



INFORME DE EVALUACIÓN DE PRUEBAS REALIZADAS EN H₂SAREA

**Resultados de evaluación de pruebas para mezclas
del 10% H₂ y estudio de casos industriales** | Mayo 2023

ÍNDICE GENERAL

1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 Descripción del proyecto	4
1.2 Alcance	4
1.3 Objetivo	5
2 RESUMEN EJECUTIVO – CICLO DE PRUEBAS DE MEZCLA H₂/GN 10%	6
3 DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA H₂LOOP	11
3.1 Plataforma H ₂ LOOP componentes principales del loop principal	13
3.3 Componentes principales instalación doméstica	19
4 CASOS DE ESTUDIO INDUSTRIALES	20
4.1 Horno de tratamiento térmico	21
4.2 Caldera de vapor auxiliar	21
5 PLAN DE PRUEBAS DEL H₂LOOP	23
5.1 Pruebas de fugas	23
5.2 Pruebas de válvulas	25
5.3 Prueba de estación de regulación y medida (ERM)	26
5.4 Pruebas de equipos presentes en instalaciones de usuario	27
5.5 Prueba de materiales en autoclaves	29
6 DISEÑO Y EVALUACIÓN DE LA POSICIÓN DE INYECCIÓN DE H₂	34
7 EVALUACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DEL H₂LOOP CON 10% H₂	39
7.1 Condiciones iniciales	39
7.2 Duración	39
7.3 Resultados	39
8 RESULTADOS DE CASOS DE ESTUDIO INDUSTRIALES	41
8.1 Horno de tratamiento térmico	42
8.2 Caldera auxiliar de vapor	45
9 CONCLUSIONES	57
9.1 Red de distribución de gas natural	57
9.2 Instalación de usuario	57
9.3 Casos de uso industrial	57
10 ANEXOS	58

1 INTRODUCCIÓN

Este informe expone los resultados de las pruebas realizadas en el proyecto H₂SAREA para comprobar el funcionamiento de todos los elementos que conforman una red de distribución, cuando se realizan mezclas de un 10% de hidrógeno en el gas natural. Asimismo, detalla los resultados de las pruebas realizadas con esas mismas mezclas en instalaciones estándar de usuario doméstico, incluyendo instalaciones receptoras, contadores y aparatos gasodomésticos, tales como caldera y cocina de gas natural. Por último, detalla los resultados obtenidos del análisis de mezclar hidrógeno y gas natural en instalaciones industriales, tales como una caldera de generación de vapor auxiliar y un horno de tratamiento térmico. Estos últimos han sido realizados, en una primera fase, desde una óptica teórica, si bien, se está analizando la posibilidad de implementar proyectos piloto que corroboren los resultados.

Las conclusiones principales del informe son las siguientes:

- Las redes de distribución de gas natural están preparadas para canalizar mezclas de gas natural con 10% de hidrógeno. No se aprecia ningún comportamiento anómalo en los elementos de red, ni se detectan fugas, ni deterioro de los materiales.
- Las instalaciones de gas natural de los clientes domésticos están preparadas en términos generales para distribuir mezclas de dicho gas con un 10% de hidrógeno. Se ha comprobado el normal funcionamiento de la instalación receptora, contador, caldera y cocina.

Es relevante resaltar los siguientes aspectos respecto a las pruebas realizadas:

- La totalidad de los elementos que conforman el proyecto H₂Sarea han sido diseñados para gas natural y han estado en servicio durante más de 20 años.
- Las pruebas realizadas con los elementos de red de Nortegas han sido exhaustivas: durante 3.000 horas, se han probado tuberías de diferentes materiales, válvulas de diferentes tipologías utilizadas en alta y baja presión, una estación de regulación y medida (ERM), juntas dieléctricas, tomas en carga, elementos de instrumentación y medida, etc. Se han realizado 4 ciclos de prueba de fugas, revisándose 552 puntos en cada una de ellas, sin detectar ninguna fuga.
- Las pruebas han sido supervisadas por TECNALIA, el mayor centro de investigación aplicada y desarrollo tecnológico de España, mediante procedimientos detallados, contrastados con toda la normativa existente y en el contexto del proyecto Hazitek del Gobierno Vasco.

Actualmente se están realizando las pruebas al 15% de mezcla de hidrógeno y el plan es finalizar las pruebas de 20% de mezcla antes de final de 2023.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto H2Sarea pretende impulsar el empleo seguro del hidrógeno verde en la red de distribución de gas natural, como una manera eficaz de descarbonización, junto a otros gases renovables tales como el biometano o el e-metano (gas sintético) generado con fuentes renovables y descarbonizar, de este modo, los actuales consumidores que se abastecen de la red de distribución. Estas iniciativas, junto con otras asociadas al desarrollo de valles de hidrógeno, con generación de hidrógeno a gran escala y distribución local a aquellos consumidores que lo requieran en grandes cantidades o para usos 100%, serán una de las palancas que contribuyan a los ambiciosos objetivos de descarbonización planteados. Y todo ello integrando la economía circular y la optimización de las actuales infraestructuras.

Uno de los principales objetivos del proyecto es la investigación del comportamiento de la red de distribución actual de gas natural con porcentajes incrementales de hasta un 20% de hidrógeno, en una primera fase, donde la mezcla de hidrógeno y gas natural no modifica la familia de gases y por tanto la mezcla se comporta como gas natural. Posteriormente, en una segunda fase, el plan es incrementar el porcentaje de hidrógeno hasta un 100%.

Cabe resaltar que el proyecto H2Sarea se enmarca dentro del Programa Hazitek de proyectos de investigación, promovidos por el Gobierno Vasco. Desde Nortegas, nos gustaría agradecer especialmente a los demás participantes en el proyecto H2Sarea su colaboración en este proyecto estratégico para el desarrollo de infraestructuras eficientes de distribución de hidrógeno: ABC Compresores, Erreka, Fidegas, H2Site, Orkli, Tecnalia, Ikerlan y el Centro Nacional del Hidrógeno.



1.2 ALCANCE

El proyecto H₂SAREA contempla el diseño y construcción de una plataforma de investigación (H₂LOOP) para evaluar el comportamiento de los componentes de la infraestructura de gas de Nortegas en presencia de mezclas de Gas Natural e Hidrógeno y en diferentes condiciones de operación.

En el H₂LOOP se han incluido diferentes elementos de la red de Nortegas diseñadas para gas natural que han estado en servicio durante más de 20 años y que a lo largo del desarrollo del proyecto van a ser sometidos a mezclas incrementales de Hidrógeno con Gas Natural.

El proyecto H₂SAREA se clasifica en tres áreas de estudio:

- **Red de distribución de gas natural:** la plataforma H₂LOOP está construida con los principales elementos de una red de distribución de gas natural, que han estado en servicio con gas natural durante años: tuberías de diferentes materiales y presiones de operación, válvulas, estaciones de regulación y medida, instrumentación, ...
- **Usos domésticos:** dentro del H₂LOOP se ha construido una instalación doméstica que incluye una instalación receptora, contadores domésticos (de membrana y ultrasónicos), una caldera de condensación y una cocina de gas. Toda la acometida interior se ha construido en cobre, por ser el material de construcción más habitual en este tipo de instalaciones.
- **Usos industriales:** Debido a la limitación existente para poder instalar equipos industriales dentro de la plataforma H₂SAREA, se han realizado dos casos de estudio para un horno de tratamiento térmico y para una caldera auxiliar de vapor. Los resultados teóricos obtenidos, tanto de las mezclas hidrogenadas e hidrógeno puro y su posterior comparativa con los resultados obtenidos para el metano, permitirán analizar el impacto de utilizar dichas mezclas hidrogenadas en el proceso industrial.

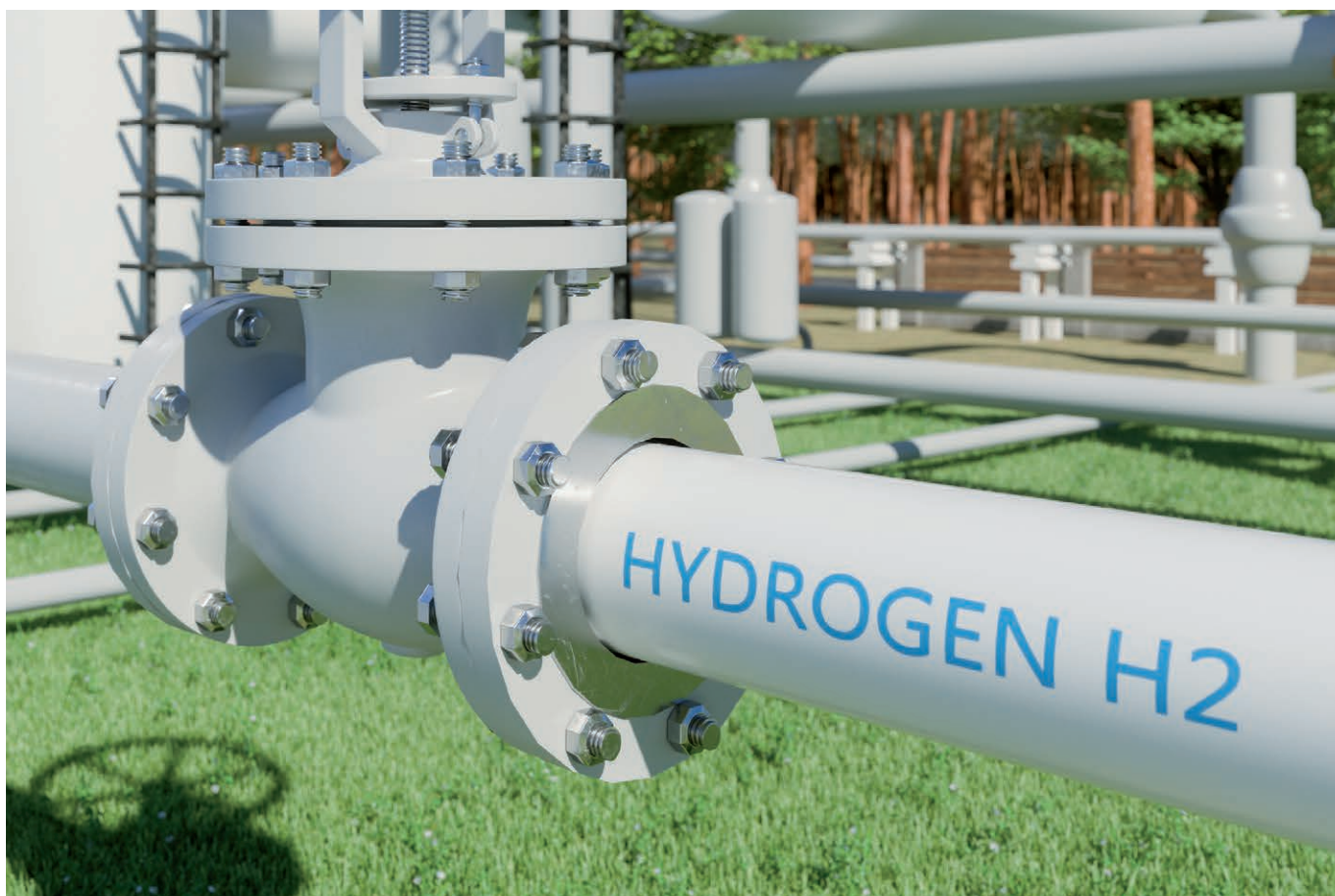


1.3 OBJETIVO

El objetivo de este informe es presentar los resultados obtenidos tras la evaluación de funcionamiento de los componentes integrados en la plataforma H₂LOOP, con mezclas de gas natural (GN) e hidrógeno (H₂) estudiados dentro del proyecto H₂SAREA al 10% de H₂, así como los dos casos de uso industrial estudiados.

A fecha actual, una vez finalizadas las pruebas del 10%, objeto de este informe, se están llevando a cabo las pruebas del 15%. Está previsto finalizar las pruebas del 20% de H₂ a finales del 2023. Estas pruebas han sido certificadas por técnicos del departamento de materiales y tecnologías de hidrógeno de TECNALIA, que, tal y como se ha indicado anteriormente, es el mayor centro de investigación aplicada y de desarrollo tecnológico de España, un referente en Europa y miembro de Basque Research and Technology Alliance.

Los casos de uso industriales han sido realizados por técnicos del Centro de la Red Vasca de Ciencia, Tecnología e Innovación y de la Federación Española de Centros Tecnológicos IKERLAN, con la colaboración de Nortegas y las propias empresas colaboradoras.



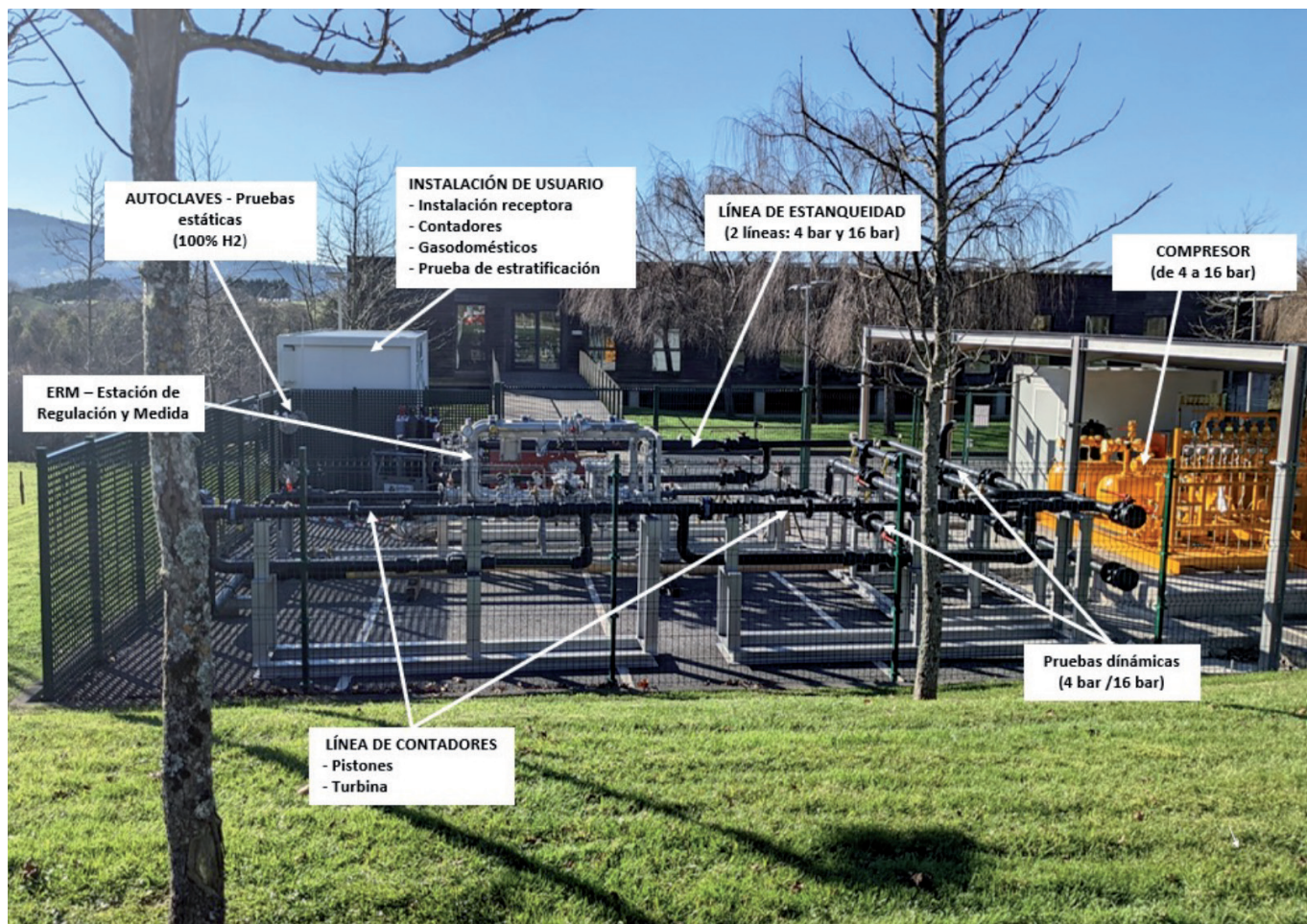
2 RESUMEN EJECUTIVO

CICLO DE PRUEBAS DE MEZCLA H₂/GN 10%

Nortegas ha finalizado con éxito la segunda fase de las pruebas del proyecto H₂SAREA, para la investigación y evaluación de materiales, componentes y sistemas, que representa la futura red de distribución de mezclas o “Blending” de hidrógeno con gas natural, mediante la plataforma de investigación H₂LOOP. Esta segunda fase se ha realizado con un 10% de mezcla de hidrógeno en gas natural, como continuación de la primera fase donde se realizaron las mismas pruebas con un 5% de mezcla.

