboración propia

### 6.3. Configuración propuesta 3

La configuración propuesta 3 presenta el siguiente modo de operación:

Presenta una configuración mixta. La primera etapa considera almacenamiento intermedio a la salida del compresor 1 mientras que en la segunda etapa se realiza una compresión directa. El compresor 1 se alimenta desde el tanque existente y comprime el hidrógeno hasta el almacenamiento intermedio. En esta primera etapa la presión de salida del hidrógeno es de hasta 350 bar (racks de botellas existentes, presión nominal de 350 bar). Esta primera etapa indicada es la que actualmente existe en la HRS. El compresor 2 realiza la segunda etapa de compresión, en la que el hidrógeno proveniente del almacenamiento intermedio se comprime hasta 800 bar. El dispensador transfiere el caudal de salida del compresor 2 hasta el tanque del vehículo. Según los cálculos realizados, esta configuración requiere un equipo enfriador que reduzca la temperatura del hidrógeno antes de su paso por el dispensador, de lo contrario la temperatura del depósito superaría los 85°C permitidos por la normativa (ver anexo 2).

En esta configuración el tiempo de recarga se obtiene como función del caudal de compresión del compresor 2. Para una capacidad de recarga de 6kg a 700 bar el tiempo de recarga es de 17 min.

En el caso del repostaje a 350 bar, este se puede realizar en cascada desde el almacenamiento intermedio.

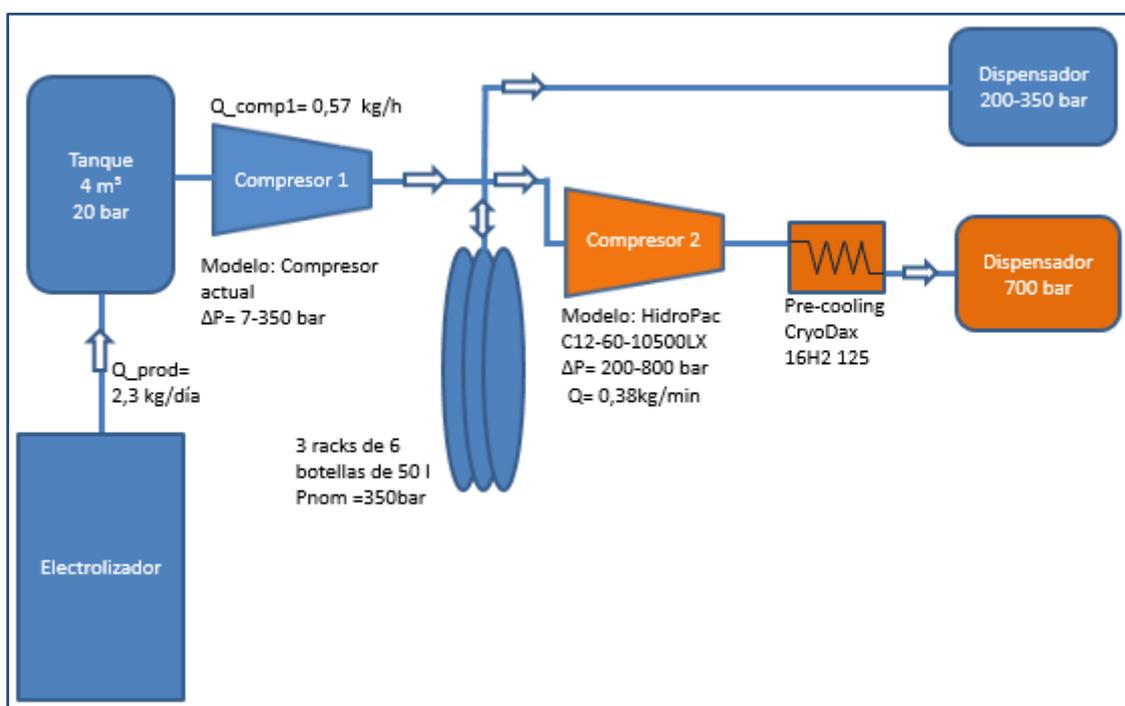


Figura 13. Diagrama modo de operación Configuración propuesta 3. Fuente: Elaboración propia

#### 6.4. Configuración propuesta 4

La configuración propuesta 4 presenta el siguiente modo de operación:

Presenta una configuración mixta. La primera etapa considera almacenamiento intermedio a la salida del compresor 1 mientras que en la segunda etapa se realiza una compresión directa. A nivel operacional, esta configuración se diferencia de la configuración propuesta 3 en que el compresor de la segunda etapa de compresión proporciona un caudal menor, por lo que el tiempo de recarga es mayor y no requiere un equipo enfriador al alcanzarse durante la recarga una temperatura interior del depósito superior a 85°C (ver anexo 2).

El compresor 1 se alimenta desde el tanque y expulsa el hidrógeno al almacenamiento intermedio. En esta primera etapa la presión de salida del hidrógeno es de hasta 350 bar (racks de botellas existentes, presión nominal de 350 bar). El compresor 2 realiza la segunda etapa de compresión, en la que el hidrógeno proveniente del almacenamiento intermedio se comprime hasta 800 bar. El dispensador transfiere el caudal de salida del compresor 2 hasta el depósito del vehículo. El tiempo de repostaje se obtiene como función del caudal de compresión del compresor 2. Para una capacidad de recarga de 6kg a 700 bar el tiempo de repostaje es de 6,7 h.

En el caso del repostaje a 350 bar, este se puede realizar en cascada desde el almacenamiento intermedio.

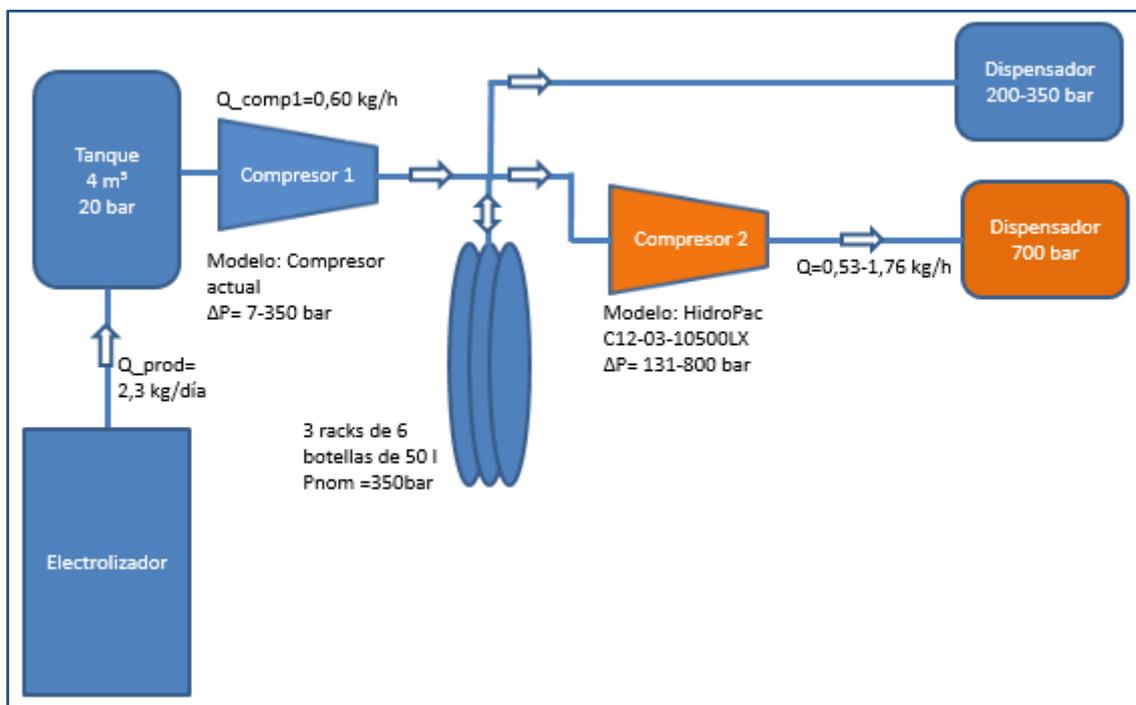


Figura 14. Diagrama modo de operación Configuración propuesta 4. Fuente: Elaboración propia

## 6.5. Configuración propuesta 5

La configuración propuesta 5 presenta el siguiente modo de operación:

Se caracteriza por realizar una compresión directa, es decir, no incluye almacenamiento intermedio. Difiere de la configuración propuesta 1 en que la primera etapa de compresión se realiza con el compresor actual por lo que para una recarga a 350 bar no se requiere el uso de los dos compresores como ocurre en la configuración propuesta 1, no obstante, esta configuración es más lenta.

La compresión del hidrógeno se realiza en dos etapas. El compresor 1 se alimenta desde el tanque y expulsa el hidrógeno al buffer. En esta primera etapa la presión de salida del hidrógeno es de 100 bar (capacidad hasta 350 bar) y es almacenado en el buffer de forma transitoria. El compresor 2 realiza la segunda etapa de compresión, en la que el hidrógeno proveniente del buffer a 100 bar se comprime hasta 800 bar. El dispensador transfiere el caudal de salida del compresor 2 hasta el tanque del vehículo. El tiempo de repostaje se obtiene como función del caudal de compresión, en este caso limitado por el compresor 1 al ser el que cuenta con un caudal de compresión menor. Para una capacidad de recarga de 6kg a 700 bar el tiempo de repostaje es de 10,6h.

En esta configuración cabe destacar que, durante el repostaje, para garantizar una presión mínima del tanque de almacenamiento inicial superior a la presión de entrada requerida por el compresor 1, la capacidad del tanque de almacenamiento inicial debe ser de 6m<sup>3</sup>.

Para el repostaje a 350 bar, este se podría realizar únicamente con el compresor 1 o empleando ambos compresores, en este caso el tiempo de compresión sería menor.

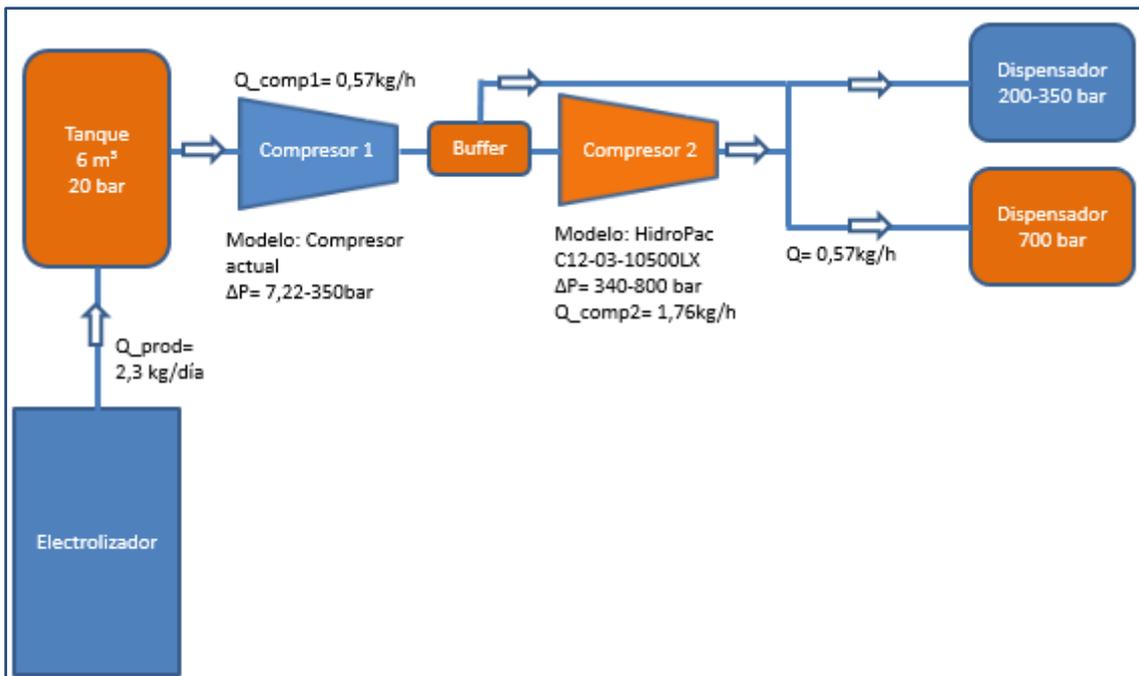


Figura 15. Diagrama modo de operación Configuración propuesta 5. Fuente: Elaboración propia

## 7. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CONFIGURACIONES PROPUESTAS

En el apartado anterior se han expuesto las configuraciones propuestas en una primera fase. A pesar de que todas ellas cumplen los requisitos fijados por FHA, cada una de ellas presenta distintos parámetros de operación y requiere diferentes equipos. A continuación, se va a realizar un análisis comparativo de las cinco configuraciones propuestas. El objetivo será determinar el potencial de cada configuración propuesta respecto de las demás. Tras la clasificación se determinará que configuraciones son de mayor interés y cuales se descartarán por no presentar ninguna ventaja respecto a otra/as configuraciones. Sobre las configuraciones que resulten preseleccionadas, posteriormente se realizará un análisis más exhaustivo, basado en un análisis cuantitativo económico y un análisis complementario.

En la tabla 7 se resumen las configuraciones propuestas en base a los equipos que requiere añadir cada una respecto de la instalación actual y al tiempo de recarga que presentan.

Configuración	Equipos que requiere añadir	Tiempo recarga a 700 bar
1	-2 compresores HydroPac Modelo:C1.5-60-1300LX Modelo:C12-60-10500LX -8m3 de almacenamiento a 20 bar -Dispensador a 700 bar	37 min.
2	-1 compresor HydroPac Modelo:C12-03-10500LX -18 bombonas de 50l a 1000bar -Enfriador CryoDax 16H2 250 -Dispensador a 700 bar	Recarga en cascada (5 min)
3	-1 compresor HydroPac Modelo:C12-60-10500LX - Enfriador CryoDax 16H2 125 -Dispensador a 700 bar	17 min.
4	-1 compresor HydroPac Modelo:C12-03-10500LX -Dispensador a 700 bar	6,7 h.
5	-1 compresor HydroPac Modelo:C12-03-10500LX -2m3 de almacenamiento a 20 bar -Dispensador a 700 bar	10,6 h.

Tabla 7. Resumen configuraciones propuestas.

### **Configuración 1**

La configuración 1, se caracteriza por realizar una recarga por compresión directa mediante dos compresores y no disponer de almacenamiento de media (350 bar) ni de alta presión (800 bar). El tiempo de recarga queda definido por el compresor con menor caudal de compresión. En concreto, esta configuración requiere que ambos compresores tengan un caudal elevado para conseguir el tiempo de recarga calculado, 37 min. Dado que, durante la recarga, la totalidad del hidrógeno transferido al vehículo provendrá del almacenamiento de baja presión (20 bar), este reducirá su presión debido a la extracción de parte del hidrógeno contenido, en cualquier caso, la presión en el interior del almacenamiento deberá ser superior a la requerida por el primer compresor. Para garantizar esta condición se requiere un aumento de la capacidad del almacenamiento de baja presión actual. De los dos compresores, el primero realiza la primera etapa de compresión hasta media presión y el segundo comprime el hidrógeno desde media hasta alta presión. En esta configuración no es posible realizar la primera etapa de compresión con el compresor actual de la FHA ya que el caudal de compresión de este es reducido y sería limitante para conseguir un tiempo de recarga similar al obtenido (37 min). Por ello se requiere la adquisición de 2 compresores. Respecto de la configuración 3, la configuración 1 es menos ventajosa ya que presenta un tiempo de recarga mayor, 37 min frente a 17 min de la configuración 1. Además, la configuración 3 integra el compresor de la FHA en su primera etapa de compresión y el almacenamiento de media presión actual. Ello permite obtener un coste menor al integrar los equipos actuales y permite reducir el tiempo de recarga. Por todo lo descrito se decide descartar la configuración propuesta 1.

### **Configuración 2**

La configuración 2, se caracteriza por realizar una recarga en cascada. El tiempo de recarga depende de la velocidad de transferencia del hidrógeno desde el almacenamiento de alta presión, al contrario que en las otras configuraciones propuestas donde el tiempo de recarga depende del caudal del compresor. Así, en esta configuración, la primera etapa de compresión se realiza con el compresor actual y la segunda etapa con un compresor de caudal reducido, más económico, pues se dispone del tiempo entre dos recargas para completar el almacenamiento de alta presión. El principal interés de esta configuración es su tiempo de recarga de 5 min, similar al de una gasolinera convencional. De las configuraciones propuestas, esta es la que presenta un tiempo de recarga menor. Cabe destacar que esta modalidad de recarga es la más extendida en las hidrogeneras actuales. Por todo ello esta configuración se selecciona para su análisis en la segunda fase.

### **Configuración 3**

La configuración 3, se caracteriza por realizar una recarga por compresión mediante dos compresores y disponer de almacenamiento de media presión, 350 bar. De los dos compresores que requiere esta configuración la primera etapa se realiza con el compresor actual, esto es posible ya que el compresor actual comprime con un caudal reducido y almacena el hidrógeno en el almacenamiento actual de media presión, desde el que el segundo compresor toma el hidrógeno almacenado con anterioridad, ello que supone una ventaja económica respecto a la configuración 1. En cuanto al tiempo de recarga, de las cinco configuraciones propuestas, esta

es la segunda más rápida en tiempo de recarga, 17 min. En base a las características de la configuración 3, se selecciona para su análisis en la segunda fase.

#### **Configuración 4**

La configuración 4, se caracteriza por realizar una recarga por compresión mediante dos compresores y disponer de almacenamiento de media presión, 350 bar. De los dos compresores que requiere esta configuración la primera etapa se realiza con el compresor actual, esto es posible ya que el compresor actual comprime con un caudal reducido y almacena el hidrógeno en el almacenamiento actual de media presión, desde el que el segundo compresor toma el hidrógeno almacenado con anterioridad. En cuanto al tiempo de recarga, de las cinco configuraciones propuestas, esta presenta un tiempo de recarga de 6,7h. Si bien, el tiempo de recarga de dicha configuración es más elevado, esta destaca por adoptar el compresor y el almacenamiento de media presión actual y requerir un compresor de caudal reducido, además de no necesitar equipo enfriador, por ello su principal interés es su menor coste económico. En concreto, esta configuración es la que presenta el menor corte económico de las 5 configuraciones propuestas. En base a las características de la configuración 4, se selecciona para su análisis en la segunda fase.

#### **Configuración 5**

La configuración 5, se caracteriza por realizar una recarga por compresión directa mediante dos compresores y no disponer de almacenamiento de media ni de alta presión. Esto permite prescindir de almacenamiento, pero supone que el tiempo de recarga dependa del caudal más restrictivo de los dos compresores. En esta configuración se han propuesto dos compresores de caudal reducido que aportan un tiempo de recarga de 10,6h. A pesar del dilatado tiempo de recarga, esta configuración requiere aumentar 2m<sup>3</sup> el volumen del almacenamiento de baja presión para que la presión en este sea superior a la presión de entrada al primer compresor durante la recarga. Si bien esta configuración presenta un coste menor al de la configuración 1 al ser más económicos sus compresores y requerir menor ampliación de capacidad de almacenamiento de baja presión, su tiempo de recarga es mucho mayor. Respecto de la configuración 4, la configuración 5 es menos ventajosa ya que presenta un tiempo de recarga mayor, 10,6h frente a 6,7h. de la configuración 4. Además, la configuración 4 integra el compresor de la FHA en su primera etapa de compresión y el mismo compresor para la segunda etapa que la configuración 5, sin necesidad de aumentar la capacidad actual del almacenamiento inicial, lo que supone un ahorro respecto de la configuración 5. En base a lo descrito se decide descartar la configuración 5.

En cuanto al coste económico de cada configuración, en esta primera comparativa se ha realizado un análisis económico de carácter cualitativo. De esta forma, considerando el coste de los equipos a instalar en referencia a los equipos del resto de configuraciones se concluye:

- La configuración que presenta mayor coste es la configuración 1.
- La configuración que integra un menor número de equipos existentes y presenta peores prestaciones es la configuración 5.

Tras analizar las diferentes configuraciones propuestas se han obtenido las siguientes conclusiones:

-La **configuración 1 no presenta ninguna ventaja técnica ni económica** respecto de la configuración 3, por ello se ha decidido descartar la configuración 1.

-La **configuración 5 no presenta ninguna ventaja técnica ni económica** respecto de la configuración 4, por ello se ha decidido descartar la configuración 5.

A partir de este punto el análisis se centrará en las configuraciones preseleccionadas en esta primera fase, concretamente en las siguientes configuraciones:

- **Configuración 2:** Caracterizada por realizar una recarga en cascada con un tiempo de recarga del vehículo de 5 min.
- **Configuración 3:** Caracterizada por realizar una recarga por compresión directa con un tiempo de recarga del vehículo de 17 min.
- **Configuración 4:** Caracterizada por realizar una recarga por compresión directa con un tiempo de recarga del vehículo de 6,7h.

## 8. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS CONFIGURACIONES PRESELECCIONADAS

Dado que el análisis técnico de las configuraciones se ha realizado en una primera fase, en esta segunda fase, se realizará un análisis económico cuantitativo de las tres configuraciones preseleccionadas. El objetivo será realizar un análisis más exhaustivo que permita determinar cuál es la configuración preferida para la ampliación de la hidrogenera actual, es decir, la configuración óptima. Complementariamente se analizará la versatilidad de las configuraciones ante posibles ampliaciones y/o modificaciones futuras.

### 8.1. Análisis económico

El Objetivo del presente apartado será cuantificar el coste económico de cada una de las tres configuraciones preseleccionadas. Dicha valoración económica se realizará en base a las siguientes consideraciones:

- Los costes de los equipos considerados para cada una de las configuraciones preseleccionadas se han obtenido a partir de un estudio de referencia realizado por NREL (National Renewable Energy Laboratory).[14], a excepción del coste del almacenamiento de alta presión obtenido de CALVERA.
- El análisis económico realizado considera exclusivamente los costes de los equipos (CAPEX) principales a adquirir de cada configuración (compresor, almacenamiento, pre-cooling y dispensador) y los elementos de control y mando de la instalación (válvulas, ...). No se ha considerado: la red de conducción y elementos asociados, costes de ingeniería, montaje y puesta en marcha, así como costes derivados de permisos que puedan requerirse para su operación. Tampoco se considera en este estudio costes de operación y mantenimiento.
- Dada la dificultad para conseguir información sobre costes de equipos, ..., y no pudiendo garantizar un error de cálculo asumible el análisis económico realizado no considera los costes de instalación ni los costes de mantenimiento de los equipos considerados.
- El cálculo del coste del compresor HYDROPAC C12-03-10500LX de 2,2kW se ha calculado a partir del coste de un compresor de 8,8kW obtenido del estudio de referencia realizado por NREL. Se ha aplicado un factor corrector de 1,33, que mayoría el coste calculado inicialmente según una proporción lineal, para considerar el factor de escala del equipo.
- Los costes de referencia se han obtenido en Dólares americanos y se han trasladado a Euros a fecha 5/09/2020. (Conversión 1 dólar=0,84€) [15].

A continuación, se muestra una relación de los equipos a adquirir para cada configuración preseleccionada y su valoración económica.

<b>Valoración económica Configuración 2</b>			
<b>Equipo/elemento</b>	<b>Modelo/cantidad</b>	<b>Coste unitario [€]</b>	<b>Coste [€]</b>
<b>Compresor</b>	HYDROPAC C12-03-10500LX	47.210,52	47.210,52
<b>Almacenamiento alta presión</b>	CALVERA BC1000	87.120	87.120
<b>Pre-cooling</b>	CryoDax 16H2 250	35.404,32	35.404,32
<b>Dispensador 700 bar</b>	FTI 700bar Hydrogen Dispenser	82.151,16	82.151,16
<b>Válvula manual</b>	18	420,00	7.560,00
<b>Válvula neumática</b>	7	420,00	2.940,00
<b>Total [€]</b>			<b>262.386,00</b>

Tabla 8. Relación de equipos a adquirir y valoración económica. Configuración 2.

<b>Valoración económica Configuración 3</b>			
<b>Equipo/elemento</b>	<b>Modelo/cantidad</b>	<b>Coste unitario [€]</b>	<b>Coste [€]</b>
<b>Compresor</b>	HYDROPAC C12-60-10500LX	463.731,24	463.731,24
<b>Pre-cooling</b>	CryoDax 16H2 125	21.242,59	21.242,59
<b>Dispensador 700 bar</b>	FTI 700bar Hydrogen Dispenser	82.151,16	82.151,16
<b>Válvula neumática</b>	1	420,00	420,00
<b>Total [€]</b>			<b>567.544,99</b>

Tabla 9. Relación de equipos a adquirir y valoración económica. Configuración 3.

<b>Valoración económica Configuración 4</b>			
<b>Equipo/elemento</b>	<b>Modelo/cantidad</b>	<b>Coste unitario [€]</b>	<b>Coste [€]</b>
<b>Compresor</b>	HYDROPAC C12-03-10500LX	47.210,52	47.210,52
<b>Dispensador 700 bar</b>	FTI 700bar Hydrogen Dispenser	82.151,16	82.151,16
<b>Válvula neumática</b>	6	420,00	2.520,00
<b>Total [€]</b>			<b>131.881,68</b>

Tabla 10. Relación de equipos a adquirir y valoración económica. Configuración 4.

<b>Presupuesto [€]</b>	
<b>Configuración 2</b>	<b>262.386,00</b>
<b>Configuración 3</b>	<b>567.544,99</b>
<b>Configuración 4</b>	<b>131.881,68</b>

Tabla 11. Presupuesto configuraciones preseleccionadas.

Realizada la valoración económica de las 3 configuraciones preseleccionadas se obtienen las siguientes conclusiones:

- La Configuración 4 es la que presenta un menor coste, 131.881,68€. Dicha configuración es la que implica la adquisición de un menor número de equipos, pues integra todos los equipos de la hidrogenera actual y no requiere ni almacenamiento de alta presión ni pre-cooling.
- La Configuración 3 es la que presenta un mayor coste, 567.544,99€. Al no considerar almacenamiento de alta presión requiere un compresor de alto caudal para conseguir el tiempo de recarga configurado, 17 min. Esto implica un sobredimensionamiento de la segunda etapa de compresión frente a la configuración 2 con un compresor de caudal reducido al disponer de almacenamiento de alta presión.
- La Configuración 2 presenta un coste intermedio entre la configuración 3 y 4. A pesar de ser su coste el doble que el de la configuración 4, cabe destacar que es la configuración con menor tiempo de recarga, 5 min. Además, esta configuración representa la modalidad de recarga más empleada actualmente en estaciones de recarga de hidrógeno.

## 8.2. Análisis complementario

Tras realizar el dimensionamiento de las configuraciones propuestas, el análisis técnico de las mismas y el análisis económico de las tres configuraciones preseleccionadas, se plantea un análisis complementario de versatilidad de las configuraciones preseleccionadas. De esta forma, para las configuraciones preseleccionadas, se ha analizado el tiempo mínimo entre recargas aportado por cada configuración. Más concretamente, el objetivo de este análisis es valorar la adaptabilidad de las configuraciones propuestas ante futuros escenarios en los que los requerimientos solicitados a la hidrogenera fuesen más exigentes, en concreto un mayor número de recargas por día. Cabe destacar que en este análisis complementario se ha introducido una modificación sobre los requisitos iniciales, se ha considerado una capacidad de producción del electrolizador teórica suficiente para que el suministro de H<sub>2</sub> no represente una limitación en el cálculo de futuros escenarios.

A continuación, se detallan las capacidades máximas de recarga para cada configuración preseleccionada:

## Configuración 2

La configuración 2 se caracteriza por presentar un tipo de recarga en cascada. El tiempo de recarga corresponderá con el tiempo necesario para realizar la transferencia del hidrógeno desde el almacenamiento final (800 bar) hasta el vehículo, siendo de 5 min. En cuanto al tiempo necesario para restituir los almacenamientos intermedio y final a su capacidad nominal tras diversas recargas, este vendrá determinado por el caudal de los dos compresores que permiten recargar las cascadas.

Por una parte, si el almacenamiento intermedio y final están completos al inicio de una recarga, el tiempo entre sucesivas recargas unitarias estará determinado por el primer compresor al ser este el que presenta menor caudal de compresión en estas condiciones de operación. Se considera que en esta situación el segundo compresor opera con la presión de entrada máxima del almacenamiento intermedio, 350 bar. El tiempo entre recargas sucesivas será de 6,7h.

Por otra parte, si el almacenamiento intermedio se encontrara en el escenario de presión mínima, 131bar, en este escenario, el tiempo entre sucesivas recargas vendrá determinado por el primer compresor, siendo de 10,3h. (ciclo 2).

Cabe destacar que los tiempos establecidos entre recargas consideran un régimen estacionario. No obstante, si el almacenamiento intermedio y final estuvieran completos y se deseara recargar el máximo número de vehículos posible, se podrían recargar 5 vehículos en cascada de forma sucesiva con tiempo de recarga por vehículo de 5 min. Esta capacidad máxima de recarga queda definida por la capacidad del almacenamiento final, capaz de suministrar el hidrógeno necesario para realizar 5 recargas. El tiempo para restituir ambos almacenamientos a su estado inicial, sería de alrededor de 51,5h, quedando definido por el caudal del primer compresor. (ciclo 1).