La plataforma de investigación está construida con elementos presentes en la red de distribución de gas natural de Nortegas, que han estado durante años en servicio, con el fin de poder evaluar el impacto de la distribución de hidrógeno en Blending con el gas natural por las redes de Nortegas.

En la plataforma se encuentran representados todos los elementos que se pueden encontrar en la red de distribución de gas natural: tuberías, estaciones de regulación y medida, válvulas, etc.



En esta segunda fase se han probado los tres elementos esenciales que componen el proyecto y que son:

• La red de distribución de gas natural

- Se ha comprobado el funcionamiento de la red de distribución de gas con una mezcla del 10% hidrógeno y 90% gas natural, durante 3.000 horas.
- Se ha comprobado que la distribución de la mezcla de gases no ha generado fugas. A lo largo del ciclo de 3.000 horas de pruebas se han llevado a cabo cuatro controles en 552 puntos críticos de la plataforma H2Loop: en la estación de regulación y medida (ERM), uniones bridadas, soldaduras, picajes, válvulas, tuberías de acero, tuberías de polietileno, transiciones acero-polietileno y polietileno-cobre, receptora doméstica, contadores, acometidas interiores de cobre, reguladores de aparato, llaves de aparato, etc.
- Se ha comprobado la correcta operación de todos los equipos que forman parte tanto de la red de distribución de gas natural: válvulas de acero, válvulas de polietileno, estaciones de regulación y medida (ERM); así como de las instalaciones domésticas: armarios de regulación de vivienda, contadores, etc.

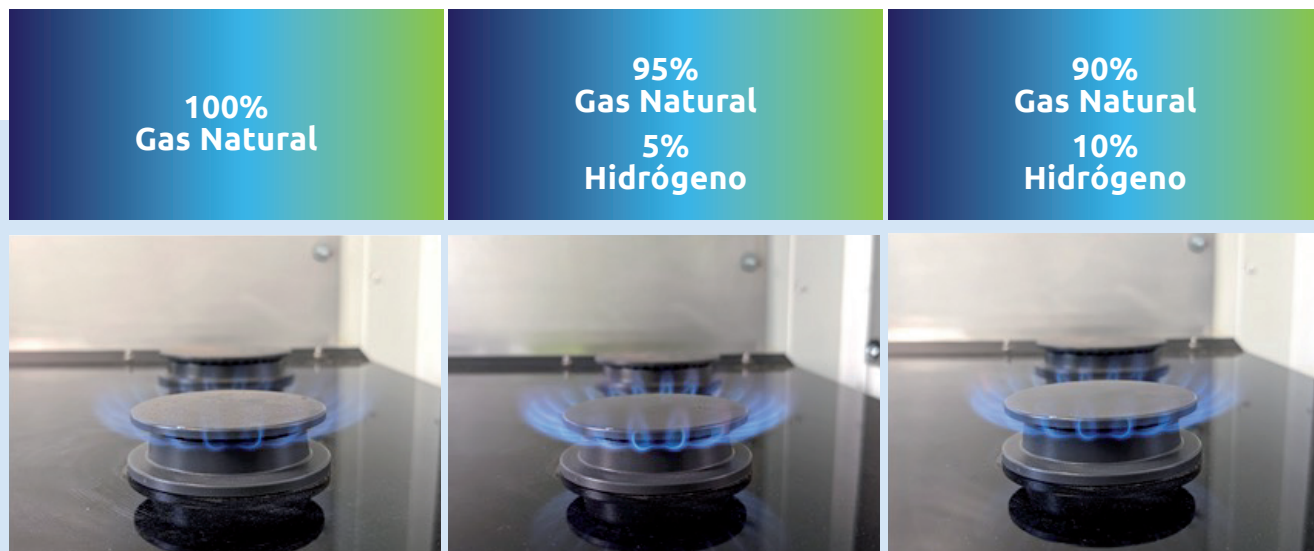
A lo largo de este segundo ciclo de pruebas de Blending al 10% de hidrógeno, no se ha detectado ninguna incidencia ni fuga, en la red de distribución de gas por la acción del hidrógeno contenido en el gas natural.

Con estos resultados se puede concluir que las redes de distribución de gas natural están preparadas para distribuir mezclas de gas natural con el 10% hidrógeno.

• Instalaciones de usuario

- Se ha testado el correcto funcionamiento de equipos gasodomésticos: caldera y cocina de gas (funcionamiento, regulación, emisiones, rendimiento, ...).
- Se ha testado el correcto funcionamiento de las instalaciones de usuario, incluyendo reguladores, medición y materiales asociados.
- Se ha realizado un exhaustivo análisis del comportamiento de la llama, sin cambios que deban ser tenidos en consideración.





A lo largo de este segundo ciclo de pruebas de Blending al 10% de hidrógeno, no se ha detectado ninguna incidencia ni fuga en las instalaciones de usuario y gasodomésticos, por la acción del hidrógeno contenido en el gas natural.

Con estos resultados se puede concluir que, en términos generales, las redes de usuario están preparadas para distribuir mezclas de gas natural con el 10% hidrógeno. Desde la perspectiva de distribución de gas natural, es fundamental entender las implicaciones que tendría la mezcla de gas natural con hidrógeno en los usuarios finales. **El resultado satisfactorio de las pruebas realizadas nos permite estar cómodos respecto a la utilización de mezclas de 10% de hidrógeno en gas natural respecto a los usuarios domésticos.** Sin embargo, existen determinados usuarios que podrían experimentar problemas: el reducido número de usuarios de la red de distribución que no pueden utilizar esta mezcla de gases (p.ej., Gasineras, dada la limitación impuesta por los fabricantes de los vehículos de gas asociada al almacenamiento del vehículo), podrían ser protegidos mediante sistemas de separación de membranas, que eliminarían el hidrógeno de su suministro. De esta forma, se puede aprovechar la posibilidad de descarbonización que ofrecen las mezclas de hidrógeno verde y gas natural sin impactar a dichos clientes. La tecnología de separación de hidrógeno y gas natural con membranas va a ponerse en marcha en las instalaciones del proyecto en las próximas semanas.

Por último, nos gustaría resaltar que tras la finalización del ciclo de pruebas de mezcla de 10% hidrógeno, **se han iniciado las pruebas de la tercera fase, comenzando un nuevo ciclo de 3.000 horas, con una mezcla del 15% hidrógeno y 85% gas natural.** Durante este tercer ciclo, se van a realizar igualmente las pruebas de ausencia de fugas y correcta operación de las instalaciones de la red de distribución e instalaciones domésticas.

• Instalaciones industriales

En la plataforma de investigación construida se ha simulado la red de distribución de Nortegas y una instalación doméstica tipo. Sin embargo, en esta plataforma no es posible representar a los consumidores industriales, dada la gran variedad y especificidad de los equipos de las instalaciones industriales.

Para poder analizar el consumo de gas natural con mezclas de hidrógeno verde en este tipo de clientes, se ha llevado a cabo el análisis de 2 casos de uso industrial:

- Caldera de Vapor, donde los gases de combustión no tienen contacto con el producto
- Horno de Tratamiento Térmico, donde los gases de combustión sí tienen contacto con el producto

Utilizando un programa de simulación CFD (Computational Fluid Dynamics), se ha simulado la combustión de diferentes mezclas de gas natural e hidrógeno modelizado el comportamiento de diferentes parámetros: temperatura, caudales, velocidades, eficiencia, emisiones, etc., en los diferentes elementos de los equipos (quemadores, cámaras de la caldera, chimenea, etc.).

La conclusión principal de los dos casos estudiados es que **es posible utilizar mezclas de hasta 30% H₂ / 70% Gas Natural sin que se produzcan incidencias en el proceso, ni daños en los equipos.**

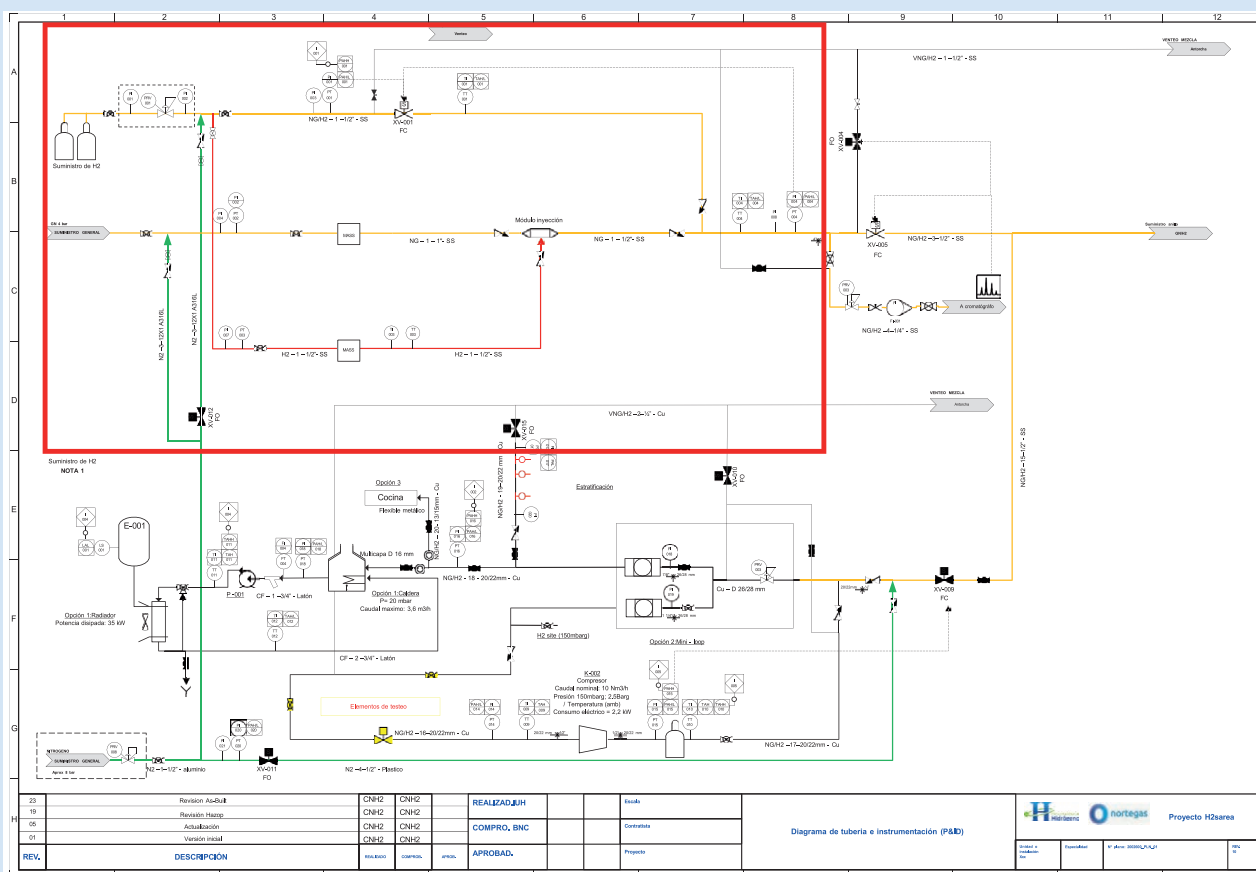
Respecto a los principales parámetros estudiados, las conclusiones han sido (válidas para ambos casos de uso)

- Para mantener la producción de vapor es necesario ajustar los caudales de los combustibles y su aireación para las diferentes mezclas de gas natural e hidrógeno.
- Hasta el 30% de H₂ no es necesario modificar los quemadores.
- La eficiencia térmica de la caldera apenas se ve impactada con mezclas de hidrógeno hasta el 30% en ambos casos de uso
- En cuanto a las emisiones:
 - Los valores de CO son despreciables para todos los casos.
 - Los valores de NO_x aumentan con el contenido de H₂, debido a la mayor temperatura de llama, si bien se mantienen dentro de los rangos permitidos (<250 mg/m³)
 - Aumenta el contenido de H₂O cuanto mayor sea el nivel de H₂ en la mezcla.
- En cuanto a la posible degradación de los componentes por impacto de la forma de la llama y de la temperatura de la misma el impacto sería bajo.
- Un aspecto a tener en cuenta en ambos casos de uso, en función de las emisiones obtenidas en las simulaciones, reside en la necesidad de actuar en el control de aireación del quemador de forma que se aumente la aireación de combustión para las diferentes mezclas hidrogenadas.

De esta forma, se logrará actuar sobre la temperatura de llama, lo cual tendrá un efecto favorable sobre la práctica totalidad de los aspectos considerados a lo largo del estudio.

• Instalaciones de red que serán necesarias para la futura inyección de hidrógeno en las actuales redes existentes de gas natural

Al inicio de este segundo ciclo de pruebas se validó y se puso en funcionamiento, tanto la acometida de gas natural, como la posición de inyección de hidrógeno, mediante tecnología de inyección directa de hidrógeno, la cual, previamente, había sido diseñado mediante simulación CFD (“Computational Fluid Dynamics”), tal y como se explica más adelante en el cuerpo del informe.



3 DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA H₂LOOP

3.1 PLATAFORMA H₂LOOP

El H₂LOOP es una plataforma de ensayos que ha sido diseñada y construida con materiales y componentes que han estado durante años en servicio y así poder evaluar el funcionamiento de componentes de la red de distribución de Nortegas.

La plataforma se ha dividido en tres zonas, en función de las condiciones de operación que se pueden encontrar en la red de distribución de gas natural actual y que se detallan en la Figura 1.

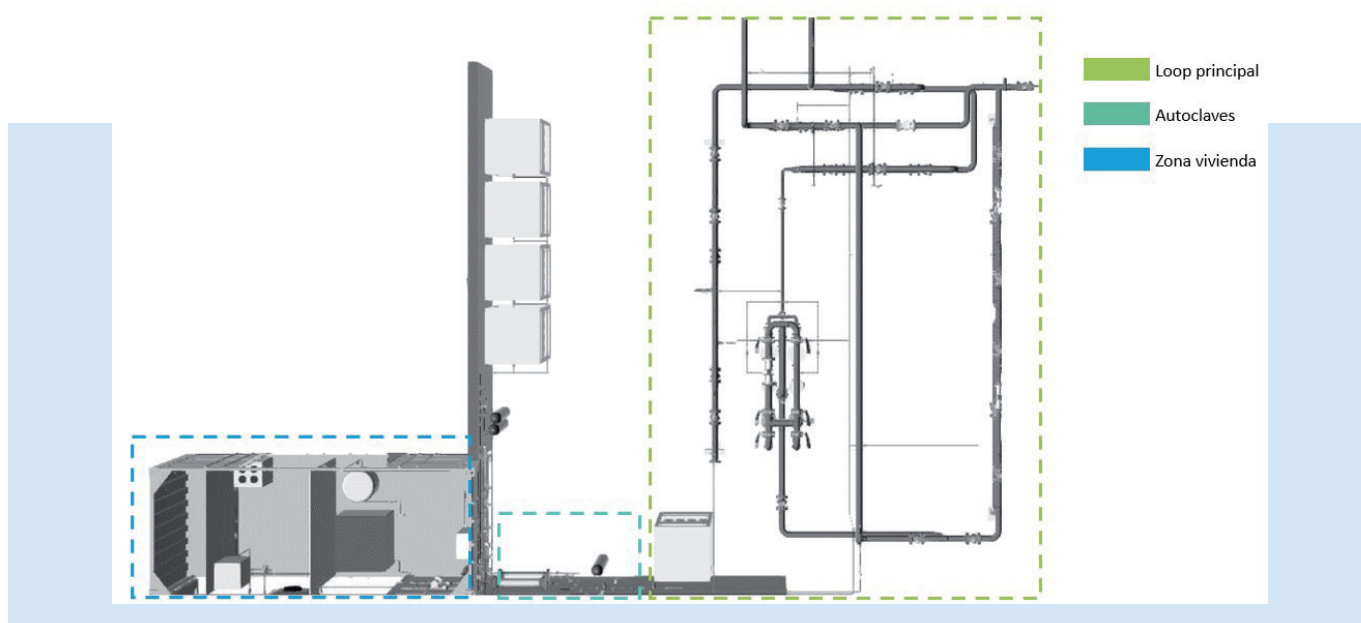


Figura 1 - Esquema de las tres zonas principales del H₂LOOP

En la Figura 2 se muestra la vista general de la plataforma H₂LOOP y se identifican las zonas principales de vivienda, autoclaves y LOOP principal.

- LOOP Principal, en el que se simulan tanto la red APA de 16 bar de acero, como la red MPB de 4 bar de Polietileno, así como una Estación de Regulación de Medida de 16bar a 4 bar.
- Mini LOOP, en el que se simula una instalación de usuario desde 2,5 bar hasta 150 mbar y el equipamiento habitual en las instalaciones receptoras comunes de usuario e instalaciones individuales, así como los aparatos gasodomésticos.

- Los autoclaves, que se diseñan, de forma específica, para poder realizar pruebas de materiales en atmósfera de hidrógeno 100%, tanto en condiciones normales, como en condiciones forzadas, que pueden simular un mayor tiempo de exposición o un nivel de estrés acelerado.
- Adicionalmente, existen otra serie de instalaciones auxiliares que permiten que todos los elementos funcionen y se garantice el funcionamiento y seguridad del sistema.

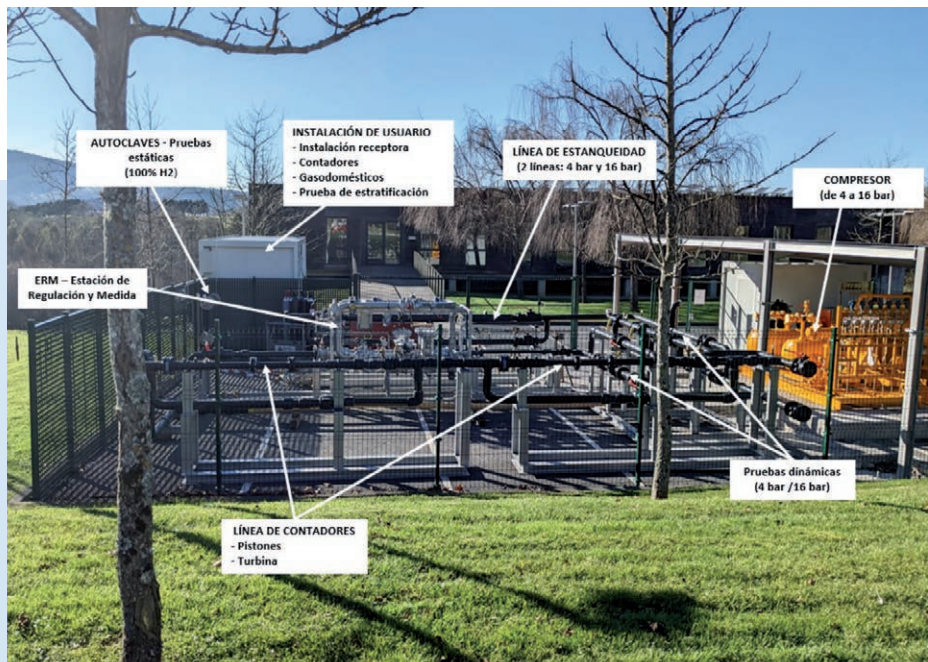


Figura 2 – Vista general de la plataforma de investigación H2LOOP

El LOOP principal se ha configurado para integrar las líneas de alta y baja presión junto con los elementos de una red de distribución de gas (Ver Figura 3). Se han diferenciado mediante color azul los componentes del LOOP principal que operan a alta presión y en verde los componentes que operan a baja presión.

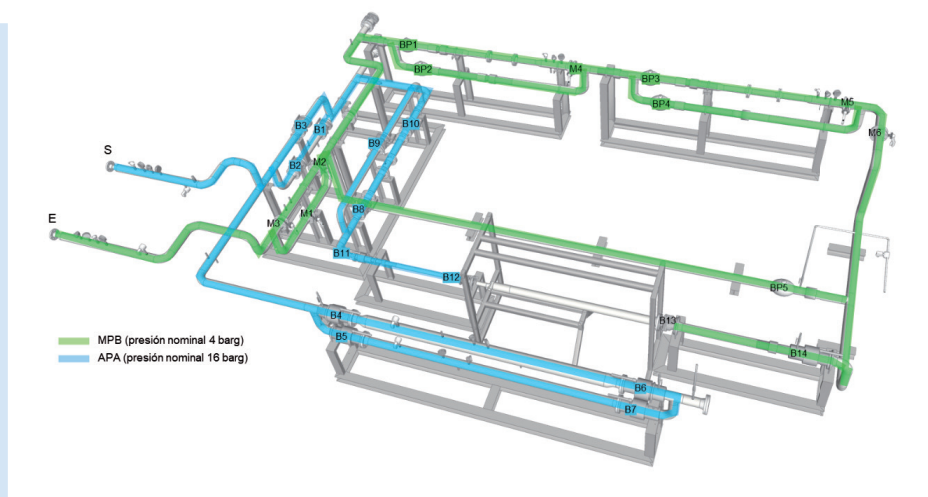
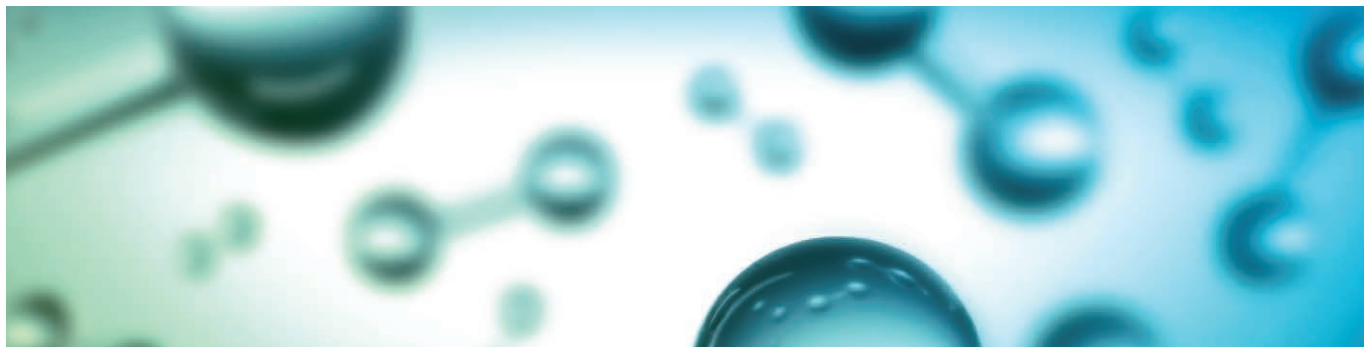


Figura 3 - Esquema de las líneas de alta y baja presión LOOP principal



3.2 COMPONENTES PRINCIPALES DEL LOOP PRINCIPAL

En cada una de las líneas de alta y baja presión se han integrado componentes de la red de distribución de Nortegas incluyendo válvulas de acero, de polietileno, juntas dieléctricas y una estación de regulación y medida (ERM). Todos los componentes utilizados han estado en servicio durante más de 20 años en gas natural.

A continuación, se detallan estos componentes para ambas líneas de alta y baja presión (APA y MPB respectivamente).

3.2.1 LÍNEA DE ALTA PRESIÓN (16 BAR)

Esta línea se ha construido utilizando tubería de acero API5L grado B con diferentes accesorios como codos, reducciones y transiciones. Los tramos de tuberías y accesorios de acero se han unido mediante soldadura y las uniones entre tubería y válvulas se han realizado mediante uniones embridadas. A continuación, se detallan los componentes principales incluidos en la línea de 16 bar.

- **Válvulas de bola de acero:**

- Se han integrado 12 válvulas de bola de acero en la línea de alta presión con las siguientes referencias: B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B10, B11, B12.
- En la Figura 4 y Figura 5 se muestran algunas válvulas de bola integradas en la línea de 16 bar.

- **Junta dieléctrica en la entrada de la ERM:**

- Las juntas dieléctricas se utilizan en la red de distribución para aislar eléctricamente la estación de regulación de medida (ERM) – que se encuentra en la superficie de las tuberías – y las válvulas que se encuentran enterradas y protegidas frente a la corrosión mediante protección catódica (ver Figura 6).



Figura 4 - Válvulas de bola de acero en la línea de alta presión (referencias B1, B2 y B3)



Figura 5 - Válvula de bola de acero a la entrada de la ERM (referencia B12)



Figura 6 - Junta dieléctrica a la entrada de la ERM (línea 16 bar)

3.2.2 LÍNEA DE BAJA PRESIÓN (4 BAR)

Esta línea se ha construido utilizando tubería de acero API5L grado B con diferentes accesorios como codos, reducciones, transiciones. Los accesorios y tuberías se han unido mediante soldadura y en algunos tramos se ha empleado tubería de polietileno PE100 y polietileno PE80. En la línea de contadores se han instalado contadores de turbina y de pistones. Los accesorios y tuberías no metálicos se han unido mediante casquillos de termofusión. A continuación, se detallan los componentes principales incluidos en la línea de 4 bar.

- **Válvulas mariposa de acero:**

Se han integrado 6 válvulas de mariposa de acero en la línea de baja presión con las siguientes referencias: M1, M2, M3, M4, M5, M6.

En la Figura 7 se muestran algunas válvulas de mariposa integradas en la línea de 4 bar.

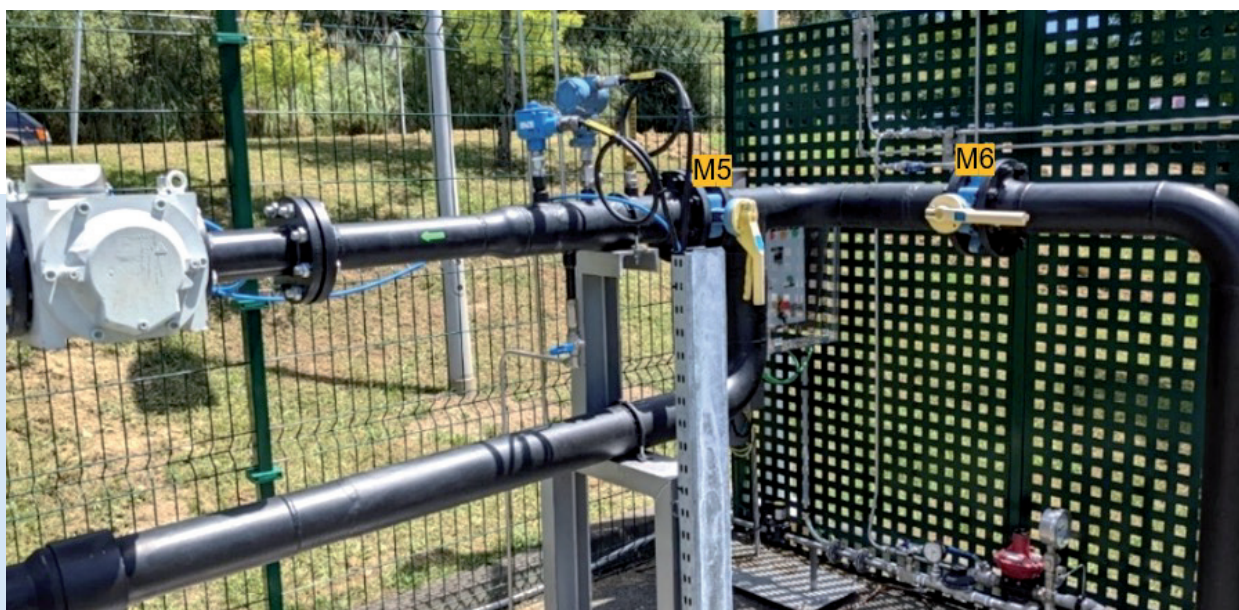


Figura 7 - Válvulas de mariposa de acero en la línea de baja presión (referencias M5 y M6)

- **Válvulas de bola de acero:**

- Se han integrado 2 válvulas de bola de acero en la línea de baja presión con las siguientes referencias: B13, B14.