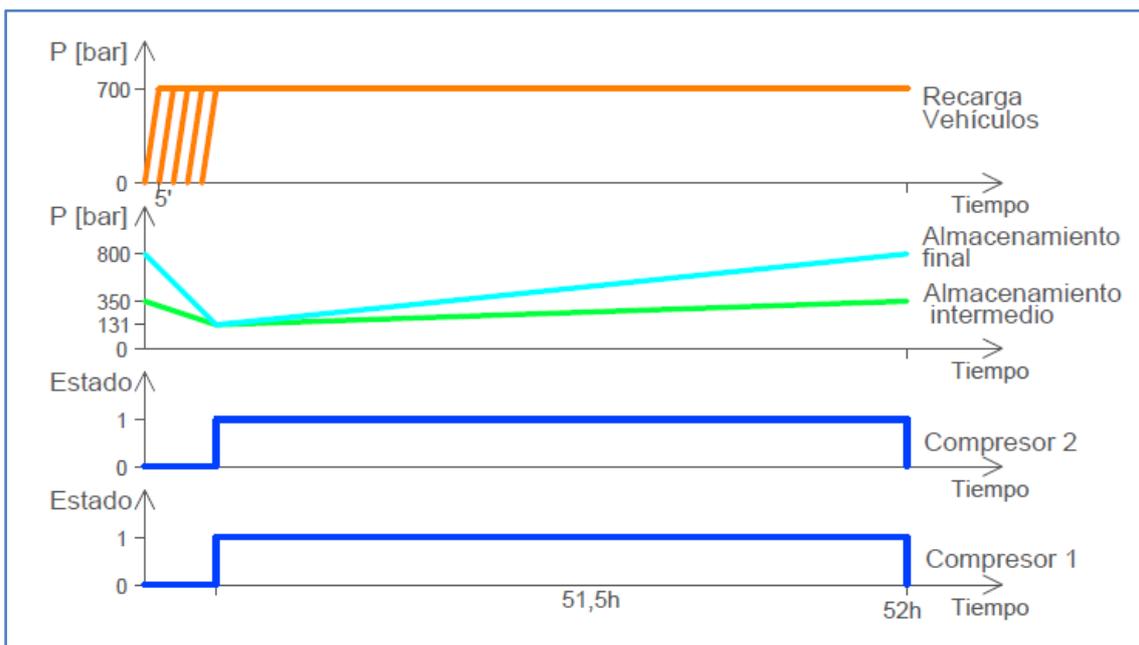


Figura 16. Representación ciclo1 Configuración 2. Fuente: Elaboración propia

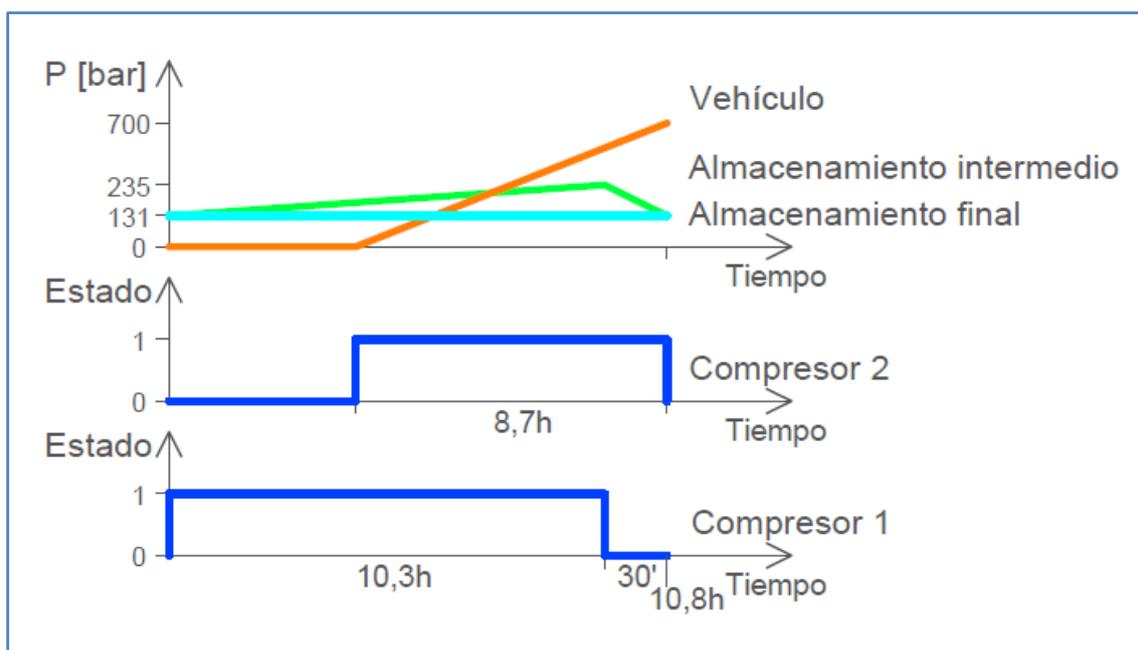


Figura 17. Representación ciclo2 Configuración 2. Fuente: Elaboración propia

Esta configuración permite realizar un máximo de 5 recargas al día.

La siguiente tabla muestra las características de los ciclos de recarga correspondientes a un estado del almacenamiento final de 800 bar y 131 bar respectivamente. El ciclo 1 corresponde con la situación más ventajosa respecto a tiempos de recarga y número máximo de las mismas, respecto del ciclo 2 que corresponde con la situación opuesta, en la que el tiempo de recarga y el número máximo de las mismas es el más desfavorable posible para esta configuración. Cabe destacar que existen múltiples casuísticas de recarga definidas por la presión del almacenamiento final comprendida entre 850 y 131 bar, en cualquier caso, las características de estos ciclos (tiempos de recarga...) estarán acotadas dentro de los límites definidos por el ciclo 1 y 2, correspondientes con una presión inicial al inicio del ciclo de recarga de 800 y 131 bar en el almacenamiento final. Esta configuración permite realizar un máximo de 5 recargas al día.

Ciclo	Estado almace- namiento inicial [bar]	Caudal compresor 1 [kg/h]	Estado inicial almace- namiento intermedio [bar]	Caudal compresor 2 [kg/h]	Estado inicial almace- namiento final [bar]	Tiempo recarga 1 vehículo	Tiempo mínimo entre recargas	Nº de recargas consecutivas
<b>1</b>	20	0,6	350	1,76-0,53	800	5 min	5 min	5 cada 52h
<b>2</b>	20	0,6	131	1,76-0,53	131	8,7h	10,8 h	1 cada 10,8h

Tabla 12. Ciclos de recarga Configuración 2.

### Configuración 3

La configuración 3 se caracteriza por presentar un tipo de recarga mixta, con almacenamiento tras su primera etapa de compresión y compresión directa en su segunda etapa. Dadas las características de los equipos que la componen, desde una situación inicial en la que el almacenamiento intermedio este completo, a 350 bar, la capacidad máxima de recarga será de 2 vehículos de forma consecutiva, siendo el tiempo de recarga de 17 min para cada uno de ellos. En esta configuración, el tiempo entre sucesivas recargas vendrá determinado por el estado del almacenamiento intermedio y el caudal del primer compresor, siendo este equipo el compresor instalado en la instalación actual. Teniendo en cuenta que el segundo compresor, situado entre el almacenamiento intermedio y el enfriador, presenta una relación de compresión máxima de 8, una presión máxima de salida de 800 bar y que el número máximo de recargas consecutivas es de 2, el rango de presiones de entrada con el que operará estará comprendido entre 131 - 350 bar. En base a las características de operación de los equipos que conforman la configuración 3, se podrán dar múltiples casuísticas que aportarán diferentes tiempos y número máximo de recargas de vehículos, dando lugar a diversos ciclos de recarga:

- 1) Considerando el almacenamiento intermedio a plena capacidad (350 bar) se podrá realizar la recarga de 2 vehículos de forma consecutiva con un tiempo de recarga individual de 17 min. En este caso cada recarga está asociada a 9 botellas, existiendo un total de 18 botellas que constituyen el almacenamiento intermedio. La presión al inicio de la recarga es de 350 bar y al final de 131bar, siendo este gradiente de presión el equivalente a la masa transferida para la recarga del vehículo (aprox. 6kg de H<sub>2</sub>). Así, en base a esta distribución, el tiempo mínimo entre recargas se compone del tiempo requerido por el compresor 2 para comprimir el hidrógeno desde las botellas (almacenamiento intermedio) hasta el vehículo (17 min). Mientras que el tiempo medio entre recargas se compone del tiempo mínimo entre recargas y del tiempo empleado por el compresor 1 para aumentar la presión de 131 bar de las botellas empleadas tras la recarga del vehículo hasta 350 bar de presión necesarios para recargas sucesivas (10,3h). El tiempo medio entre recargas obtenido para este ciclo es de 10,6h. Tras realizar las 2 recargas el almacenamiento intermedio se encontrará a 131 bar. En este escenario, el tiempo requerido para alcanzar de nuevo plena capacidad en el almacenamiento intermedio (350 bar) vendrá determinado por el caudal del primer compresor, siendo necesario un tiempo de 20,6h.

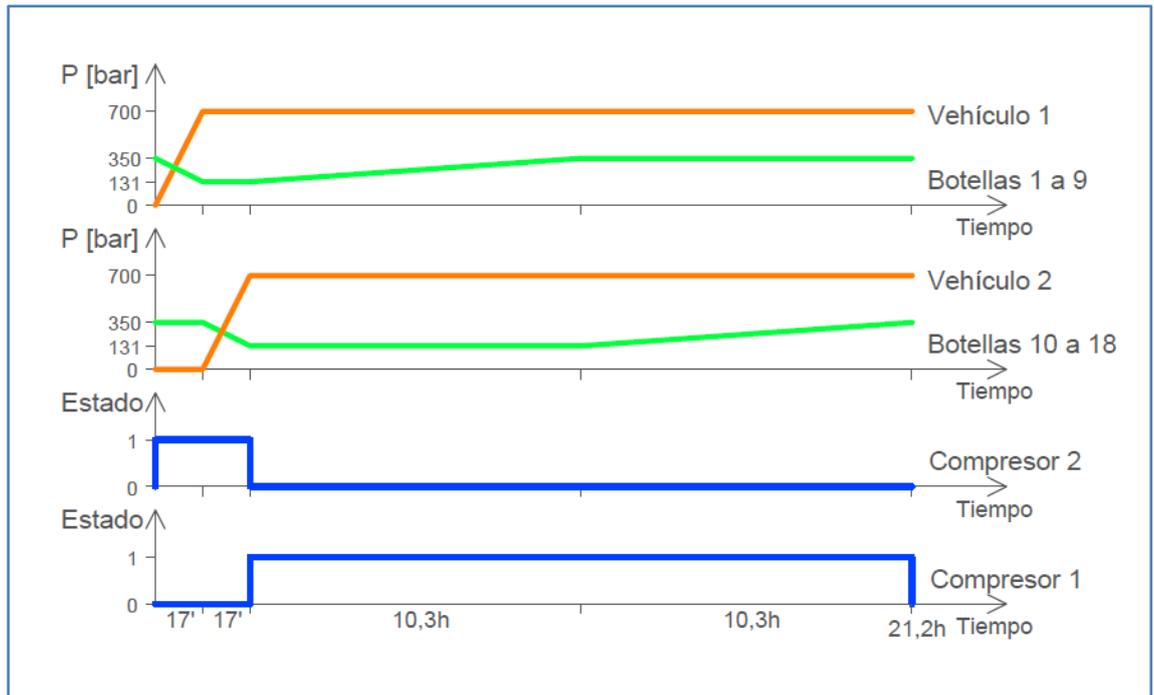


Figura 18. Representación ciclo 1 Configuración 3: 2 recargas consecutivas. Fuente: Elaboración propia

- 2) Considerando el almacenamiento intermedio a la presión mínima para que el segundo compresor pueda operar (131 bar), se podrá realizar la recarga de 1 vehículo de forma consecutiva con un tiempo de recarga individual de 20 min. y un tiempo entre recargas de 10,6h. En esta situación el almacenamiento intermedio se encontrará a 131bar y la presión mínima de este para recargar un vehículo deberá ser de 235 bar. El tiempo de compresión para alcanzar 235 bar desde 131 bar vendrá determinado por el primer compresor, siendo 10,3 h. Una vez alcanzada la presión necesaria para realizar una nueva recarga, el tiempo requerido por el segundo compresor para recargar el vehículo será de 20 min. Así, desde una situación en la que el almacenamiento intermedio se encuentre a 131 bar, el tiempo entre recargas unitarias será de 10,6h para esta configuración (correspondiente al tiempo de compresión del segundo compresor, 20 min. y al tiempo de llenado del almacenamiento intermedio por el primer compresor 10,3h).

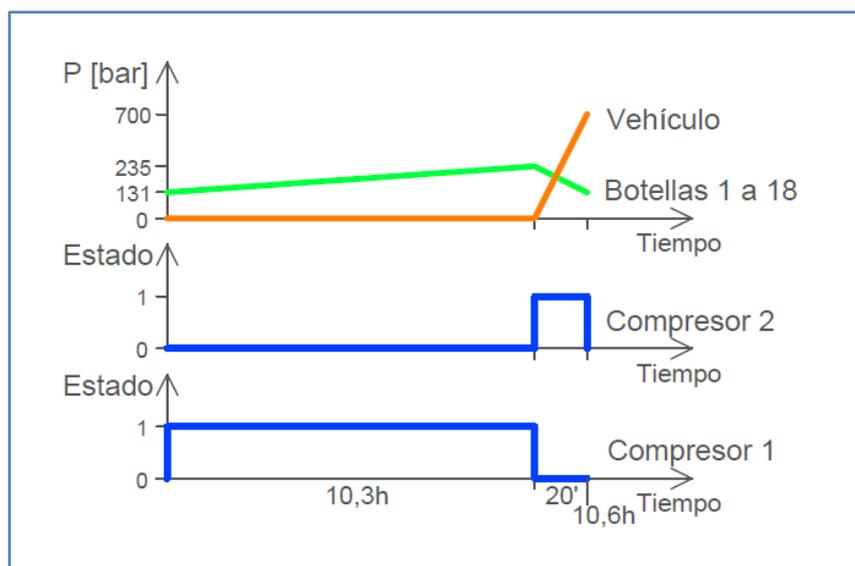


Figura 19. Representación ciclo 2 Configuración 3. Fuente: Elaboración propia

La siguiente tabla muestra las características de los ciclos de recarga correspondientes a un estado del almacenamiento intermedio de 350 bar y 131 bar respectivamente. El ciclo 1 corresponde con la situación más ventajosa respecto a tiempos de recarga y número máximo de las mismas, frente al ciclo 2 que corresponde con la situación contraria, en la que el tiempo de recarga y el número máximo de las mismas es el más desfavorable posible para esta configuración. Cabe destacar que existen múltiples casuísticas de recarga caracterizadas por una presión del almacenamiento intermedio comprendida entre 131 y 350 bar, en cualquier caso, las características de estos ciclos (tiempos de recarga...) estarán acotadas dentro de los límites definidos por el ciclo 1 y 2, correspondientes con una presión inicial al inicio del ciclo de recarga de 350 y 131 bar en el almacenamiento intermedio.