- **Junta dieléctrica en la salida de la ERM:**

- La junta dieléctrica a la salida de la ERM se muestra en la Figura 8 y su función consiste en aislar eléctricamente la ERM de las tuberías y válvulas que se encuentran enterrada y protegidas frente a la corrosión mediante protección catódica.

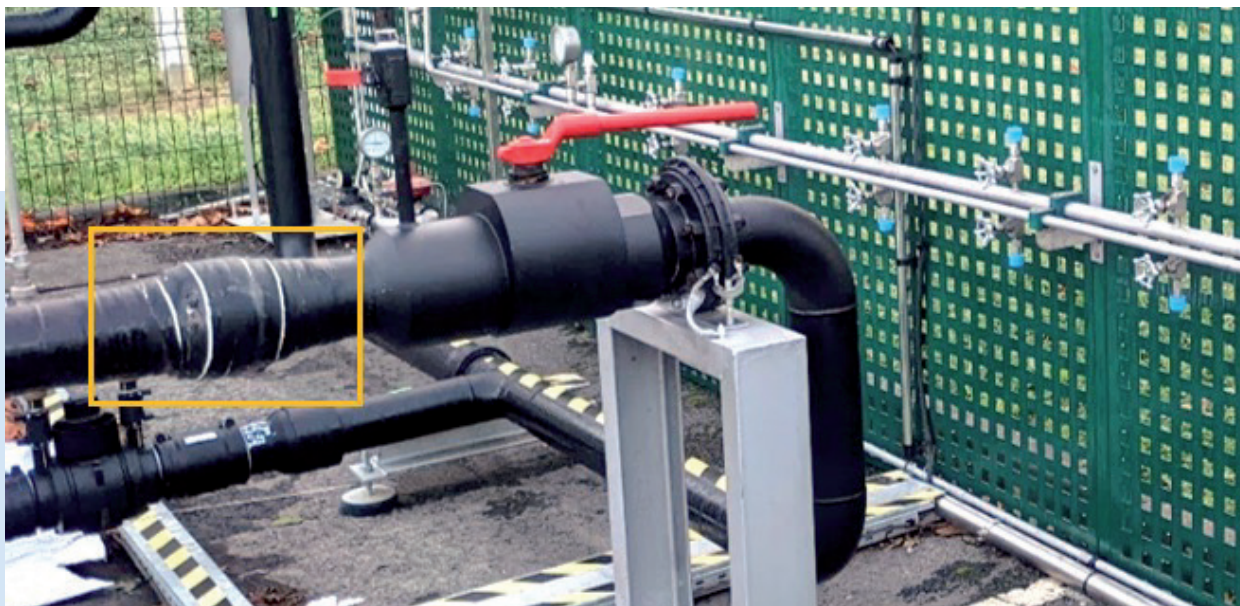


Figura 8 - Junta dieléctrica a la salida de la ERM (línea 4 bar)

• **Válvulas de bola de polietileno:**

- Se han integrado 5 válvulas de bola de polietileno en la línea de baja presión con las siguientes referencias: BP1, BP2, BP3, BP4, BP5.
- En la Figura 9 se muestran algunas válvulas de polietileno integradas en la línea de 4 bar.

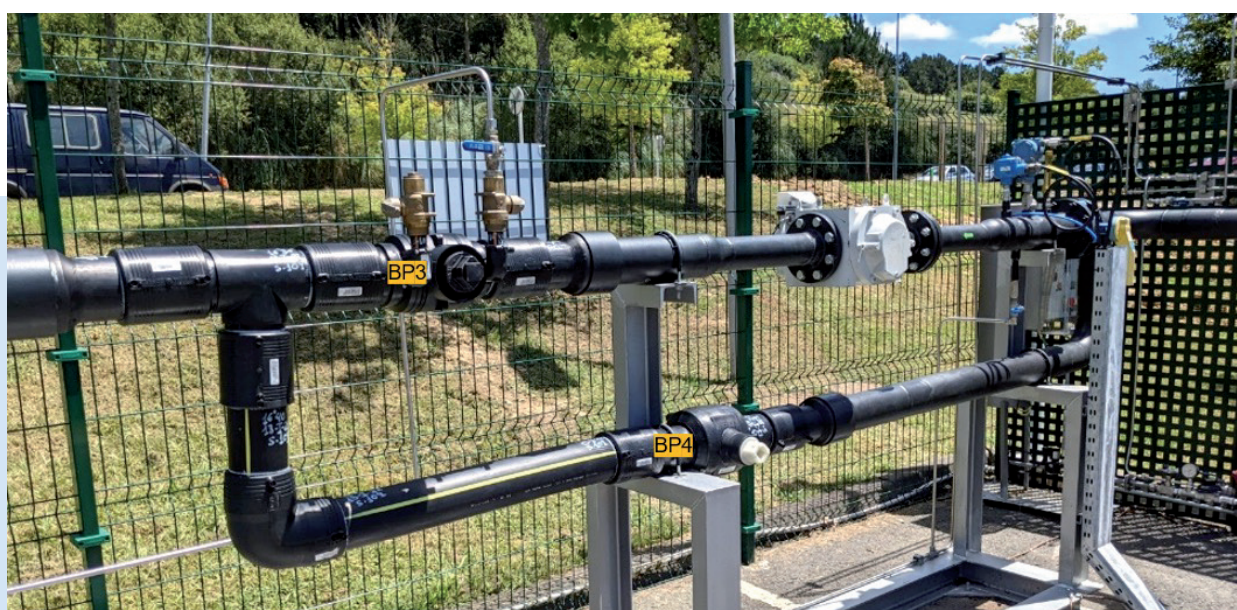


Figura 9 - Válvula de bola de polietileno en la línea de baja presión (referencias BP3 y BP4)

- **Estación de Regulación y Medida (ERM):**

- La ERM está compuesta por dos líneas de regulación con bypass de medida y que se encuentra entre la línea de alta y baja presión.
- La función de la ERM consiste en reducir la presión de entrada de 16 bar a 4 bar.
- En la figura 10 se puede ver la ERM que está montada en el H₂LOOP y que ha estado en funcionamiento más de 20 años en el Municipio de Zumaia en el País Vasco (Ver Figura 10).



Figura 10 - Estación de Regulación y Medida (ERM)

3.3 COMPONENTES PRINCIPALES INSTALACIÓN DOMÉSTICA

En la zona de instalación doméstica se ha instalado un armario de regulación, contadores de gas de membranas G4 y G6, contadores inteligentes ultrasónicos y de membrana, cocina de gas, caldera de gas a condensación, tuberías de cobre soldadas (Figura 11 y 12), como se instalarían en una vivienda habitual.



Figura 11 - Armario de regulación de vivienda (izq.) y contadores (dcha.)

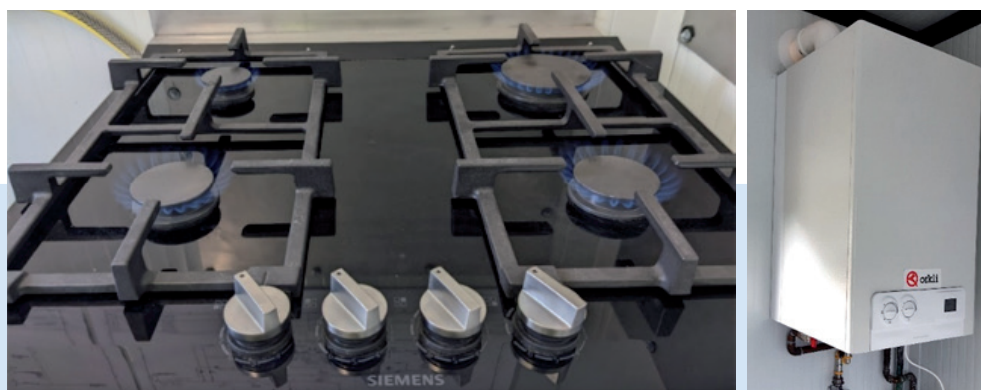


Figura 12 - Cocina de gas (izq.) y caldera de gas (dcha.)

4 CASOS DE ESTUDIO INDUSTRIALES

Los consumos de gas natural en la industria son muy heterogéneos, por lo que no es posible estudiarlos de forma conjunta. Por ello, se han seleccionado dos casos de uso industrial: una caldera de vapor, donde los gases de combustión no entran en contacto con el elemento a calentar; y un horno de tratamiento térmico, en el que existe contacto directo de los gases con la carga.

Para el estudio de los casos industriales se ha llevado a cabo un proceso de simulación CFD ("Computational fluid dynamics") de los equipos y componentes. Para ello se han dado los siguientes pasos:

1. Definición de geometría (CAD) y condiciones operativas: cuanta más información se tenga sobre dimensiones, materiales y operación del sistema, más precisa podrá ser la simulación.
2. Generación de mallado: discretización/subdivisión del dominio.
3. Cálculo: Elección de modelos y métodos numéricos (Navier-Stokes, combustión, radiación, cinética química, NOx, etc.) y resolución del flujo (estacionaria o transitoria).
4. Postproceso y análisis de los resultados: a través de datos numéricos o visualmente.
5. Validación y verificación de las simulaciones: con los datos de referencia del gas natural.
6. Análisis del impacto de las mezclas hidrogenadas/H₂ puro: comparación relativa al metano.

En cada uno de los estudios se han obtenido los siguientes resultados:

- Presiones, densidades y velocidades operativas.
- Temperaturas tanto de los fluidos como de los sólidos/componentes.
- Radiación.
- Especies químicas (concentraciones molares de productos de combustión y contaminantes, entalpía, calor de reacción, humedad relativa).
- Flujos y pérdidas de calor a través de las superficies.
- Visualizaciones y gráficos (contornos, mapas vectoriales, líneas de dirección, etc.) de las diferentes variables.
- Vídeos en el caso de simulaciones transitorias.

4.1 HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO

El horno de tratamiento térmico es un equipo de calentamiento directo y donde ocurre el mayor consumo de gas. Este equipo está compuesto por un quemador, un ventilador, cámara de calentamiento, cámara de recirculación, rodillos y aislamiento.

En el estudio también se ha analizado la carga y su calentamiento con las diferentes mezclas de gases H_2 -GN.

En la Figura 13 se muestra la vista de mallado del horno utilizado en la simulación CFD con 2,5 millones de celdas.

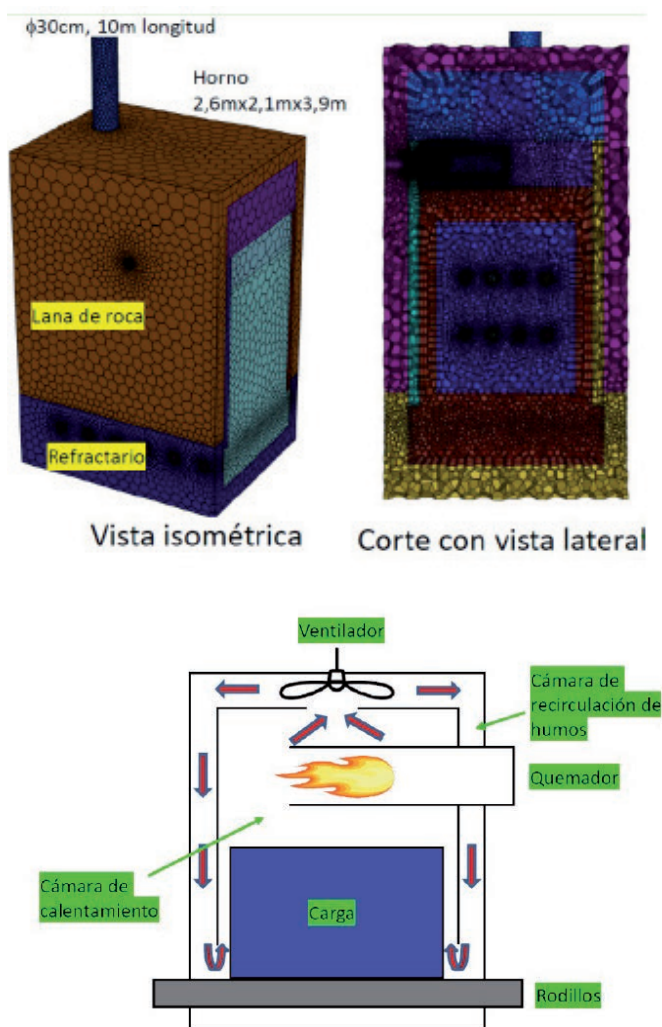


Figura 13 - Vista de mallado de la simulación CFD

4.2 CALDERA DE VAPOR AUXILIAR

La caldera auxiliar de vapor es un equipo de calentamiento indirecto donde el material de proceso no entra en contacto con la llama. Este equipo está compuesto por el quemador, el hogar, 2º y 3er haz de tubos, cámara de inversión, chimenea y aislamientos.



En la Figura 14 se muestra la vista de componentes contemplados en la simulación CFD (8,3 millones de celdas).

Aprovechando la simetría de la caldera se modela la mitad de la geometría de esta.

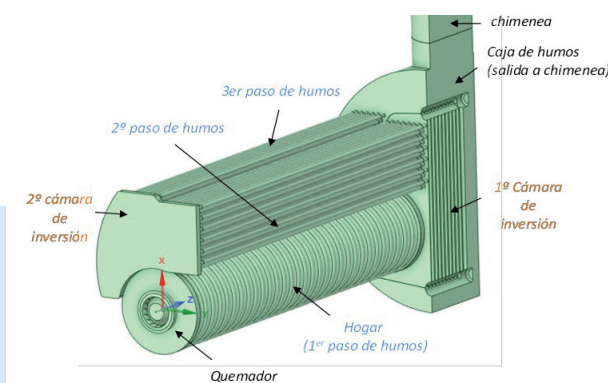


Figura 14 – Vista de componentes contemplados para la simulación CFD



5 PLAN DE PRUEBAS DEL H2LOOP

Se ha establecido un plan de pruebas para la primera fase que se está llevando a cabo para cada una de las mezclas durante el transcurso del proyecto H₂SAREA.

Se han definido cuatro tipos de mezclas:

- Mezcla Metano 95% vol. + 5% vol. Hidrógeno.
- Mezcla Gas Natural (red) 90% vol. + 10% vol. Hidrógeno.
- Mezcla Gas Natural (red) 85% vol. + 15% vol. Hidrógeno.
- Mezcla Gas Natural (red) 80% vol. + 20% vol. Hidrógeno.