Ciclo	Estado almacenamiento inicial [bar]	Caudal compresor 1 [kg/h]	Estado inicial almacenamiento intermedio [bar]	Caudal compresor 2 [kg/h]	Tiempo recarga 1 vehículo	Tiempo mínimo entre recargas	Nº de recargas consecutivas
1	20	0,6	350	37,38-10,36	17min	17min	2 cada 21,2h
2	20	0,6	131	22,96-10,36	20min	10,6h	1 cada 10,6h

Tabla 13. Ciclos de recarga Configuración 3.

Tras analizar los posibles ciclos de recarga de la configuración 3, se puede concluir que su capacidad cíclica máxima de recargas por día es de 2 vehículos, oscilando el tiempo de recarga de un vehículo entre 17min y 10,6h, dependiendo de la presión del almacenamiento intermedio al inicio de la recarga del vehículo.

#### **Configuración 4**

La configuración 4 se caracteriza por presentar un tipo de recarga mixta, con almacenamiento tras su primera etapa de compresión y compresión directa en su segunda etapa. En base a las características de los equipos que la componen, desde una situación inicial en la que el almacenamiento intermedio este completo, a 350 bar, la capacidad máxima de recarga será de 2 vehículos de forma consecutiva, siendo el tiempo de recarga de 6,7h. para cada uno de ellos. En esta configuración, el tiempo entre sucesivas recargas vendrá determinado por el estado del almacenamiento intermedio y el caudal del primer compresor, siendo este equipo el compresor instalado en la instalación actual. Teniendo en cuenta que el segundo compresor, situado entre el almacenamiento intermedio y el enfriador, presenta una relación de compresión máxima de 8, una presión máxima de salida de 800 bar y que el número máximo de recargas consecutivas es de 2, el rango de presiones de entrada con el que operará estará comprendido entre 131 - 350 bar. En base a las características de operación de los equipos que conforman la configuración 4, se podrán dar múltiples escenarios que aportarán diferentes tiempos y número máximo de recargas de vehículos:

- 1) Considerando el almacenamiento intermedio a plena capacidad (350 bar) se podrá realizar la recarga de 2 vehículos de forma consecutiva con un tiempo de recarga individual de 6,7h. En este caso cada recarga está asociada a 9 botellas, existiendo un total de 18 botellas que constituyen el almacenamiento intermedio. La presión al inicio de la recarga es de 350 bar y al final de 131bar, siendo este gradiente de presión el equivalente a la masa transferida para la recarga del vehículo (aprox. 6kg de H<sub>2</sub>). Así, en base a esta distribución, el tiempo mínimo entre recargas se compone del tiempo requerido por el compresor 2 para comprimir el hidrógeno desde las botellas (almacenamiento intermedio) hasta el vehículo (6,7h). Mientras que el tiempo medio entre recargas queda determinado por el tiempo de compresión del compresor 1 para aumentar la presión de las botellas empleadas tras la recarga del vehículo desde 131 bar hasta 350 bar. El tiempo medio entre recargas obtenido para este ciclo es de 10,3h. Tras realizar las 2 recargas el almacenamiento intermedio se encontrará a 131 bar. En este escenario, el tiempo requerido para alcanzar de nuevo plena capacidad en el almacenamiento intermedio (350 bar) vendrá determinado por el caudal del primer compresor, siendo necesario un tiempo de 20,6h.

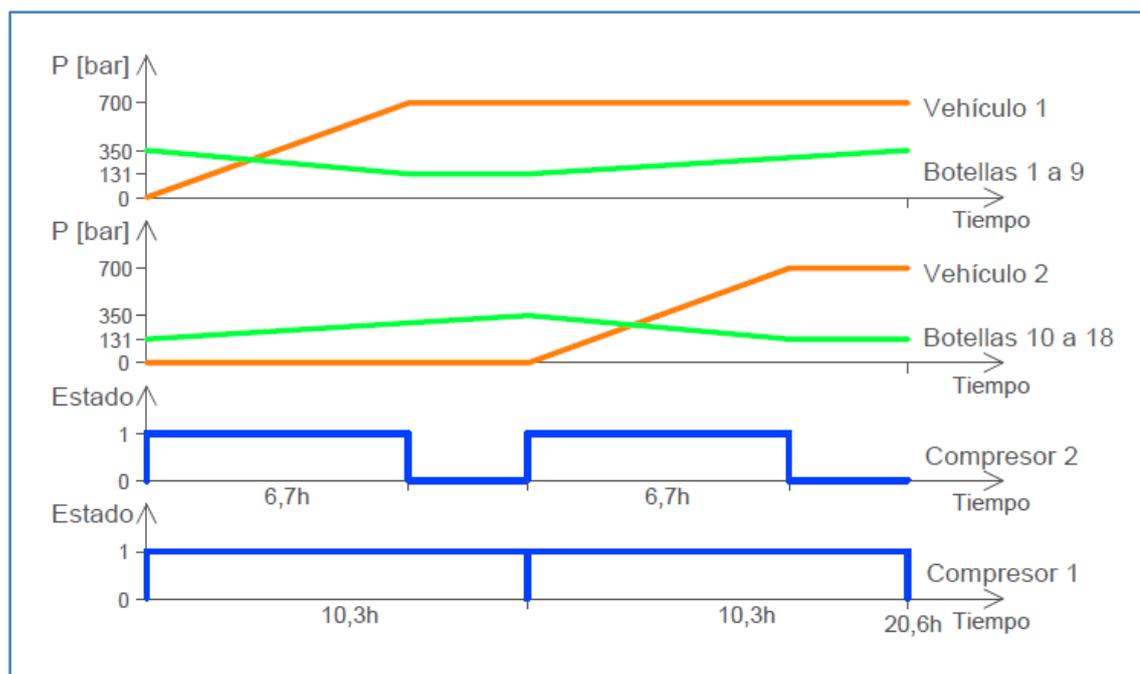


Figura 20. Representación ciclo 1 Configuración 4: 2 recargas consecutivas. Fuente: Elaboración propia

- 2) Considerando el almacenamiento intermedio a la presión mínima para que el segundo compresor pueda operar (131 bar), se podrá realizar la recarga de 1 vehículo de forma consecutiva con un tiempo de recarga individual de 8,7 h. Esta situación podría darse tras haber realizado dos recargas consecutivas en su tiempo mínimo de recarga, 6,7h/recarga, así el almacenamiento intermedio se encontraría a 131 bar tras las 2 recargas. En esta situación el almacenamiento intermedio se encontrará a 131bar y la presión mínima de este para recargar un vehículo deberá ser de 235 bar en todas las botellas del almacenamiento intermedio. El tiempo de compresión para alcanzar 235 bar desde 131 bar vendrá determinado por el primer compresor, siendo 10,3 h. Una vez alcanzada la presión necesaria para realizar una nueva recarga, el tiempo requerido por el segundo compresor para recargar el vehículo será de 8,7. Dado que el almacenamiento intermedio se compone de 18 botellas, mientras unas se llenan con el compresor 1 otras se vacían con el compresor 2. Así, desde una situación en la que el almacenamiento intermedio se encuentre a 131 bar, el tiempo entre recargas unitarias será de 10,8h, correspondiente al tiempo de compresión del compresor 1 (10,3h) más el tiempo de llenado de una botella (0,5h), pues durante el llenado de la última botella inevitablemente el compresor 2 debe permanecer a la espera.

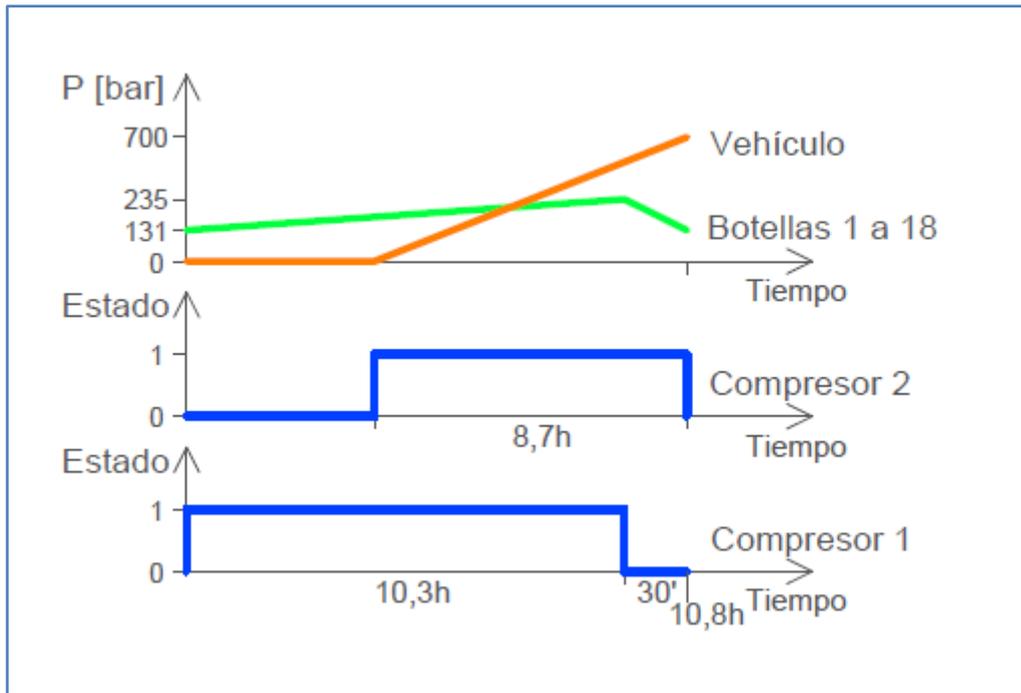


Figura 21. Representación ciclo 2 Configuración 4. Fuente: Elaboración propia

La siguiente tabla muestra las características de los ciclos de recarga correspondientes a un estado del almacenamiento intermedio de 350 bar y 131 bar respectivamente. El ciclo 1 corresponde con la situación más ventajosa respecto a tiempos de recarga y número máximo de las mismas, frente al ciclo 2 que corresponde con la situación contraria, en la que el tiempo de recarga y el número máximo de las mismas es el más desfavorable posible para esta configuración. Cabe destacar que existen múltiples casuísticas de recarga caracterizadas por una presión del almacenamiento intermedio comprendida entre 131 y 350 bar, en cualquier caso, las características de estos ciclos (tiempos de recarga...) estarán acotadas dentro de los límites definidos por el ciclo 1 y 2, correspondientes con una presión inicial al inicio del ciclo de recarga de 350 y 131 bar en el almacenamiento intermedio.

Ciclo	Estado almacenamiento inicial [bar]	Caudal compresor 1 [kg/h]	Estado inicial almacenamiento intermedio [bar]	Caudal compresor 2 [kg/h]	Tiempo recarga 1 vehículo	Tiempo mínimo entre recargas	Nº de recargas consecutivas
1	20	0,6	350	1,76-0,53	6,7h	6,7h	2 cada 20,6
2	20	0,6	131	1,76-0,53	8,7h	10,6h	1 cada 10,3h

Tabla 14. Ciclos de recarga Configuración 4.

Tras analizar los posibles ciclos de recarga de la configuración 4 se puede concluir que su capacidad cíclica máxima de recargas por día es de 2 vehículos al día, oscilando el tiempo de recarga de un vehículo entre 6,7. Y 8,7h., dependiendo del estado del almacenamiento intermedio al inicio de la recarga del vehículo.

En base a los resultados del análisis complementario, se obtiene la siguiente clasificación para las configuraciones preseleccionadas en función del número máximo de recargas a realizar por día:

Clasificación	Nº Configuración	Nº máximo recargas/día
<b>Primer lugar</b>	Configuración 2	5
<b>Segundo lugar</b>	Configuración 3	2
<b>Tercer lugar</b>	Configuración 4	2

Tabla 15. Resultados análisis complementario.

## 9. CONFIGURACIÓN SELECCIONADA

Tras desarrollar las 5 configuraciones propuestas para la ampliación de la capacidad de recarga de la hidrogenera de FHA. Realizar el análisis comparativo en una primera fase en la que se han preseleccionado 3 de las 5 configuraciones propuestas y con la información obtenida del análisis económico en una segunda fase, se ha decidido seleccionar la configuración 2 para la ampliación de la capacidad de recarga de la hidrogenera de FHA. Los motivos por los que finalmente se ha seleccionado la configuración 2 frente a las demás han sido:

- **Coste de ampliación.** La configuración 2 presenta un coste para la ampliación de la actual hidrogenera de 262.386,00€ (coste de equipos principales). Si bien, respecto a la configuración 4 su coste es mayor los parámetros de operación de ambas configuraciones no son similares. En cuanto a la configuración 3, el coste de la configuración 2 es menor, por lo que supone una ventaja, además sus parámetros de operación son mejores que los de la configuración 3.
- **Tiempo de recarga.** La configuración 2 es la configuración que presenta un tiempo de recarga menor, 5 minutos.
- **Número de recargas consecutivas.** La configuración 2 es la configuración que permite un mayor número de recargas consecutivas, 5 recargas.
- **Adaptabilidad ante futuras ampliaciones.** Ante un escenario de ampliación de la hidrogenera, que permita un mayor número de recargas al día, la inversión que supone el almacenamiento de alta presión es asumible al ser este almacenamiento totalmente integrable en una ampliación futura dado el carácter modular del almacenamiento constituido por botellas.
- **Potencia requerida.** La configuración 2 al implementar una recarga en cascada, dispone de almacenamiento de alta presión, lo que le permite conseguir tiempos de recarga reducidos sin necesidad de emplear un compresor de alto caudal, como es el caso de la configuración 3. Al tratarse de un compresor de caudal reducido su presión es mucho menor, factor influyente en la potencia contratada para la hidrogenera.

En la tabla 16 se detallan los principales equipos que constituyen la configuración 2 y sus parámetros de operación.

Características Configuración 2		
Equipo	Modelo/cantidad	Descripción
Electrolizador	ITM	-Presión de salida: 20 bar -Caudal: 2,3 kg/día -Potencia: 50 kW
Tanque de almacenamiento inicial	LAPESA	-Presión nominal: 35 bar -Capacidad: 4 m <sup>3</sup>
Compresor 1ª etapa	Compresor hidrogenera actual HOFER	-Compresor HOFER -Rango de presión: 7-350 bar -Relación de compresión: 3,4/ 2 etapas -Caudal: 0,3-0,9 kg/h -Potencia: 4,8 kW
Almacenamiento media presión	WYSTRACH	-Presión nominal: 350 bar -Capacidad: 0.9 m <sup>3</sup> -3racks de 6 botellas cada uno
Compresor 2ª etapa	HYDROPAC C12-03-10500LX	-Compresor HYDROPAC -Rango de presión: 34-800 bar -Relación de compresión: 8 -Caudal: 0,084-2,114kg/h -Potencia: 2,2 kW
Almacenamiento alta presión	CALVERA BC1000	-Presión nominal: 1000 bar -Capacidad: 0.9 m <sup>3</sup> -3racks de 6 botellas cada uno
Pre-cooling	CryoDax 16H2 250	-Pre-cooling CryoDax -Caudal: 1,85 kg/min
Dispensador 700 bar	FTI 700bar Hydrogen Dispenser	-Presión salida: 700 bar
Válvula manual	63 ud.	-Designación: V
Válvula neumática	13 ud.	-Designación: AOV
Válvula antirretorno	6 ud.	-Designación: NRV
Válvula alivio	3 ud.	-Designación: SV
Regulador de presión	2 ud.	-Designación: PR

Tabla 16. Características Configuración 2.

El presupuesto de los equipos considerados para la ampliación de la hidrogenera actual al formato definido por la configuración 2 asciende a DOSCIENTOS SESENTA Y DOS MIL TRESCIENTOS OCHENTA Y SEIS EUROS 262.386,00 €. A este coste habría que añadir el coste del resto de elementos requeridos, costes de ingeniería, montaje, puesta en marcha y los derivados de tasas por la obtención de permisos para su instalación y operación

En la Figura 22 se representa un croquis de la ubicación de los equipos que componen la Configuración 2. Los equipos representados en línea continua azul representan los equipos actuales de la hidrogenera de FHA mientras que los equipos representados en línea continua naranja representan los equipos que se han de adquirir.

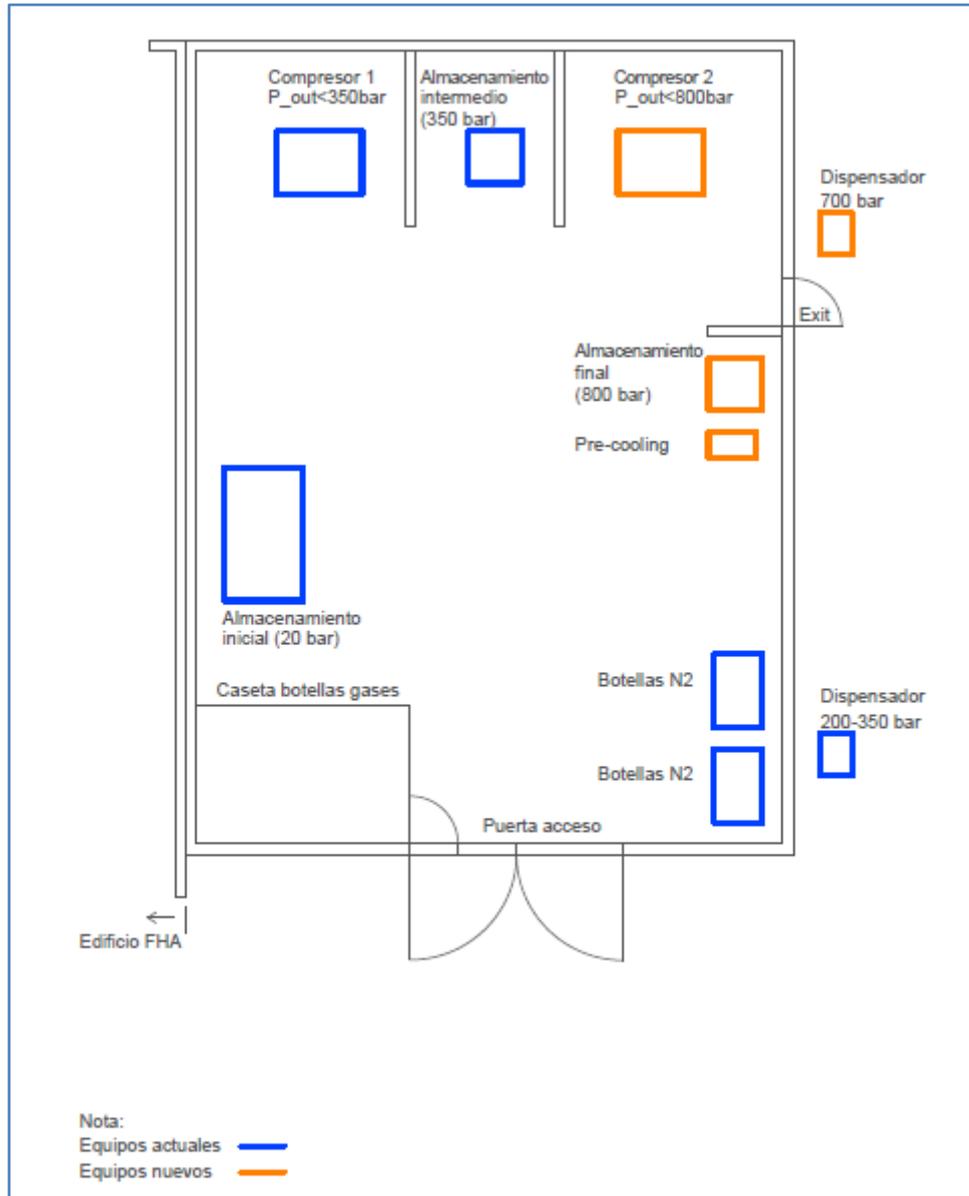
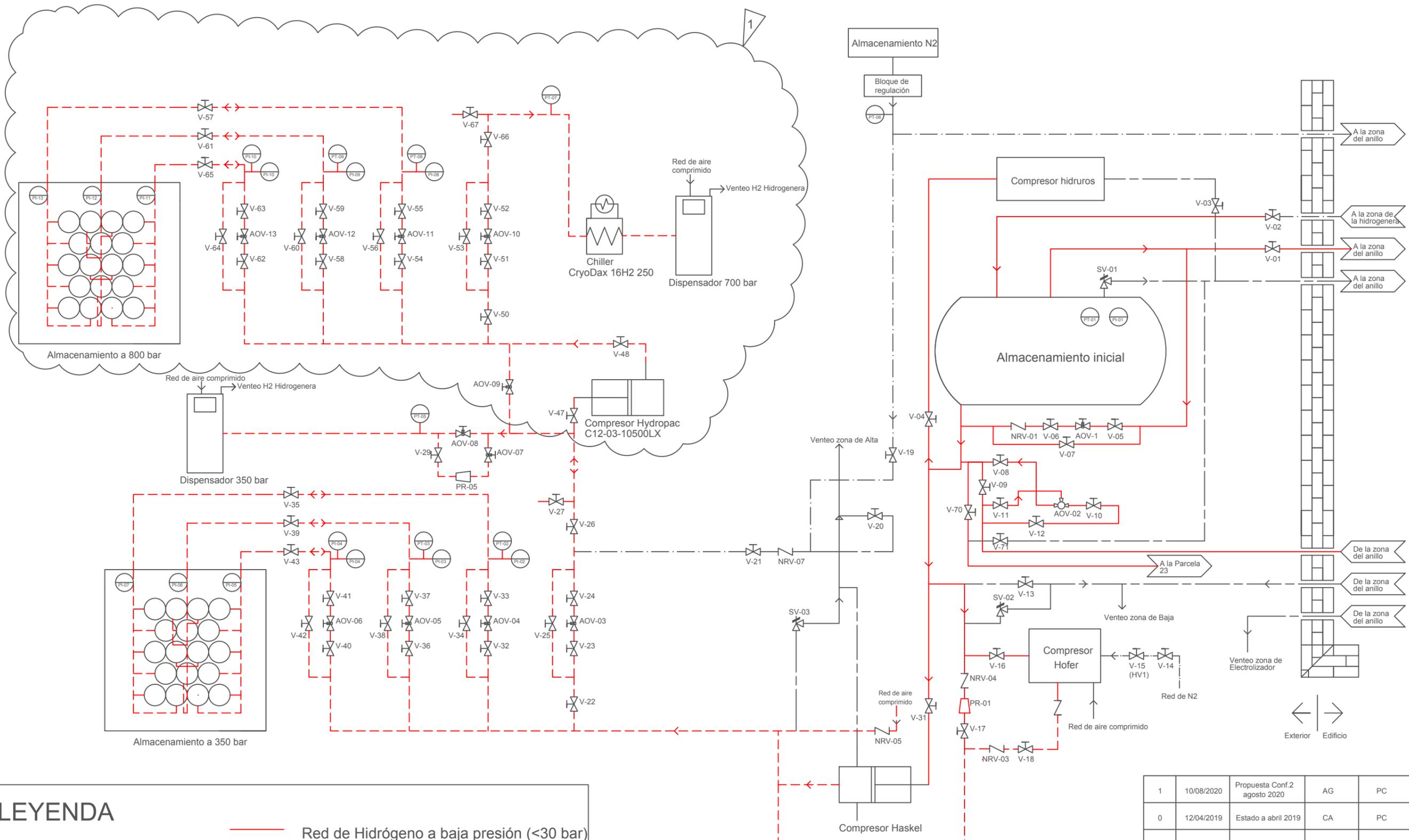


Figura 22. Croquis de ubicación de los equipos para la Configuración seleccionada.

A continuación, se muestra el plano de instalación de la configuración seleccionada.

1



### LEYENDA

- V- Válvula manual
- AOV- Válvula neumática
- NRV- Válvula antirretorno
- SV- Válvula de alivio
- PR- Regulador de presión

- Red de Hidrógeno a baja presión (<30 bar)
- - - Red de Hidrógeno a alta presión (>30 bar)
- Red de Nitrógeno
- - - Red de Oxígeno
- · - · - Red de Venteo
- - - - - Red de Aire Comprimido

NOTA: En las válvulas que aparece una nomenclatura entre paréntesis, hace referencia a su nomenclatura en campo

1	10/08/2020	Propuesta Conf.2 agosto 2020	AG	PC
0	12/04/2019	Estado a abril 2019	CA	PC
REV.	FECHA	DESCRIPCIÓN	REALIZADO	VERIFICADO
PROYECTO: <b>TFM Ampliación Hidrogenera FHA</b>				
NOMBRE PLANO: <b>CONFIGURACIÓN N°2</b>				
N° PLANO: <b>HRS 2.</b>				

## 10. CONCLUSIÓN

La estación de recarga de vehículos de hidrógeno de la Fundación Hidrógeno Aragón se caracteriza por disponer de una capacidad de recarga a 200 y 350 bar. Dicha capacidad de recarga representaba el estándar de presión de los vehículos de hidrógeno en el momento de su puesta en marcha, año 2.009. Debido a la evolución de la tecnología de los FCEV, en la actualidad, el estándar de presión normalizado se sitúa en 700 bar. Por ello surge la necesidad de ampliar la actual capacidad de recarga de la hidrogenera de FHA al nuevo estándar establecido en 700 bar. Para ello, el objetivo planteado desde FHA ha sido dimensionar una hidrogenera que permita la recarga de vehículos a 700 bar, teniendo en cuenta los siguientes requisitos; mantener disponibles las capacidades de recarga actuales de 200 y 350 bar, capacidad mínima de recarga de un vehículo al día, en la medida de lo posible integrar los equipos de la actual hidrogenera en la nueva configuración propuesta, considerar la adaptabilidad de los equipos requeridos para la ampliación de la hidrogenera ante futuras actualizaciones de esta y valorar económicamente el coste de las diferentes propuestas.

Así, en una primera fase, se han desarrollado todas las alternativas posibles bajo el cumplimiento de los requisitos establecidos, obteniéndose 5 configuraciones posibles para la ampliación de la capacidad de la hidrogenera. Tras realizar un análisis comparativo de entre las 5 configuraciones propuestas, se ha determinado descartar 2 de ellas por no presentar ninguna ventaja técnica ni económica respecto de otras configuraciones propuestas.

En una segunda fase y tras la preselección de 3 de las 5 configuraciones propuestas inicialmente, se ha realizado un análisis más exhaustivo de las 3 configuraciones preseleccionadas, siendo sus principales características las siguientes:

- Configuración propuesta 2, caracterizada por implementar una recarga en cascada, presentar el menor tiempo de recarga, 5 min., un número máximo de 5 recargas consecutivas e integrar almacenamiento de hidrógeno a 800 bar.
- Configuración propuesta 3, caracterizada por realizar una recarga mixta en la que tras la primera etapa de compresión se considera almacenamiento de hidrógeno a 350 bar y posteriormente una compresión directa sin almacenamiento a 800 bar. Presenta un tiempo de recarga de 17 min. y un número máximo de 2 recargas consecutivas.
- Configuración propuesta 4, caracterizada por realizar una recarga mixta en la que tras la primera etapa de compresión se considera almacenamiento de hidrógeno a 350 bar y posteriormente una compresión directa sin almacenamiento a 800 bar. Esta configuración permite la recarga simultánea del almacenamiento de hidrógeno a 350 bar y de un vehículo, lo que supone una reducción del tiempo de recarga. Presenta un tiempo de recarga de 6,7 h. y un número máximo de 2 recargas consecutivas.

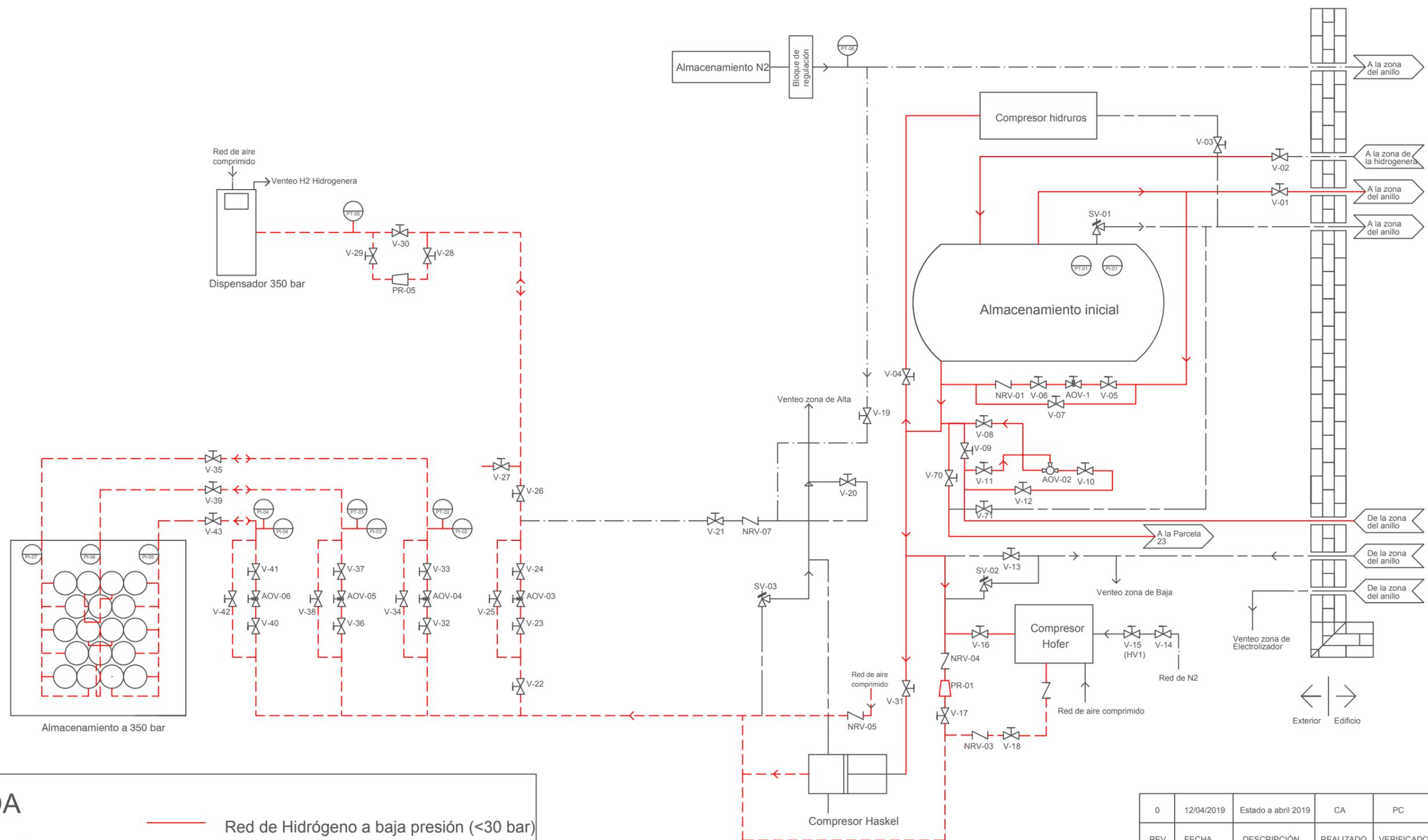
En cuanto al coste de las 3 configuraciones preseleccionadas, la Configuración 4 es la que presenta un menor coste frente a la configuración 3 que presenta el coste más elevado de las 3.