Tanto el LOOP principal como la instalación de usuario operarán durante 3.000 horas con cada una de las mezclas y para las cuales se han definido tres tipos de pruebas que se realizarán de manera periódica.

5.1 PRUEBAS DE FUGAS

5.1.1 OBJETIVO

El objetivo de esta prueba es evaluar si durante el periodo de operación se producen fugas o mal funcionamiento en algún elemento del LOOP principal e instalación de usuario. Para ello se han identificado 552 puntos potenciales de fuga clasificados en 13 zonas que se muestran en la Figura 15 y en la Tabla 1.

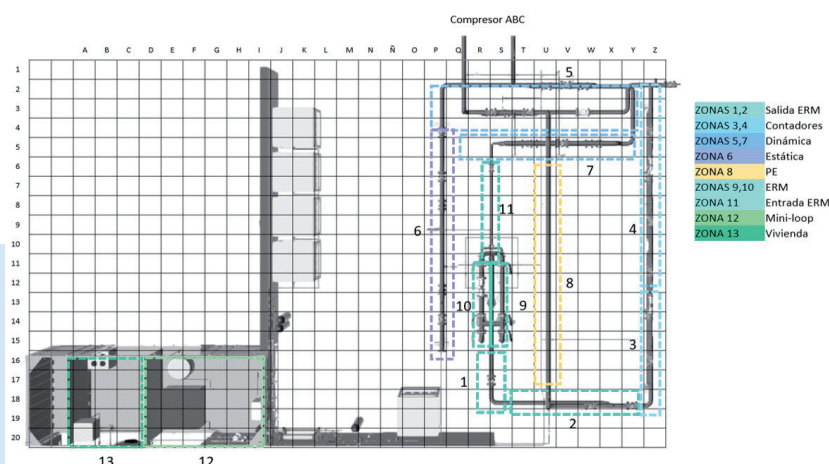


Figura 15 - Clasificación de zonas de los puntos potenciales de fuga.

	Unión brida	Soldadura	Junta eléctrica	Picaje	Válvula	Contador	Antirretorno	Codo	Filtro	Regulador	Otros elementos
Zona 1	9	11	1	1	2						
Zona 2	17	21		7	4	1					1
Zona 3	16	14		6	3	1					
Zona 4	22	35		9	4		1				
Zona 5	19	29		22	4						
Zona 6	20	19		3	4						
Zona 7	29	31	1	3	4						
Zona 8	6	3		1	2			1			1
Zona 9	9	23		7	8				1	2	
Zona 10	8	22		7	8	1			1	2	
Zona 11	2	4		3	1						
Zona 12	6			9	6		1	15			
Zona 13	4	1		2	3			5		2	1

5.1.2 PROCEDIMIENTO

La técnica seleccionada y empleada para la detección de fugas en la plataforma H₂LOOP es la recogida en la norma EN 1593:1999: Ensayo no destructivos. Ensayo de fugas. Técnica demisión de burbujas.

La técnica se basa en la aplicación de un líquido que genere una película continua sobre la superficie a ensayar. La técnica consiste en establecer una diferencia de presión a través de la pared del objeto y la observación de la formación de burbujas en un medio líquido situado en el lado de baja presión. La tasa mínima de fuga detectable mediante esta técnica depende de la diferencia de presión, el gas y el líquido utilizados para la prueba.

El procedimiento detallado de trabajo está recogido en los archivos de proyecto.

5.1.3 PERIODICIDAD

Se establece que se realice una inspección de fugas cada 750 horas de funcionamiento en cada una de las mezclas.

5.1.4 REGISTRO DE RESULTADOS

Los resultados de cada una de las inspecciones se recogen en unas fichas diseñadas al efecto y recogidas en el procedimiento. En esta plantilla se registran las fugas detectadas del H₂LOOP, así como en los puntos de conexión a las líneas de purga y venteo.

5.2 PRUEBAS DE VÁLVULAS

5.2.1 OBJETIVO

El objetivo de la prueba de válvulas es evaluar si cada tipo de válvula integrada en la plataforma presenta algún problema en su funcionamiento al operar con una mezcla de gases con presencia de hidrógeno. Las válvulas testeadas se muestran en la Figura 16.

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7	Prueba 8
Válvulas	BP1, M4	BP2-B3,4	BP3-M5	BP4-M6	M2-M3	B1-B2	B4-B6	B5-B7

B: VÁLVULA DE BOLA / BP: VÁLVULA DE BOLA PE / M: VÁLVULA DE MARIPOSA

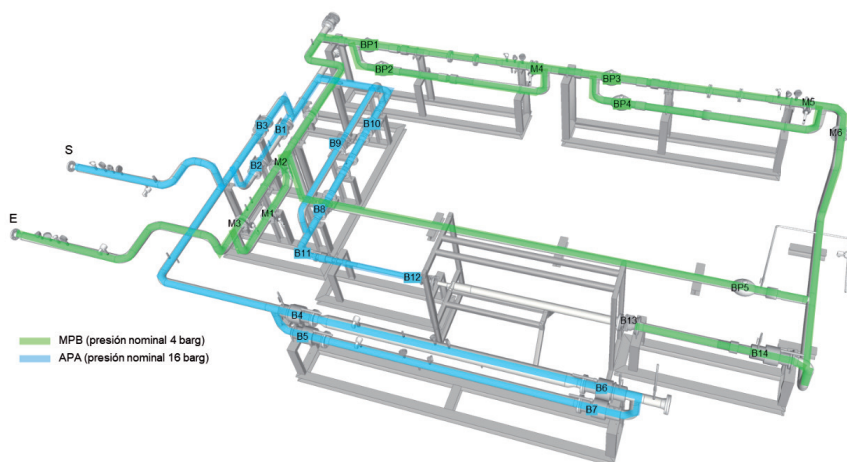


Figura 16 - Válvulas integradas y testeadas en la plataforma H2Loop

5.2.2 PROCEDIMIENTO

El procedimiento detallado para la realización de las pruebas de válvulas del LOOP principal está recogido en los archivos de proyecto.

5.2.3 PERIODICIDAD

Se establece la realización de una prueba de válvulas al final de cada periodo de 3.000 horas de funcionamiento con la mezcla correspondiente.

5.2.4 REGISTRO DE RESULTADOS

Los resultados de cada una de las pruebas de válvulas se registran en las fichas diseñadas al efecto, que se recogen en el procedimiento.

5.3 PRUEBA DE ESTACIÓN DE REGULACIÓN Y MEDIDA (ERM)

5.3.1 OBJETIVO

El objetivo de esta prueba consiste en comprobar que los diferentes elementos y dispositivos de seguridad que componen la ERM funcionan correctamente (ver Figura 17). Se revisa la degradación de los filtros y que el resto de los elementos cumple su funcionalidad para que la ERM regule la presión de gas dentro de los límites establecidos.



Figura 17 - Componentes de la ERM

Los elementos que componen la ERM y que se muestran en la Figura 17 se describen a continuación:

- **Filtro:** limpia el gas de posibles impurezas sólidas que pudiesen existir e incluye un manómetro diferencial que indica el estado y medida de suciedad del filtro.
- **Regulador monitor:** su función es asegurar automáticamente una presión de salida constante, ligeramente superior a la normal en caso de fallo del regulador principal.
- **VIS:** corresponde a la válvula de interrupción de seguridad cuya función es interrumpir la circulación del gas cuando la presión de salida del regulador alcanza los valores preestablecidos tanto de presión máxima como de mínima.
- **Regulador principal:** su función es reducir la presión de entrada del gas a la ERM y estabilizarla a valores previamente establecidos, permitiendo el buen funcionamiento de los equipos situados aguas abajo de la ERM.

5.2.2 PROCEDIMIENTO

El procedimiento corresponde al que se lleva a cabo por los técnicos de mantenimiento de Norte-gas según el procedimiento recogido en los archivos de proyecto.

5.3.3 PERIODICIDAD

Se contempla una revisión al final de cada periodo de 3.000 horas de funcionamiento con la mezcla correspondiente para comprobar los componentes y dispositivos de seguridad de la ERM.

5.3.4 REGISTRO DE RESULTADOS

Los resultados de cada inspección se registran en la ficha diseñada al efecto y que se incluye en el procedimiento en la que se incluyen detalles de la inspección de los elementos y dispositivos de seguridad de la ERM.

5.4 PRUEBAS DE EQUIPOS PRESENTES EN INSTALACIONES DE USUARIO

5.4.1 CONTADORES

Se están realizando pruebas con contadores inteligentes ultrasónicos y de membrana en colaboración con un fabricante de contadores (Ver Figura 18) donde se está evaluando el funcionamiento de los contadores a diferentes rangos de medida y con diferentes niveles de Blending.

Las pruebas se están llevando a cabo en remoto por el mencionado fabricante de contadores y de acuerdo con la periodicidad que ha sido establecida por el fabricante.

Adicionalmente a las pruebas realizadas en remoto, se realizan una serie de sesiones en campo y sesiones de trabajo en las que se comparten los resultados.



Figura 18 - Línea contadores inteligentes ultrasónicos (arriba) y de membrana (abajo)

5.4.2 GASODOMÉSTICOS

Mediante estas pruebas, se va a evaluar el correcto funcionamiento de la cocina y la caldera, así como el rendimiento, composición de humos y consumos para los diferentes niveles de Blending.

Hasta la fecha se ha evaluado el correcto funcionamiento de la caldera y la cocina para las mezclas de 5% y 10% de H₂ (Ver Figura 19 correspondiente a las pruebas realizadas en la cocina de gas).

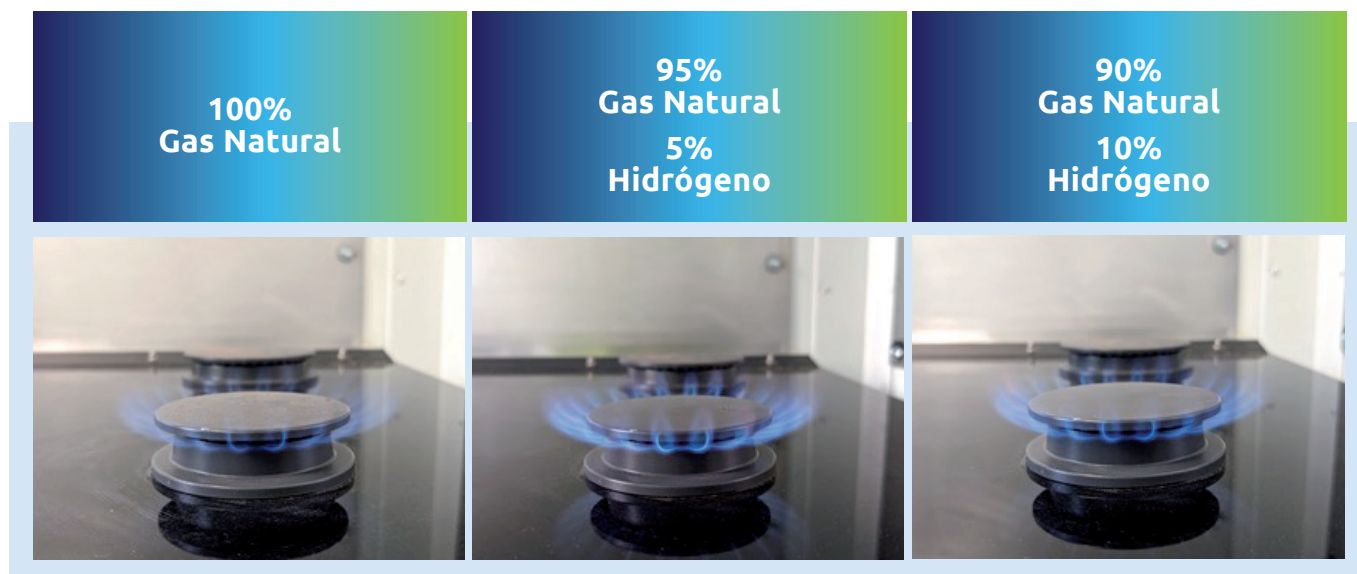


Figura 19 - Imágenes de llama en la cocina de gas con 100% GN y mezclas de GN-H₂

5.5 PRUEBA DE MATERIALES EN AUTOCLAVES

De cara a la validación de los diferentes materiales presentes en la red de distribución para su trabajo con hidrógeno, se han realizado ensayos acelerados en unos autoclaves diseñados para operar a 16 bar y con 100% Hidrógeno.

En la plataforma H₂Loop se trabaja en dos zonas: por un lado, las pruebas con mezclas de GN e hidrógeno, inicialmente hasta el 20%, que se realizan en el “LOOP principal” y se han descrito en los capítulos anteriores. Por otro lado, las pruebas con Hidrógeno 100%, que se realizan en la zona de “Autoclaves”, y se describen en este capítulo.

Dentro de las actividades del proyecto se han realizado las siguientes actividades:

- Identificación de los materiales que existen dentro de la red de distribución de Nortegas
- Identificación de los principales mecanismos de degradación que pueden sufrir y los de ensayos necesarios para caracterizar dichos mecanismos
- Evaluación del comportamiento de los materiales de la red de distribución en contacto con hidrógeno

De acuerdo con la bibliografía analizada, no se aprecia incompatibilidad con el 99% de los materiales utilizados por Nortegas (es decir, acero y polietileno) con presencia de hidrógeno hasta porcentajes de aproximadamente un 25% de H₂ en la mezcla H₂ +GN.

Respecto a la red de fundición, que tan sólo supone un 1% de las redes utilizadas por Nortegas, actualmente se está en proceso de sustituir el 100% de dicha red por polietileno para 2030, por lo que no se considera un problema.

5.5.1 ENSAYOS DE EVALUACIÓN DE COMPATIBILIDAD

El objetivo del estudio de compatibilidad de los materiales es el de conocer si las principales propiedades de los materiales se modifican al estar en contacto con hidrógeno.

El estudio de compatibilidad de los materiales se lleva a cabo mediante ensayos estandarizados empleando probetas extraídas de los componentes de la red de Nortegas.

En primer lugar, se realiza la caracterización de los materiales en estado de recepción (AR), siendo las propiedades obtenidas la referencia para poder evaluar si los materiales han sufrido algún tipo de variación en las propiedades obtenidas.

Se mecanizan probetas de los materiales, tanto para su caracterización en estado de recepción, como para ser expuestas a condiciones de prueba:

- 100% H₂ y Presión 16 bar.
- 100% H₂: 1.000 horas.

Tras la exposición al hidrógeno, se lleva a cabo la caracterización de las probetas expuestas y se comparan los resultados obtenidos con las propiedades de los materiales en estado de recepción.