De las 3 configuraciones preseleccionadas para la ampliación de la capacidad de recarga de la hidrogenera de FHA finalmente se ha seleccionado la configuración 2 por ser la opción más ventajosa a nivel técnico y presentar un coste intermedio.

Por último, cabe destacar que la configuración seleccionada implementa la modalidad de hidrogenera más extendida en la actualidad a nivel comercial, recarga en cascada. Además, al igual que en el periodo 2009-2020 el estándar de presión ha evolucionado de 350 a 700 bar, siendo necesario actualizar la instalación actual para adaptarse al nuevo estándar, parece previsible que en el periodo 2020-2030 los vehículos de hidrógeno aumenten su cuota de mercado, siendo probable un aumento de la capacidad de recarga de la hidrogenera. Ante este escenario, la configuración 2 presenta un alto grado de adaptabilidad principalmente definido por el carácter modular del almacenamiento de hidrógeno a 800 bar que considera.

## 11. ANEXOS

### 11.1. ANEXO 1 Planos de instalación de la hidrogenera actual y de las configuraciones preseleccionadas



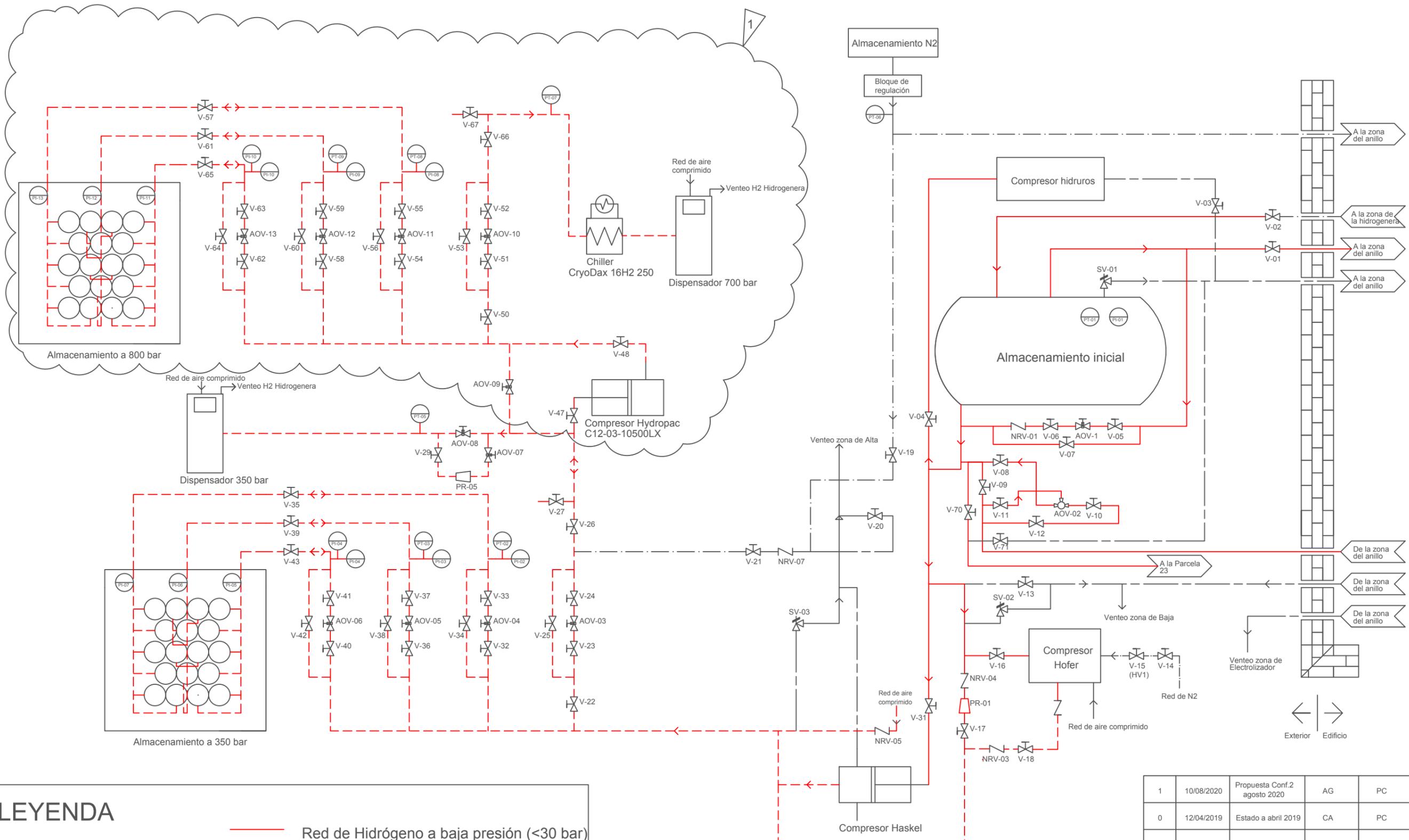
### LEYENDA

- V- Válvula manual
  - AOV- Válvula neumática
  - NRV- Válvula antirretorno
  - SV- Válvula de alivio
  - PR- Regulador de presión
- Red de Hidrógeno a baja presión (<30 bar)
  - - - Red de Hidrógeno a alta presión (>30 bar)
  - · - · - Red de Nitrógeno
  - · - · - Red de Oxígeno
  - · - · - Red de Venteo
  - · - · - Red de Aire Comprimido

NOTA: En las válvulas que aparece una nomenclatura entre paréntesis, hace referencia a su nomenclatura en campo

0	12/04/2019	Estado a abril 2019	CA	PC
REV.	FECHA	DESCRIPCIÓN	REALIZADO	VERIFICADO
PROYECTO: <b>TFM Ampliación Hidrogenera FHA</b>				
NOMBRE PLANO: <b>HRS WALQA</b>				
Nº PLANO: <b>HRS 1.</b>				

1

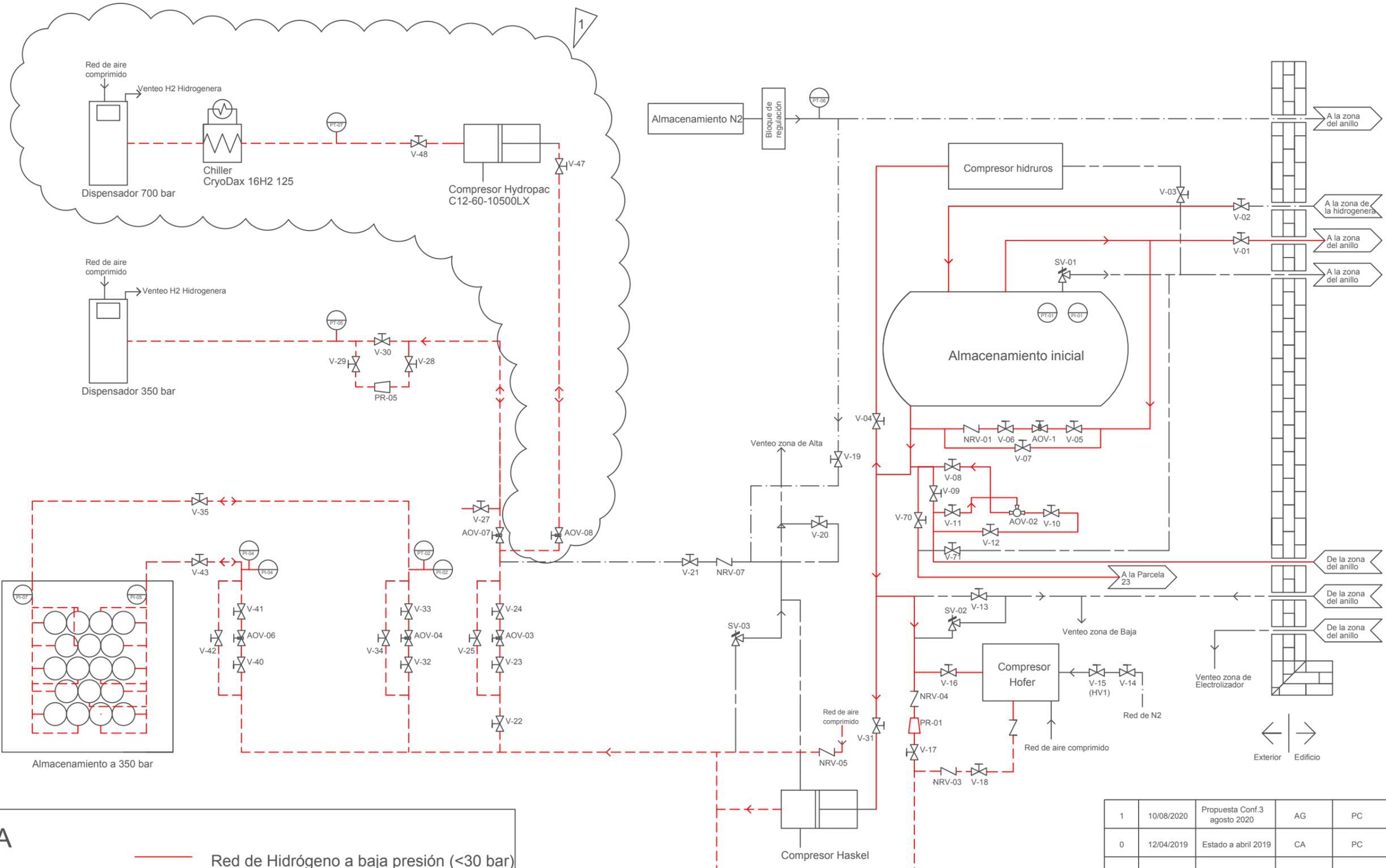


### LEYENDA

- V- Válvula manual
  - AOV- Válvula neumática
  - NRV- Válvula antirretorno
  - SV- Válvula de alivio
  - PR- Regulador de presión
- Red de Hidrógeno a baja presión (<30 bar)
  - - - Red de Hidrógeno a alta presión (>30 bar)
  - Red de Nitrógeno
  - Red de Oxígeno
  - Red de Venteo
  - Red de Aire Comprimido

NOTA: En las válvulas que aparece una nomenclatura entre paréntesis, hace referencia a su nomenclatura en campo

1	10/08/2020	Propuesta Conf.2 agosto 2020	AG	PC
0	12/04/2019	Estado a abril 2019	CA	PC
REV.	FECHA	DESCRIPCIÓN	REALIZADO	VERIFICADO
PROYECTO: TFM Ampliación Hidrogenera FHA				
NOMBRE PLANO: CONFIGURACIÓN N°2				
N° PLANO: HRS 2.				

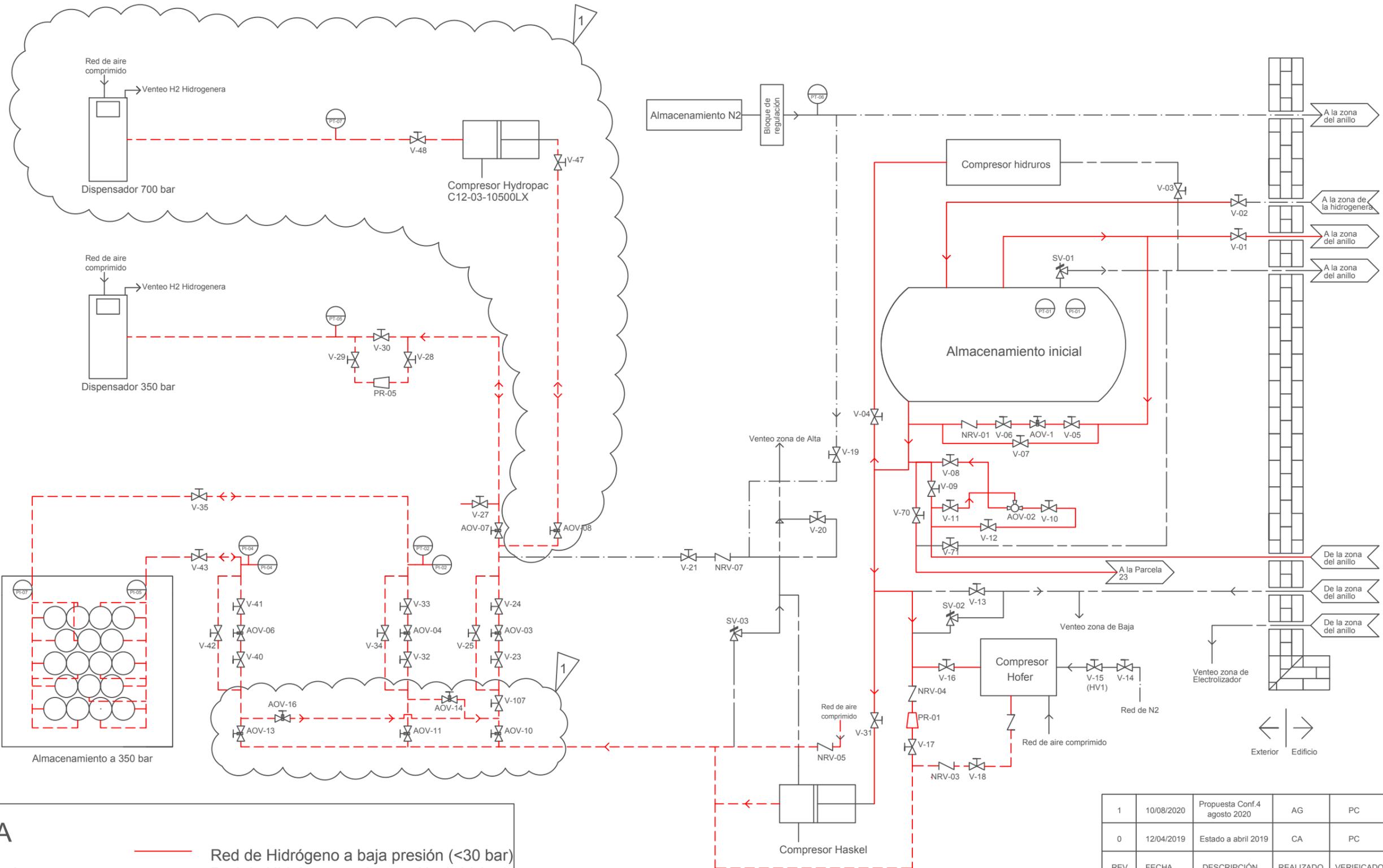


### LEYENDA

- V- Válvula manual
  - AOV- Válvula neumática
  - NRV- Válvula antirretorno
  - SV- Válvula de alivio
  - PR- Regulador de presión
- Red de Hidrógeno a baja presión (<30 bar)
  - - - Red de Hidrógeno a alta presión (>30 bar)
  - Red de Nitrógeno
  - Red de Oxígeno
  - Red de Venteo
  - Red de Aire Comprimido