• Composición química

- Se realiza el análisis de la composición química de los aceros de los que no se conozca la aleación. El análisis se realiza en los materiales en estado de recepción mediante la técnica de espectrometría de emisión óptica

• Contenido de Hidrógeno

- Se determina el contenido de hidrógeno mediante conductividad térmica por fusión en gas inerte /detección infrarroja. El equipo para el análisis ha sido el analizador LECO TCH-600.
- Se ha analizado el contenido de hidrógeno en muestras metálicas en estado de recepción y tras la exposición a hidrógeno y/o mezclas.
- Metodología: para la determinación del contenido de hidrógeno tras la exposición a hidrógeno de las muestras, se han preparado muestras cilíndricas de diámetro 3 mm y longitud 10 mm y se han expuesto a hidrógeno. Tras la exposición se han introducido en nitrógeno líquido y se han extraído de éste inmediatamente antes del ensayo.

• Fragilización por hidrógeno

- Para evaluar la susceptibilidad de los materiales a la fragilización por hidrógeno se ha establecido un método interno y criterio basado en diversas normas.

- El procedimiento se basa en determinar la estricción del material a partir de un ensayo de tracción a baja velocidad de deformación.
- Los ensayos de tracción se han llevado a cabo según norma EN ISO 6892-1 aplicando una velocidad de deformación inferior a 0.0003s⁻¹ hasta rotura.
- Se han mecanizado lotes de mínimo dos probetas de tracción de cada componente. El primer lote se ensaya y se determina el valor de estricción medio: Z₁.
- El segundo lote de probetas se expone en la atmósfera de 1.000 h de exposición en hidrógeno puro. Las probetas tras la exposición se almacenan en nitrógeno líquido.
- Mediante ensayo de tracción a baja velocidad de deformación se determina el valor medio de la estricción tras la exposición Z₂.
- Una vez determinados los valores Z₁ y Z₂ se calcula el ratio Z₂/Z₁ y se aplica el siguiente criterio: Si Z₂/Z₁ > 0,85, el material se considera que no ha sufrido fragilización por hidrógeno.
- **Caracterización microestructural y micro durezas**
 - Se prepara una probeta metalográfica de una sección transversal del tubo en el caso de referencias sin soldadura y de una sección transversal al cordón de soldadura en el caso de referencias con soldadura.
 - La preparación de las probetas metalográficas se realiza según procedimiento interno de Tecnalia.
 - Una vez preparadas las probetas, se analizan mediante microscopía óptica y se realizan micrografías representativas de las principales observaciones que se lleven a cabo. (Microestructura, presencia de defectos, etc.).
 - Se realiza medida de micro durezas según EN ISO 6507-1 para las probetas sin soldadura y según ISO 9015-2 para las probetas con soldadura.
 - Normas: UNE-EN ISO 6507-1: 2018, UNE-EN ISO 9015-2: 2016
- **Ensayo compression set y medida de espesores.**
 - En el ensayo de compresión se evalúa la deformación remanente que presentan las juntas tras retirar una fuerza de compresión.
 - Se evalúa si las juntas expuestas a hidrógeno sufren modificación de la capacidad de deformación.
 - Para ello se lleva a cabo el ensayo según la norma UNE EN ISO815 sobre las juntas.

Las condiciones de ensayo establecidos son:

- Mantenimiento de carga: 24 horas.
- Temperatura: 23°C.
- Porcentaje de compresión: 25%.

El espesor de las muestras antes y después del ensayo se determina según el método descrito en la norma ISO 23529.

Normas: ISO 815-1: 2019 y UNE-ISO 23529: 2020

En resumen, el método de evaluación contempla los siguientes pasos.

1. Preparación de probetas, de diferentes geometrías en función de la normativa que aplique, de cada componente/material.
2. Caracterización de materiales estado de recepción.
3. Exposición de probetas a mezclas 100% H₂
4. Caracterización de materiales tras la exposición.

Se han realizado cuatro campañas de pruebas en los autoclaves, de los cuales de tres se disponen ya los resultados detallados, que se incluyen en el Anexo 2 y el cuarto está en proceso analítico, tras la exposición a 100% hidrógeno.

Los resultados han sido plenamente satisfactorios, tal y como se muestra en el Anexo.

En algún caso, como el de una junta de caucho NBR, que ha sido expuesta en condiciones de exposición directa, diferentes a las operativas de la junta, la prueba ha resultado no concluyente y va a repetirse en sus condiciones de operación. Una vez se repita la prueba, se podrán obtener resultados concluyentes.



6 DISEÑO Y EVALUACIÓN DE LA POSICIÓN DE INYECCIÓN DE H₂

Una de las tareas incluidas en el desarrollo del proyecto era el diseño, construcción y pruebas de la posición de inyección de hidrógeno, de cara a poder realizar las mezclas de hidrógeno y gas natural de forma automática partiendo de dos corrientes, una de gas natural y otra de hidrógeno.

Los módulos comerciales existentes realizan una mezcla de gases y homogeneización de acuerdo con los parámetros que la normativa establece, para su posterior inyección en la red de gas existente.

A este respecto, la primera tarea realizada en el proyecto fue un estudio del estado del arte que nos permitiera ver los elementos comerciales existentes en el mercado para este tipo de posiciones de inyección de hidrógeno.

Como conclusión de esa primera tarea se decidió optar por un enfoque de diseño un poco rupturista con lo que hasta el momento era lo más abundante en el mercado y diseñar una posición en base a la tecnología de inyección directa, frente a la utilización de mezcladores u otro tipo de artilugios que introducidos en la tubería provocaran una turbulencia para forzar la mezcla. Nos parecía que no estaba suficientemente explorada, por un lado, y, por otro, nos parecía la forma más sencilla de abordar el problema, siempre y cuando las distancias en las que la mezcla estuviera homogeneizada después de la inyección fueran razonables.

Y, desde esa perspectiva se aborda la primera fase consistente en un estudio teórico con la tecnología CFD para, de una forma teórica, comprobar la viabilidad de una solución de esta naturaleza.

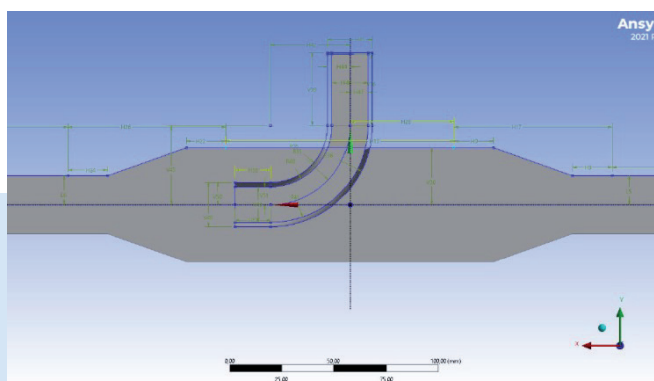
El CFD "Computational Fluid Dynamics" es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de fluidos.

Se utilizan potentes ordenadores y sistemas de almacenamiento en la nube para realizar los millones de cálculos necesarios para simular la interacción de los líquidos y los gases con superficies complejas proyectadas por la ingeniería, mediante la cual se discretiza una región del espacio creando lo que se conoce por una malla espacial y dividiendo una región del espacio en pequeños volúmenes de control.

Después se resuelve, en cada uno de ellos, las ecuaciones de conservación discretizadas, de forma que, en realidad, se resuelve una matriz algebraica en cada celda de forma iterativa hasta que el residuo es suficientemente pequeño.

Como resumen del trabajo se ha realizado:

- **Modelización de la geometría del módulo de inyección, en base al siguiente modelo**



- **Optimización de la geometría del módulo de inyección** definiendo las dimensiones optimas siguientes:

Posición inyector (mm)	Longitud ensanchamiento (mm)	Longitud salida inyector (mm)
20,2	149,1	42,2

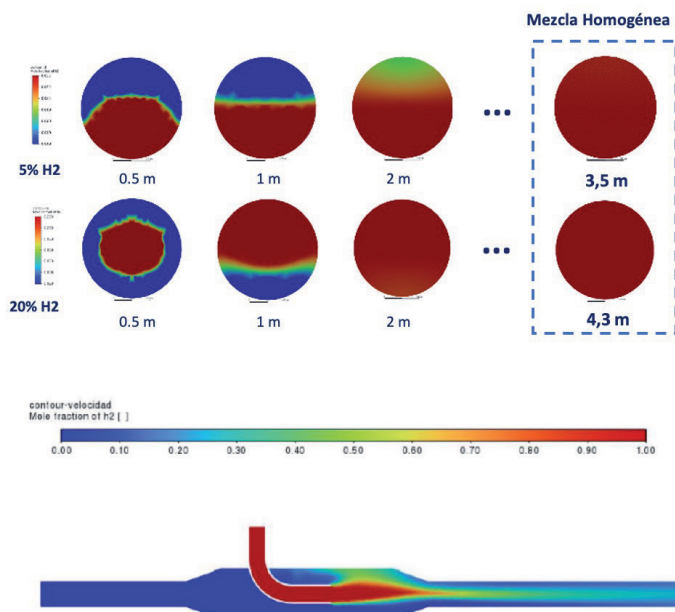
Tabla 5. Dimensiones de diseño optimizadas

Esta optimización se ha realizado usando las herramientas disponibles en el entorno de simulación del ANSYS Workbench junto con ANSYS-Fluent usando técnicas de DOE, Superficies de Respuesta y Optimización junto con simulaciones CFD del modelo simplificado para la mezcla del GN-20%.

- Una vez optimizada la geometría se ha realizado el **estudio de la mezcla de GN-H₂** para los siguientes porcentajes de mezcla, 5%, 10%, 20% y 30% para el modelo completo de la tubería de 10m. Dando como resultado que para todas las situaciones analizadas para un caudal de mezcla de 15Nm³/h trabajando a una presión de 3,5bar la mezcla alcanza una uniformidad objetivo del 99,995% entre los 3,47 m y 4,3 m tal y como se puede ver en la Tabla 5.

U-Index Objetivo	GN-5%H ₂	GN-10%H ₂	GN-20%H ₂	GN-30%H ₂
99,995 %	4,29 m	3,48 m	3,47 m	4 m

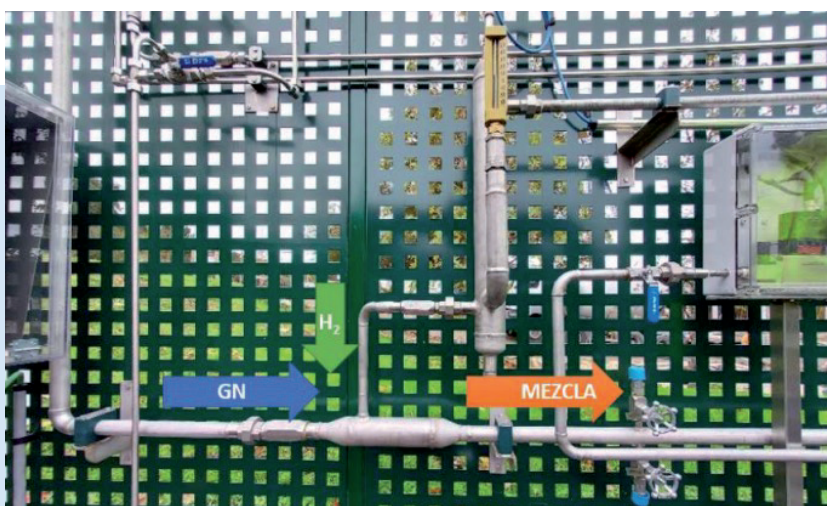
Tabla 6. resumen de la distancia a la que se obtiene el U-Index objetivo



Simulación de la inyección con un 20% de H_2

- **Realización de las pruebas para la validación del punto de inyección**

Una vez diseñada la posición y finalizado el análisis CFD, se procede a la ingeniería, construcción y autorización de la posición, de cara al inicio de las pruebas de validación, las cuales se realizan entre la finalización de las pruebas del 5% y el inicio de las pruebas del 10%.



Se disponen de un número importante de puntos de muestreo que permitan realizar la validación de la homogeneidad de la mezcla a diferentes distancias del punto de inyección en un tramo recto de tubería, tanto en la parte superior, como en la parte inferior de la misma.

- **Informe de simulación:** se obtiene mezclas homogéneas de Gas Natural + Hidrógeno, desde 5 % hasta 30 % H_2 , a una distancia comprendida entre 3,5 y 4,3 m.



Controlador de flujo másico de H_2



Analizador de H_2

Los resultados experimentales: permiten demostrar que la mezcla de gas natural e hidrógeno es homogénea desde el 5 % hasta el 30 % de H_2 , a una distancia entorno a los 4 m., en línea con el estudio CFD realizado.

El llenado del LOOP para las pruebas del 10% se realiza por medio de la posición de inyección, una vez ya se encuentra en operación, una vez testada. Se toman muestras del gas del LOOP para comprobar que el porcentaje de H_2 es del 10%, lo cual se verifica tras su llenado.

7 EVALUACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DEL H₂LOOP CON 10% H₂

7.1 CONDICIONES INICIALES

Puebas Blending 10%

En las pruebas se ha empleado una mezcla de gas sintético con la siguiente composición:

- Gas Natural 90% vol.
- Hidrógeno 10% vol.

Las pruebas del 10% de mezcla se ha realizado con gas natural proveniente de la red de distribución y con hidrógeno suministrado en botellas utilizando el módulo de inyección de hidrógeno, una vez validado.

7.2 DURACIÓN

Una vez finalizada la puesta en servicio de la instalación y obtenida la autorización administrativa, la ejecución de las pruebas ha sido la siguiente:

% H ₂	Fecha Inicio	Fecha Fin	Horas de Funcionamiento
5%	02 de mayo de 2022	02 de diciembre de 2022	3.000 h
10%	02 de diciembre de 2022	02 de abril de 2023	3.000 h
15%	03 de abril de 2023	[10 de agosto de 2023]	3.000 h
20%	[10 de agosto de 2023]	[13 de diciembre de 2023]	3.000 h

7.3 RESULTADOS

7.3.1 PRUEBA DE FUGAS

Para cada una de las pruebas se realizan cuatro inspecciones de detección de fugas durante el periodo de pruebas. Durante las diferentes inspecciones no se han detectado ninguna fuga en elementos de red, ni de instalaciones de usuario.

Los resultados han sido positivos ya que no se han detectado fugas, de igual forma que ocurrió en las pruebas del 5% y de la misma forma que está ocurriendo hasta la fecha, en las pruebas del 15% de mezcla.

No se han detectado fugas en elementos que componen la red de distribución de gas ni, en las instalaciones de usuario.

7.3.2 PRUEBA VÁLVULAS

Las pruebas de válvulas se han realizado para el 10%, debiendo compararse con el caso base de operación 100% gas natural, que se realizará a la finalización del 20%.

En el proceso de ejecución de las pruebas del 5% se introdujeron modificaciones en el procedimiento, realizando las pruebas con el contraste frente a un gas inerte, de cara a que los resultados de las pruebas fueran concluyentes, por lo que, cuando se finalice el 20%, se completará el proceso con la prueba de gas natural.

Los resultados son continuistas con los obtenidos en las pruebas del 5% y los obtenidos, hasta la fecha, en las pruebas del 15%.

7.3.3 PRUEBA ERM

En cada una de las fases de pruebas se realiza una prueba completa de operación de la ERM, de acuerdo con los procedimientos de operación de Nortegas y tras la finalización de la prueba se procede a desmontar la ERM y comprobar el estado de todos sus elementos.

La ERM ha operado correctamente durante la prueba realizada al 10% y no se han detectado ni problemas de operación, ni fugas en sus elementos. Tampoco se han detectado problemas en la inspección realizada a la finalización de la prueba, en la que se revisan los elementos internos de filtros y reguladores.

Los resultados son continuistas con los obtenidos en las pruebas del 5% y los obtenidos, hasta la fecha, en las pruebas del 15%.

8 RESULTADOS DE CASOS DE ESTUDIO INDUSTRIALES

Para los dos casos de estudio se han realizado simulaciones con metano puro, mezclas hidrogenadas al 10%, 20% y 30% y 100% de H₂.

Asimismo, se han comparado los resultados teóricos (temperaturas, emisiones, eficiencias, etc.) para cada equipo y para cada uno de los diferentes combustibles, teniendo como referencia el metano. Por último, se analizará el impacto de las mezclas de H₂ tanto en el proceso como en las cargas y componentes del equipo.

Los resultados obtenidos en la simulación se consideran son de alta calidad, dada la gran información previa que se disponía, la cual ha permitido hacer una simulación muy detallada, por un lado, y una comparación muy detallada del modelo frente a los resultados de funcionamiento con gas natural, de cara a la validación de los resultados.

Los resultados que se han obtenidos son coherentes con otros resultados similares obtenidos en pruebas piloto de similares características realizadas en otros países europeos y de los que se dispone de bibliografía.

En los dos estudios se comparan los cinco casos simulados: el del metano puro, los tres de mezclas hidrogenadas al 10, 20 y 30% vol en H₂ junto con el caso del H₂ puro (al 100%). Se ha considerado interesante incluir el estudio teórico del H₂ para ver diferencias significativas respecto al metano.

El análisis se ha realizado comparando las siguientes variables:

- Caudales volumétricos y máscos del combustible y el aire.
- Forma y estabilidad de la llama.
- Temperaturas: temperatura máxima de la llama, temperaturas media y máxima en las boquillas de salida del quemador y en los diferentes elementos
- Tiempo de calentamiento y eficiencia térmica del proceso
- Emisiones en humos (CO, CO₂, NO_x y H₂O)



8.1 HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO

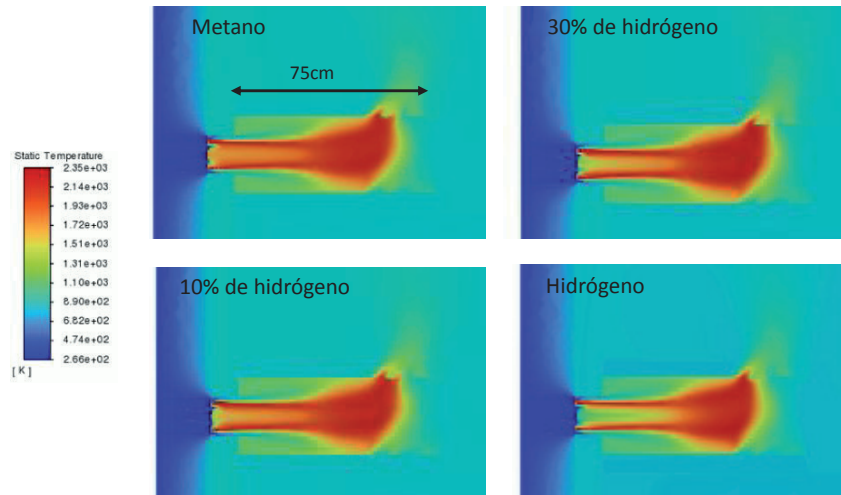
Se recogen, a continuación, algunos aspectos relevantes del estudio realizado y sus principales conclusiones:

- En cuanto a la degradación de componentes debido a alta temperatura, el impacto sería bajo, ya que la temperatura se mantiene estable con los diferentes niveles de mezcla.

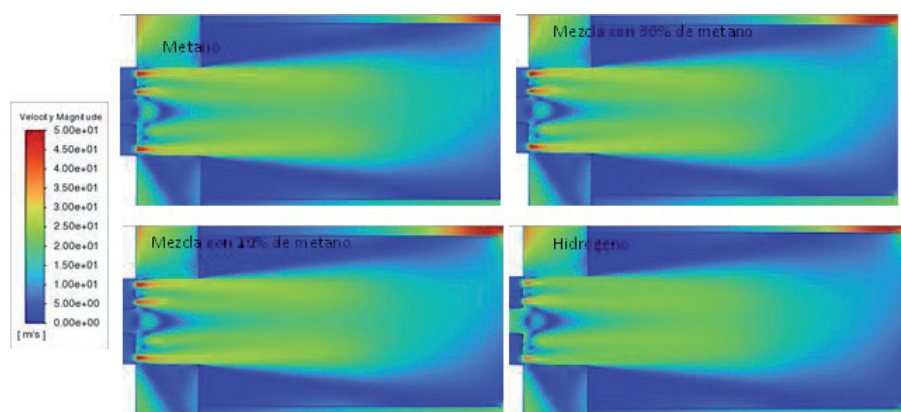
Variable	Metano puro	Metano 90% e Hidrógeno 10%	Metano 80% e Hidrógeno 20%	Metano 70% e Hidrógeno 30%	Hidrógeno puro
T máxima (llama) [°C]	1962	1969	1978	1983	2089
T media y máxima en zona boquillas del quemador [°C]	424 / 812	407 / 806	391 / 795	407 / 806	346 / 780
T media y máxima del tubo de llama [°C]	769 / 1089	767 / 1090	752 / 1091	738 / 1075	744 / 1072
T media y máxima de los humos en el interior del horno excluyendo el quemador [°C]	587	582	585	580	582
T media y máxima de lana de roca [°C]	272 / 616	271 / 609	271 / 614	270 / 605	269 / 611
T media y máxima del ladrillo refractario [°C]	284 / 571	284 / 572	283 / 577	282 / 569	281 / 572
T máxima de cada carga al final del ciclo [°C]	572 (carga 15)	570 (carga 15)	574 (carga 15)	571 (carga 15)	571 (carga 15)
T mínima de cada carga al final del ciclo [°C]	511 (carga 4)	513 (carga 4)	514 (carga 4)	514 (carga 4)	516 (carga 4)
T de humos a la entrada de la chimenea al final del ciclo [°C]	625	618	616	616	621
T de humos a la salida de la chimenea al final del ciclo [°C]	277	276	275	273	258

Tabla 7. Impacto del contenido de H_2 en el combustible sobre la temperatura máxima de la llama, temperatura media y máxima de las boquillas de salida del quemador y del tubo envolvente del quemador, temperatura media de los humos en el horno temperaturas media y máxima de ñps aislanyes, temperaturas máxima y mínima de la carga al final del ciclo de calentamiento y temperatura de humos a la entrada y salida de la chimenea.

- Con relación a la temperatura de la llama y la distribución de velocidades, las principales conclusiones del estudio se incluyen a continuación:



En la parte inicial del quemador (cono más interno) las temperaturas son menores al aumentar el porcentaje de hidrógeno. Mientras que, con metano puro, la T en el cono interno es aproximadamente de unos 1800K (1527°C), para la mezcla del 30% de H_2 , esta temperatura es de unos 1500K (1227°C) y para el H_2 puro alrededor de los 1100K (827°C). La llama se enfría cuando el contenido de H_2 es mayor ya que el caudal volumétrico aumenta.



Las velocidades del gas y aire para el metano son del orden de 5m/s y 30m/s respectivamente, para la mezcla del 30% de H_2 de 7m/s y 29m/s y, para el H_2 de 18m/s y de 23m/s. Las velocidades del metano y el H_2 al 30% son parecidas. El H_2 sale a más velocidad respecto al metano.

Los caudales teóricos (volumétricos y másicos) para los diferentes combustibles calculados para una potencia de 245kW sobre PCS y un exceso de aire del 24%, se listan a continuación.

Caso	1	2	3	4	5
%vol H ₂	0	10	20	30	100
%vol CH ₄	100	90	80	70	0
Potencia_PCS [kW]	245,0	245,0	245,0	245,0	245,0
lambda	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24
Caudal volumétrico combustible [m ³ /h]	23,35%	25,05%	27,02%	29,33%	72,89%
Diferencia relativa respecto a la potencia objetivo de metano puro [%]	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Caudal másico combustible [kg/s]	0,0044	0,0043	0,0042	0,0041	0,0017
Caudal másico H ₂ [kg/s]	0,0000	0,0004	0,0008	0,0012	0,0017
Caudal CH ₄	0,0044	0,0039	0,0034	0,0028	0,0000
Caudal aire [m ³ /h]	275,71	273,62	271,22	268,39	215,12
Caudal aire [kg/s]	0,0934	0,0927	0,0919	0,0910	0,0729
Caudal de humos [m ³ /h]	299,05	298,67	298,23	297,72	288,01
Rotación de caudales volumétricos de combustible respecto al metano	1,00	1,07	1,16	1,26	3,12
Diferencia relativa respecto al caudal másico de metano puro [%]	0,00%	-2,09%	-4,51%	-7,34%	-60,85%
Diferencia relativa respecto al caudal volumétrico del aire de metano puro [%]	0,00%	-0,76%	-1,63%	-2,65%	-21,97%
Rotación del caudal volumétrico de humos respecto al caudal de humos de metano puro	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96

Tabla 8. Impacto del contenido de H₂ en el combustible sobre los caudales volumétricos y másicos de combustible, aire y humos.



Como se puede ver en la Tabla, para una potencia y λ , constantes, conforme aumenta la proporción de H_2 en la mezcla de combustible:

- El caudal volumétrico de combustible aumenta, llegando a ser 1,26 veces mayor para la mezcla del 30% de H_2 y hasta 3,12 veces superior para el H_2 puro respecto al caudal volumétrico de metano.
- El caudal másico de combustible decrece en la mezcla, viéndose reducido el caudal másico en 7,34% y un 60,85% para la mezcla hidrogenada al 30%vol de H_2 e H_2 al 100% respectivamente.
- El caudal volumétrico de aire es inferior en una relación de 0,97 veces para el 30% de H_2 y de 0,78 veces para el H_2 , reduciéndose el caudal de aire un 2,65% y un 21,97% respectivamente.
- El caudal volumétrico en humos de combustión se mantiene prácticamente constante con una ligera tendencia a bajar cuando aumenta el porcentaje de H_2 ya que el volumen estequiométrico de aire respecto al combustible, TAR, disminuye con el porcentaje de hidrógeno.

Un aspecto a tener en cuenta, en función de las emisiones obtenidas en las simulaciones, reside en la **necesidad de actuar en el control de aireación del quemador** de forma que se aumente la aireación de combustión para las diferentes mezclas hidrogenadas.

Caso	1	2	3	4	5
%vol H_2	0	10	20	30	100
%vol CH_4	100	90	80	70	0
Potencia_PCS [kW]	245,0	228,4	211,7	195,1	78,5
λ	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24
λ ideal	1,24	1,28	1,33	1,37	1,76

Tabla 9. Excesos de aire ideales para los diferentes combustibles.

Este aspecto será beneficioso sobre todas las variables que afectan a la temperatura, empeorando ligeramente el rendimiento térmico del proceso, si bien, hasta el 30% es moderado.

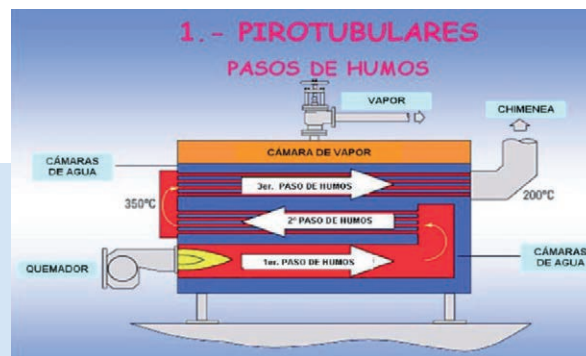
Conclusiones:

1. Necesidad de ajustar los caudales de los combustibles a la potencia requerida para que no se vea afectado el proceso.
2. Es posible usar el quemador con mezclas de H_2 hasta el 30%vol de H_2 .
3. Necesidad de actuar en el control de aireación del quemador de forma que se aumente la aireación de combustión para las diferentes mezclas hidrogenadas.

4. Teniendo en cuenta que tanto la densidad como el flujo de los humos de combustión aspirado por el ventilador se reduce ligeramente con la proporción de H₂ en la mezcla y que las temperaturas de los humos también lo hacen ligeramente, se podría considerar utilizar el mismo ventilador de aspiración hasta para mezclas del 30%vol de H₂.
5. En cuanto a la eficiencia térmica del proceso, el impacto de usar mezclas hidrogenadas hasta el 30% vol. de H₂ sería medio bajo con una reducción del 1,14% respecto a la del metano puro. Para la mezcla del 10%vol se podría considerar que apenas hay impacto con una reducción en la eficiencia del 0,14% respecto a la del metano puro.
6. En cuanto a la calidad del aluminio o el impacto sobre el refractario por el mayor contenido de agua en los humos, una mezcla al 10 de H₂ tendría un impacto bajo en cuanto al contenido de H₂O (15,86% vol. vs 15,48 % vol. GN). En los casos del 20% y del 30% es un poco mayor, si bien no resulta elevado (16,3 % vol. y 16,83% vol. vs 15,48% GN).
7. En cuanto a las emisiones
 - Las emisiones de CO se verían reducidas en el proceso ajustando la relación aire gas con excesos de aire mayores al 24%.
 - Los valores de NO_x aumentan con el contenido de H₂, aunque con mezclas hasta el 30% vol. de H₂ se mantienen dentro de los rangos permitidos (<250 mg/m³).
 - Si se aumentase la aireación se enfriaría más la llama por la dilución con aire y se reducirían los NO_x.
8. En cuanto a la degradación de los componentes del horno con mezclas hidrogenadas e H₂ puro debido a alta temperatura:
 - Ningún elemento del horno, excluyendo la zona de boquillas del quemador y el tubo envolvente del mismo, está expuesto a altas temperaturas que puedan afectar a su degradación.
 - El impacto por temperatura en el quemador sería hasta menor comparado con el metano
 - Impacto bajo en el tubo del quemador.
 - En todos los casos, cuando se incrementa la aireación, se mejoran las condiciones de temperatura en todos los elementos.
 - El impacto de usar mezclas hidrogenadas en los aislantes será bajo.