NOTA: En las válvulas que aparece una nomenclatura entre paréntesis, hace referencia a su nomenclatura en campo

1	10/08/2020	Propuesta Conf.3 agosto 2020	AG	PC
0	12/04/2019	Estado a abril 2019	CA	PC
REV.	FECHA	DESCRIPCIÓN	REALIZADO	VERIFICADO
PROYECTO: <b>TFM Ampliación Hidrogenera FHA</b>				
NOMBRE PLANO: <b>CONFIGURACIÓN N°3</b>				
N° PLANO: <b>HRS 3.</b>				



### LEYENDA

- V- Válvula manual
  - AOV- Válvula neumática
  - NRV- Válvula antirretorno
  - SV- Válvula de alivio
  - PR- Regulador de presión
- Red de Hidrógeno a baja presión (<30 bar)
  - - - Red de Hidrógeno a alta presión (>30 bar)
  - Red de Nitrógeno
  - Red de Oxígeno
  - Red de Venteo
  - Red de Aire Comprimido

NOTA: En las válvulas que aparece una nomenclatura entre paréntesis, hace referencia a su nomenclatura en campo

1	10/08/2020	Propuesta Conf.4 agosto 2020	AG	PC
0	12/04/2019	Estado a abril 2019	CA	PC
REV.	FECHA	DESCRIPCIÓN	REALIZADO	VERIFICADO
PROYECTO: <b>TFM Ampliación Hidrogenera FHA</b>				
NOMBRE PLANO: <b>CONFIGURACIÓN 4</b>				
Nº PLANO: <b>HRS 4.</b>				

## 11.2. ANEXO 2. Cálculo de la temperatura alcanzada en el interior del depósito del vehículo durante la recarga.

Según la norma SAEJ 2601 la temperatura del hidrógeno contenido en el interior del depósito del vehículo debe ser inferior a 85°C. Durante la recarga, el hidrógeno transferido desde el almacenamiento se expande a su entrada al depósito ya que la presión inicial es inferior a la del hidrógeno transferido. Según la fluidodinámica, *cuando un gas es forzado a pasar a través de una válvula se produce un cambio de temperatura, considerando que no se intercambia calor*. En el caso del hidrógeno, este es un gas con un coeficiente Joule-Thomson negativo por lo que el gas aumentará su temperatura durante la expansión. Por ello, al plantear cada una de las configuraciones, se ha de valorar la necesidad de incorporar un equipo enfriador que permita reducir la temperatura del hidrógeno proveniente del almacenamiento de alta presión o del compresor. La finalidad de este equipo es reducir la temperatura del hidrógeno antes de que este se expanda a su entrada al depósito, donde en ningún caso debe superar los 85°C. En base a los tiempos de recarga de cada configuración preseleccionada se han realizado dos modelos de cálculo.

- Un primer modelo aplicable a las configuraciones 2 y 3, ya que ambas presentan tiempos de recarga similares; 5 y 20 min. La característica principal de este modelo es la aproximación del proceso de recarga a un proceso adiabático.
- Un segundo modelo aplicable a la configuración 4, caracterizado por considerar el proceso de recarga no adiabático al ser el tiempo de recarga distendido en el tiempo; 8h 30 min.

El objetivo de los modelos planteados será determinar la temperatura alcanzada al final de la recarga en cada una de las configuraciones preseleccionadas, ello permitirá determinar si es necesario incluir un equipo enfriador. Los esquemas que se muestran a continuación corresponden con el volumen de control considerado para aplicar los balances de masa y de energía. En el primero no se incluye el equipo enfriador mientras que en el segundo sí.

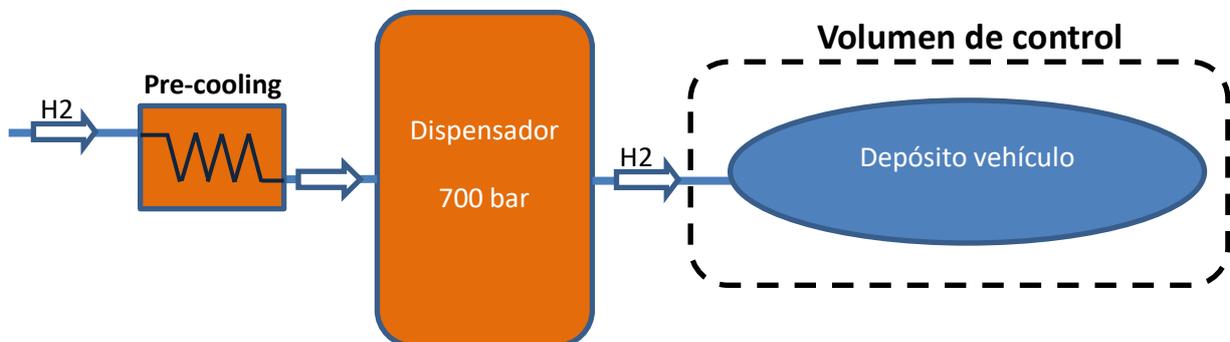


Figura 23. Volumen de control considerado para las configuraciones 2 y 3.

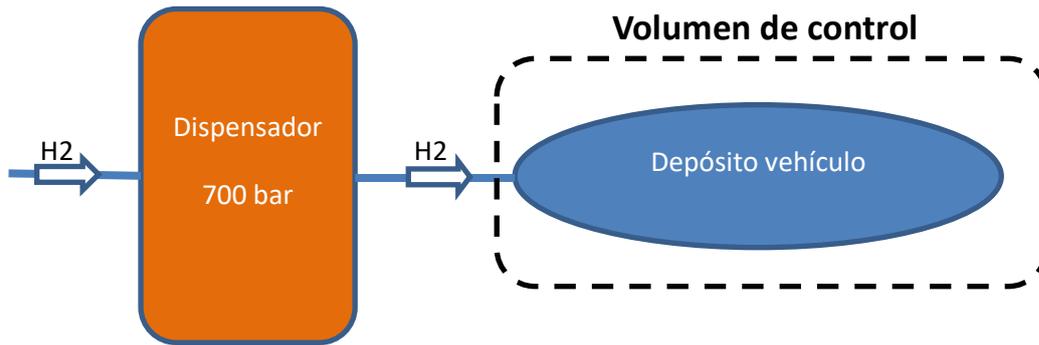


Figura 24. Volumen de control considerado para la configuración 4.

### Modelo 1: cálculo de la temperatura alcanzada en el depósito para las configuraciones 2 y 3

Las configuraciones 2 y 3 se caracterizan por presentar tiempos de recarga reducidos; 5 y 20 min. Por ello la principal característica del modelo será considerar el proceso de recarga adiabático;  $Q=0$ . A continuación se detallan las hipótesis fijadas para el modelo 1:

- El proceso de recarga es adiabático ( $Q=0$ )
- Se considera que durante el proceso de recarga el trabajo realizado es nulo ( $W=0$ )
- Se desprecian los  $\Delta E_c$  y  $\Delta E_p$
- La temperatura inicial del depósito del vehículo es de 298K (25°C)
- La temperatura del hidrógeno contenido en el almacenamiento es de 298K (25°C)
- La temperatura del hidrógeno transferido tras su paso por el enfriador es de 233K (-40°C)
- La presión inicial en el depósito es de 10 bar
- La presión final en el depósito es de 700 bar
- La expansión del hidrógeno gaseoso se considera isoentálpica ( $h_e=8,468$  kJ/kmol a 25°C;  $h_e=6,5924$  kJ/kmol a -40°C) [16]

### Balance de masa

$$\frac{d m_{vc}}{dt} = \Delta m_{vc} = m_2 - m_1$$

Donde:

$m_1$  = masa inicial en el depósito del vehículo

$m_2$  = masa final en el depósito del vehículo

$\Delta m_{vc}$  = masa transferida al depósito del vehículo

### Balance de energía

$$\frac{dU_{vc}}{dt} = W_{vc} + Q_{vc} + \Delta m_{vc} * he$$

Donde:

$$W_{vc} = 0$$

$$Q_{vc} = 0$$

$he$  = entalpía del hidrógeno transferido

Despejando ambos balances se obtiene:

$$\Delta U_{vc} = (m_2 * u_2) - (m_1 * u_1) = \Delta m_{vc} * he$$

$$u_2 = \frac{\Delta m_{vc} * he + m_1 * u_1}{m_2}$$

Donde:

$u_1$  = energía interna inicial del hidrógeno en el depósito  $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

$u_2$  = energía interna final del hidrógeno en el depósito  $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

La temperatura máxima alcanzada durante la recarga se ha calculado mediante un proceso iterativo al ser un proceso dinámico en el que la presión varía. A continuación, se explican los cálculos realizados en Excel:

- En cada iteración se ha fijado un incremento de 1 bar, siendo la presión inicial de 10 bar y la final de 700 bar.
- Para la primera iteración se ha considerado una temperatura inicial dentro del depósito de 25°C, con dicha temperatura se calcula  $m_1$  y  $m_2$  (masa de H<sub>2</sub> antes y después de la iteración de cálculo en el depósito),  $\Delta m_{vc}$  como la diferencia entre  $m_2$  y  $m_1$  y se obtiene la  $u_2$  para la primera iteración.
- A partir de la segunda iteración, la energía interna al inicio de cada iteración corresponderá con el valor de la energía interna al final de la iteración previa. La masa al inicio y al final de la nueva iteración se calculará en base a la presión inicial y final de la iteración correspondiente y a la temperatura calculada para la energía interna final de la iteración previa.
- Para el cálculo de la temperatura en cada iteración, a partir de los valores de energía interna en función de la temperatura obtenidos de tablas termodinámicas se ha

realizado un gráfico de dispersión. Con dicho gráfico se ha calculado la línea de tendencia de la energía interna respecto de la temperatura. Mediante la programación de una macro en Excel, se ha obtenido la temperatura correspondiente a la energía interna de salida alcanzada en cada iteración de cálculo de la hoja Excel. El valor de la temperatura al final de cada iteración permite calcular la masa al inicio y al final de la siguiente iteración.

El modelo diseñado se ha ejecutado para los dos escenarios propuestos, siendo los resultados obtenidos los siguientes:

**Escenario 1:** no se considera la instalación de un equipo enfriador. La entalpía de entrada corresponde con la del hidrógeno a 25 °C. Tras realizar el cálculo en base a las hipótesis planteadas la temperatura alcanzada en el interior del depósito al final de la recarga es de **142,3°C**. No se cumple la norma SAEJ 2601 al ser la temperatura alcanzada superior a 85°C. **Según los resultados obtenidos las configuraciones 2 y 3 requieren un equipo enfriador.**

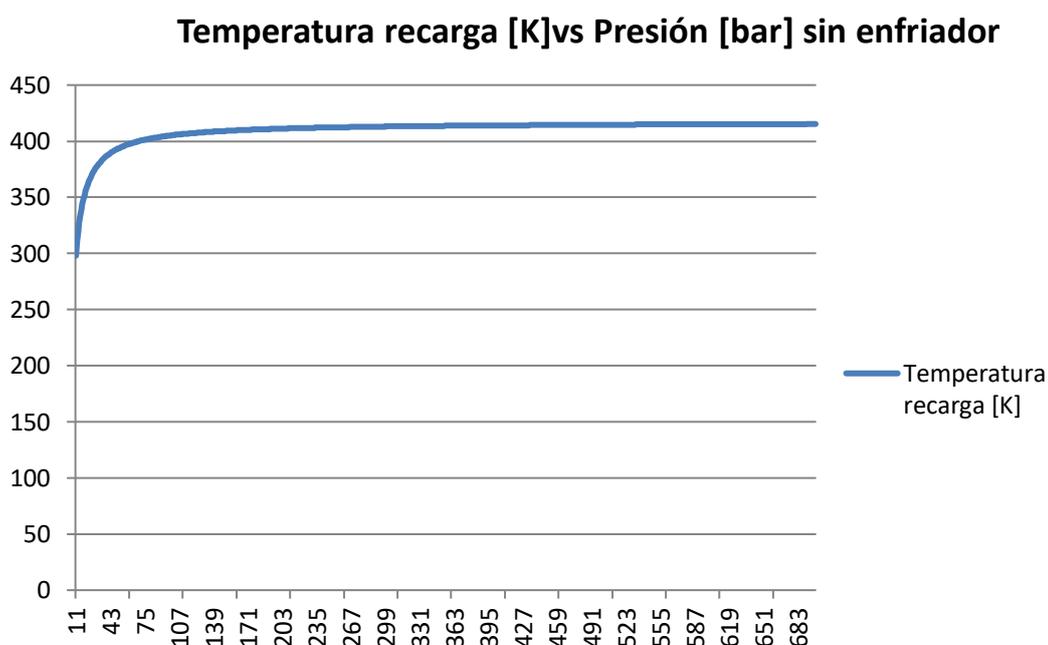


Figura 25. Evolución de la temperatura en el interior del depósito del vehículo durante la recarga sin enfriador para las configuraciones 2 y 3.

**Escenario 2:** se considera la instalación de un equipo enfriador. La entalpía de entrada corresponde con la del hidrógeno a -40 °C. Tras realizar el cálculo en base a las hipótesis planteadas la temperatura alcanzada en el interior del depósito al final de la recarga es de **53,8°C (327K)**. Se cumple la norma SAEJ 2601 al ser la temperatura alcanzada inferior a 85°C. **Según los resultados obtenidos las configuraciones 2 y 3 requieren un equipo enfriador.**

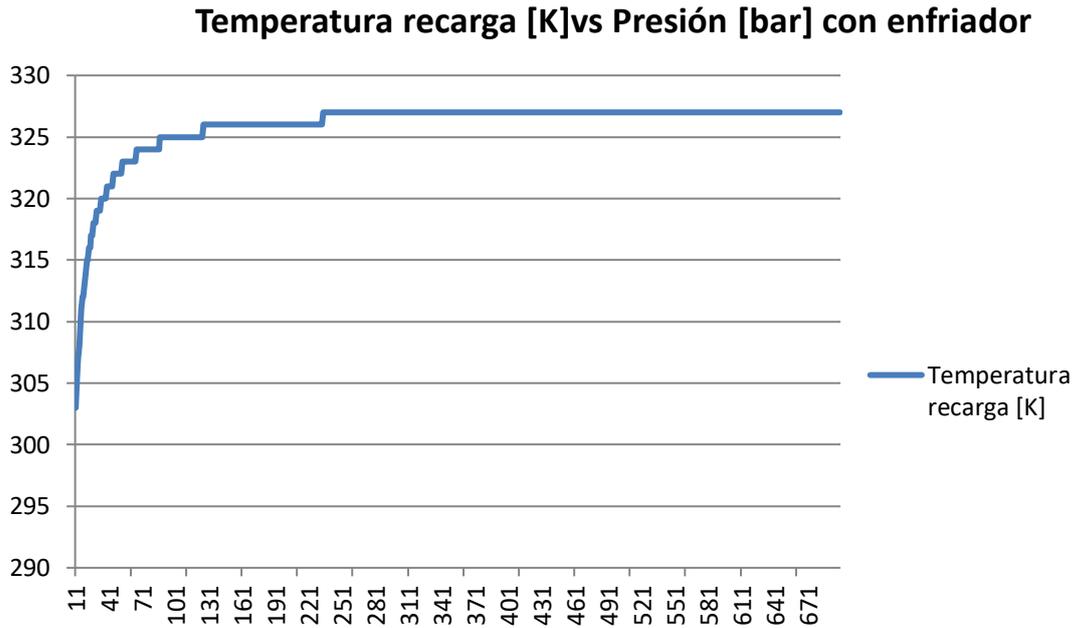


Figura 26. Evolución de la temperatura en el interior del depósito del vehículo durante la recarga con enfriador para las configuraciones 2 y 3.

Tras calcular el modelo planteado se ha obtenido una temperatura final en el depósito de **53,8°C (327K)**, inferior a los **85°C** fijados por la norma. En base a los resultados obtenidos se puede afirmar que las configuraciones 2 y 3, con un tiempo de recarga de 5 y 20 min. respectivamente requieren un equipo enfriador.

#### Modelo 2: cálculo de la temperatura alcanzada en el depósito para la configuración 4

El cálculo de la temperatura final en el depósito tras la recarga se ha realizado con Excel bajo las siguientes hipótesis:

- El proceso de recarga no es adiabático dada la duración de la recarga (8h. 30min.) ( $Q \neq 0$ )
- Se considera que durante el proceso de recarga el trabajo realizado es nulo ( $W=0$ )
- Se desprecian los  $\Delta E_c$  y  $\Delta E_p$
- La temperatura inicial del depósito del vehículo es de 298K (25°C)
- La temperatura del hidrógeno contenido en el almacenamiento es de 298K (25°C)
- La temperatura del hidrógeno transferido tras su paso por el enfriador es de 233K (-40°C)
- La presión inicial en el depósito es de 10 bar
- La presión final en el depósito es de 700 bar
- El tiempo de cada iteración de cálculo es de 44.3 segundos
- La expansión del hidrógeno gaseoso se considera isoentálpica ( $h_e=8,468$  kJ/kmol a 25°C;  $h_e=6,5924$  kJ/kmol a -40°C) [16]

### Balance de masa

$$\frac{d m_{vc}}{dt} = \Delta m_{vc} = m_2 - m_1$$

Donde:

$m_1$  = masa inicial en el depósito del vehículo

$m_2$  = masa final en el depósito del vehículo

$\Delta m_{vc}$  = masa transferida al depósito del vehículo

### Balance de energía

$$\frac{dU_{vc}}{dt} = W_{vc} + Q_{vc} + \Delta m_{vc} * he$$

Donde:

$$W_{vc} = 0$$

$$Q_{vc} \neq 0$$

$he$  = entalpía del hidrógeno transferido

Despejando ambos balances se obtiene:

$$\Delta U_{vc} = (m_2 * u_2) - (m_1 * u_1) = \Delta m_{vc} * he + Q_{vc}$$

$$u_2 = \frac{\Delta m_{vc} * he + m_1 * u_1 + Q_{vc}}{m_2}$$

$$Q'_{vc} = U * A * (T_{H2} - T_{amb})$$

$$Q_{vc} = Q'_{vc} * t_{iteración}$$

$$U * A = \frac{1}{R_{H2} + R_L + R_C + R_{air}}$$

$$R_{H2} = \frac{1}{2 * \Pi * r1 * L * h_c^{H2}}$$

$$R_c = \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2 * \Pi * K_c * L}$$

$$R_{air} = \frac{1}{2 * \Pi * r_3 * L * h_c^{air}}$$

$$R_L = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 * \Pi * K_L * L}$$

Donde:

$u_1 =$  energía interna inicial del hidrógeno en el depósito  $[\frac{kJ}{kg}]$

$u_2 =$  energía interna final del hidrógeno en el depósito  $[\frac{kJ}{kg}]$

$Q'_{vc} =$  potencia de transferencia de calor  $[J/s]$

$Q_{vc} =$  transferencia de calor  $[kJ]$

$UA =$  transferencia de calor  $[\frac{W}{k}]$

$T_{H2} =$  Temperatura del hidrógeno dentro del depósito

$T_{amb} =$  Temperatura ambiente (25°C)

$t_{iteración} =$  tiempo de cada iteración de cálculo (44.3seg)

$R_{H2} =$  Resistencia a la transferencia de calor del H2

$R_c =$  Resistencia a la transferencia de calor del material compuesto del depósito

$R_{air} =$  Resistencia a la transferencia de calor del aire

$R_L =$  Resistencia a la transferencia de calor del Aluminio

$h_c^{H2} =$  coeficiente de convección del hidrógeno = 250  $[\frac{W}{m^2K}]$

$$K_c = \text{coeficiente de conducción del material compuesto del depósito} = 1,14 \left[ \frac{W}{mK} \right]$$

$$h_c^{air} = \text{coeficiente de convección del aire} = 10 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$$

$$K_L = \text{coeficiente de conducción del aluminio} = 180 \left[ \frac{W}{mK} \right]$$

Nota: los valores de cálculo para los coeficientes de conducción y convección han sido obtenidos de FHA.

La temperatura máxima alcanzada durante la recarga se ha calculado mediante un proceso iterativo, al ser un proceso dinámico en el que varía la presión, la temperatura y con ello el calor transferido al exterior. A continuación, se explican los cálculos realizados en Excel:

- En cada iteración se ha fijado un incremento de 1 bar, siendo la presión inicial de 10 bar y la final de 700 bar.
- Para la primera iteración se ha considerado una temperatura inicial dentro del depósito de 25°C, con dicha temperatura se calcula la  $m_1$  y la  $m_2$  (masa de H2 antes y después de la iteración de cálculo en el depósito),  $\Delta m_{vc}$  como la diferencia entre  $m_2$  y  $m_1$  y se obtiene la  $u_2$  para la primera iteración.
- A partir de la segunda iteración, la energía interna al inicio de cada iteración corresponderá con el valor de la energía interna al final de la iteración previa. La masa al inicio y al final de la nueva iteración se calculará en base a la presión inicial y final de la iteración correspondiente y a la temperatura calculada para la energía interna final de la iteración previa.
- Para el cálculo de la temperatura en cada iteración, a partir de los valores de energía interna en función de la temperatura obtenidos de tablas termodinámicas se ha realizado un gráfico de dispersión. Con dicho gráfico se ha calculado la línea de tendencia de la energía interna respecto de la temperatura. Mediante la programación de una macro en Excel, se ha obtenido la temperatura correspondiente a la energía interna de salida alcanzada en cada iteración de cálculo de la hoja Excel. El valor de la temperatura al final de cada iteración permite calcular la masa al inicio y al final de la siguiente iteración.

El modelo diseñado se ha ejecutado para los dos escenarios propuestos, siendo los resultados obtenidos los siguientes:

**Escenario 1:** no se considera la instalación de un equipo enfriador. La entalpia de entrada corresponde con la del hidrógeno a 25°C. Tras realizar el cálculo en base a las hipótesis planteadas la temperatura alcanzada en el interior del depósito al final de la recarga es de **25°C**. Se cumple la norma SAEJ 2601 al ser la temperatura alcanzada inferior a 85°C. **Según los resultados obtenidos la configuración 4 no requieren un equipo enfriador.**

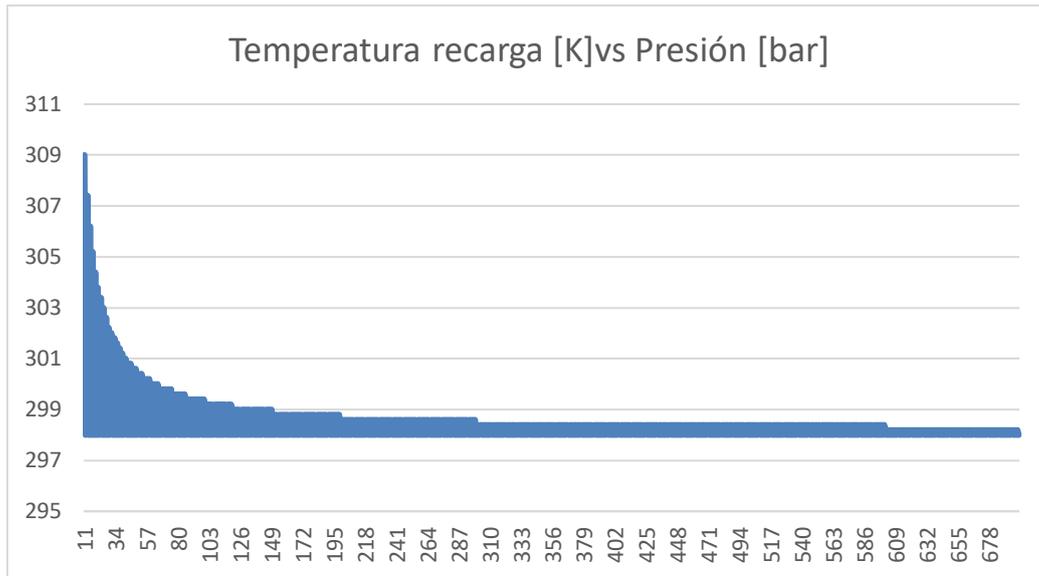


Figura 27. Evolución de la temperatura en el interior del depósito del vehículo durante la recarga sin enfriador para la configuración 4.

**Escenario 2:** dado que la configuración 4 no requiere equipo enfriador no se ha calculado la temperatura alcanzada si se incluyera un equipo enfriador.

Tras calcular el modelo planteado se ha obtenido una temperatura final en el depósito de 25°C (298K), inferior a los 85°C fijados por la norma. En base a los resultados obtenidos se puede afirmar que la configuración 4, con un tiempo de recarga de 8h. 30 min. no requiere un equipo enfriador.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

- [1] BP Statistical Review of World Energy 2019. [https://www.bp.com/content/dam/bp/country-sites/es\\_es/spain/home/pdfs/noticias/2019/infografia\\_sr\\_bp19.pdf](https://www.bp.com/content/dam/bp/country-sites/es_es/spain/home/pdfs/noticias/2019/infografia_sr_bp19.pdf)
- [2] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/la-concentraci%C3%B3n-de-co2-vuelve-a-registrar-un-m%C3%A1ximo-hist%C3%B3rico-en-el-observatorio-de-iza%C3%B1a/tcm:30-508900>
- [3] IPCC. Foreword and Preface Technical Summary. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/07/03\\_Technical-Summary-TS\\_V2.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/07/03_Technical-Summary-TS_V2.pdf)
- [4] IBERDROLA. COP25-Conferencia de las Partes 2019 en Madrid. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/contra-cambio-climatico/politicas-cambio-climatico/cop25>
- [5] European Commission. Marco sobre clima y energía para 2030. [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_es#:~:text=Gases%20de%20efecto%20invernadero%3A%20reducci%C3%B3n,arreglo%20al%20Acuerdo%20de%20Par%C3%ADs.](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_es#:~:text=Gases%20de%20efecto%20invernadero%3A%20reducci%C3%B3n,arreglo%20al%20Acuerdo%20de%20Par%C3%ADs.)
- [6] IDAE. Guía de la energía. <http://guiaenergia.idae.es/el-consumo-energia-en-espana/>
- [7] Diario del transporte. El transporte es el sector que más emisiones de CO2 generó en 2018. (12/07/2019) <https://diariodetransporte.com/2019/06/el-transporte-es-el-sector-que-mas-emisiones-co2-genero-en-2-018/>
- [8] El Plural. La prohibición de los coches Diésel en Alemania está más cerca. (08/03/2018) [https://www.elplural.com/motor/la-prohibicion-de-los-coches-diesel-en-alemania-esta-mas-cerca\\_121232102#:~:text=La%20industria%20del%20autom%C3%B3vil%20sigue,p%C3%ABlicas%20contra%20los%20veh%C3%ADculos%20di%C3%A9sel.&text=Ya%20en%202016%2C%20el%20Bundesrat,esta%20ley%20a%20toda%20europa.](https://www.elplural.com/motor/la-prohibicion-de-los-coches-diesel-en-alemania-esta-mas-cerca_121232102#:~:text=La%20industria%20del%20autom%C3%B3vil%20sigue,p%C3%ABlicas%20contra%20los%20veh%C3%ADculos%20di%C3%A9sel.&text=Ya%20en%202016%2C%20el%20Bundesrat,esta%20ley%20a%20toda%20europa.)
- [9] SAE J2601/2\_201409 Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles
- [10] El periódico de la Energía. Bruselas lanza su estrategia para impulsar la producción de hidrógeno verde. (08/07/2020) <https://elperiodicodelaenergia.com/bruselas-lanza-su-estrategia-para-impulsar-la-produccion-de-hidrogeno-verde/>
- [11] IEA. Tracking Energy Integration 2020-Analysis. (06/2020) <https://www.iea.org/reports/tracking-energy-integration-2020/hydrogen#abstract>
- [12] Mapa de hidrogenas a nivel europeo. <https://h2-map.eu/>
- [13] ISO/FDIS 19880-1 Gaseous hydrogen-Fuelling stations