8.2 CALDERA AUXILIAR DE VAPOR

Se recogen, a continuación, algunos aspectos relevantes del estudio realizado y las principales conclusiones del mismo. En primer lugar, destacar que se trata de una caldera de vapor auxiliar de tipo pirotubular, de acuerdo al siguiente esquema:



Vista esquemática del quemador:

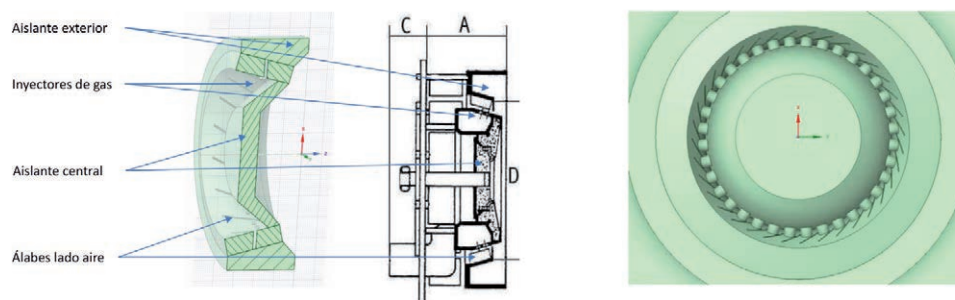


Figura 3. Vistas del quemador.

Los elementos contemplados para las modelizaciones son:

- un quemador
- el hogar o primer paso de tubos
- la mitad de las dos cámaras de inversión
- los dos pasos de tubos, la mitad del aislante y la mitad de la chimenea.

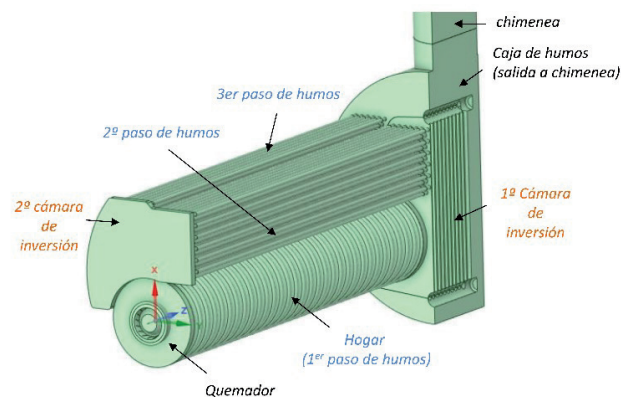


Figura 20. Componentes de la simulación. El aislante no está dibujado.

En la siguiente Tabla se resumen las principales propiedades de los combustibles, metano, mezclas hidrogenadas e hidrógeno en condiciones estándar (15°C, 1 bar).

Caso	1	2	3	4	5
%vol H ₂	0	10	20	30	100
%vol CH ₄	100	90	80	70	0
Densidad combustible [kg/m ³]	0,6771	0,617881771	0,558662	0,499443	0,08491
Densidad relativa al aire	0,5550	0,5065	0,4579	0,4094	0,0696
PCS_combustible [MJ/m ³]	37,78	35,212	32,644	30,076	12,1
PCI_combustible [MJ/m ³]	34,02	31,638	29,256	26,874	10,2
TAR combustible Volumen estequiométrico [m ³ aire/m ³ combustible]	9,524	8,8096	8,0952	7,3808	2,38
Masa estequiométrica de aire [kg aire/kg gas]	17,160	17,394	17,678	18,029	34,196
PCS_combustible [MJ/kg]	55,80	56,99	58,43	60,22	142,50
PCI_combustible [MJ/kg]	50,24	51,20	52,37	53,81	120,13
W _s [MJ/m ³]	50,71	49,48	48,24	47,01	45,87
W _i [MJ/m ³]	45,67	44,46	43,23	42,00	38,66
CARI_combustible	12,78	12,38	11,96	11,54	9,02
Volumen de humos húmedos teóricos vs humos combustibles [m ³ humos/m ³ gas]	10,52	9,76	9,00	8,23	2,88
Volumen de humos húmedos secos vs humos combustibles [m ³ humos/m ³ gas]	8,52	7,86	7,20	6,53	1,88
Porcentaje máximo de CO ₂ [g/MU]	9,51	8,56	7,60	6,65	0,00
Porcentaje de CO ₂ específico [g/MU]	56	54	51	49	0
Reducción de CO ₂ [%]	0,00%	3,57%	8,93%	12,50%	10,00%
Límite de inflamabilidad inferior [%]	5%	5%	5%	5%	4%
Límite de inflamabilidad superior [%]	15%	16%	18%	20%	75%

Tabla 10. Propiedades de los combustibles. Valores en condiciones estándar (15°C, 1 bar).

Los caudales de combustible y comburente (aire) máscos utilizados en las simulaciones para los diferentes casos se resumen en la siguiente Tabla.

Caso	1	2	3	4	5
%vol H ₂	0	10	20	30	100
%vol CH ₄	100	90	80	70	0
Potencia_PCI [kW]	6000	6000	6000	6000	6000
lambda	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21
Caudal másico H ₂ [kg/s]	0,0000	0,0016	0,0035	0,0057	0,0499
Caudal másico CH ₄ [kg/s]	0,1194	0,1156	0,1111	0,1058	0,0000
Caudal másico combustible [kg/s]	0,1194	0,1172	0,1146	0,1115	0,0499
Caudal aire [kg/s]	2,4796	2,4663	2,4508	2,4326	2,0667

Tabla 11. Causales de combustible y aire para los diferentes casos simulados.



Los caudales teóricos (volumétricos y másicos) para los diferentes combustibles calculados para una potencia de 6000kW sobre PCI y un exceso de aire del 21%, se listan a continuación.

Caso	1	2	3	4	5
%vol H ₂	0	10	20	30	100
%vol CH ₄	100	90	80	90	0
Potencia_PCI [kW]	6000	6000	6000	6000	6000
lambda	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21
lambda ideal	1,21	1,25	1,29	1,34	1,71
Caudal volumétrico combustible [m ³ /h]	635	683	738	804	2118
Caudal volumétrico combustible [l/min]	10582	11379	12305	13396	35294
Caudal másico combustible [kg/s]	0,1194	0,1172	0,1146	0,1115	0,0499
Caudal vol H ₂ [m ³ /h]	0,00	68,27	147,66	241,13	2117,65
Caudal vol CH ₄ [m ³ /h]	634,92	614,45	590,65	562,63	0,00
Caudal másico H ₂ [kg/s]	0,0000	0,0016	0,0035	0,0057	0,0499
Caudal másico CH ₄ [kg/s]	0,1194	0,1156	0,1111	0,1058	0,0000
Caudal aire [m ³ /h]	7316,85	7277,57	7231,89	7178,11	6098,40
Caudal aire [kg/s]	2,4796	2,4663	2,4508	2,4326	2,0667
Caudal de humos [m ³ /h]	7951,77	7960,29	7970,20	7981,86	8216,05
Relación de caudales volumétricos de combustible respecto al metano	1,00	1,08	1,16	1,27	3,34
Relación de caudales volumétricos de aire respecto al metano	1,00	0,99	0,99	0,98	0,83
Relación de caudales volumétricos de humos respecto al metano	1,00	1,00	1,00	1,00	1,03
Diferencia relativa respecto al caudal másico de metano puro [%]	0,00%	-1,88%	-4,06%	-6,62%	-58,17%
Diferencia relativa respecto a caudal volumétrico de aire de metano puro [%]	0,00%	-0,54%	-1,16%	-1,90%	-16,65%

Tabla 12. Impacto del contenido de H₂ en el combustible sobre los caudales volumétricos y másicos de combustible, caudal volumétrico de aire y de humos.

Como se puede ver en la Tabla, para una potencia y lambda constantes, conforme aumenta la proporción de H₂ en la mezcla de combustible:

- El caudal volumétrico de combustible aumenta, llegando a ser 1,27 veces mayor para la mezcla del 30% de H₂ y hasta 3,34 veces superior para el H₂ puro respecto al caudal volumétrico de metano.

- El caudal volumétrico de combustible aumenta, llegando a ser 1,27 veces mayor para la mezcla del 30% de H_2 y hasta 3,34 veces superior para el H_2 puro respecto al caudal volumétrico de metano. El caudal másico de combustible decrece en la mezcla, viéndose reducido el caudal másico en 6,62% y un 58,17% para la mezcla hidrogenada al 30%vol de H_2 e H_2 al 100% respectivamente.
- El caudal volumétrico de aire es inferior en una relación de 0,98 veces para el 30% de H_2 y de 0,83 veces para el H_2 , reduciéndose el caudal de aire un 1,90% y un 16,65% respectivamente.
- El caudal volumétrico en humos de combustión aumenta ligeramente cuando aumenta el porcentaje de H_2 .

Si se compara la velocidad de salida del combustible en inyectores (Figura 21) se deduce que:

- Los jets de combustible hasta el 30%vol de H_2 son muy parecidos al del metano puro.
- Al aumentar el contenido de H_2 , la velocidad de salida del combustible aumenta ya que aumenta el caudal volumétrico de combustible.
- Hay velocidades máximas del orden de 60m/s hasta el 30%vol de H_2 y velocidad máxima para el H_2 de hasta 112m/s (se triplica el caudal volumétrico respecto al metano).
- Sería conveniente reducir la velocidad de salida de combustible con H_2 puro aumentando el diámetro de los inyectores con H_2 puro (actualmente D 22mm).
- Al aumentar el contenido de H_2 , se difunde mejor el combustible.

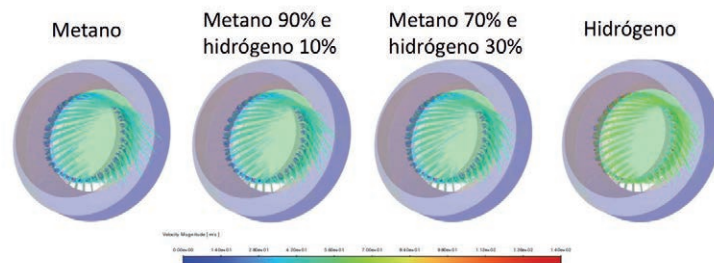


Figura 21. Contornos de velocidad los inyectores de gas para metano, mezclas al 10 y 30%vol de H_2 y para H_2 puro.

El perfil de salida del aire en los álabes del quemador tiene el mismo patrón de velocidades para todos los combustibles debido a que el caudal volumétrico de aire decrece ligeramente para todos ellos. Con velocidades máximas de 50m/s para todos los combustibles, la vorticidad no se ve afectada por el contenido de H_2 . Esto es bueno para la mezcla aire-gas. Por lo tanto, se deduce que no hay impacto en los álabes del quemador con el cambio de combustible.

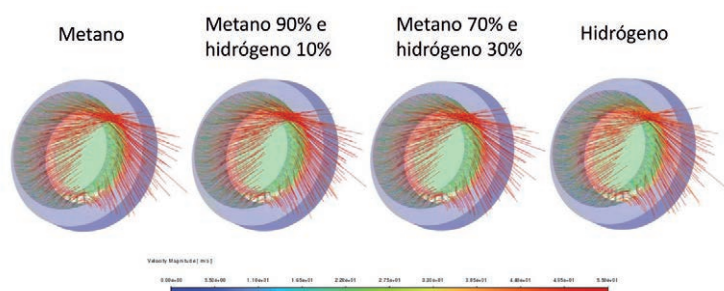
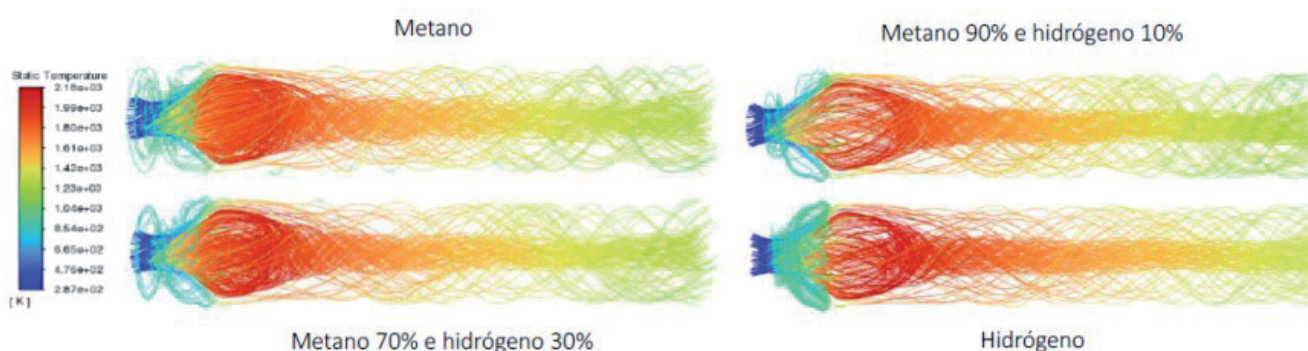
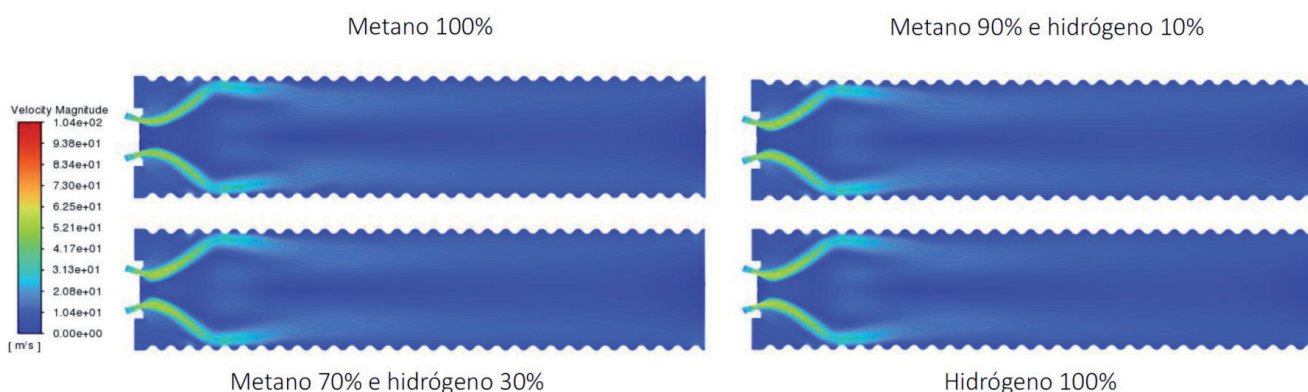


Figura 22. Patrón de velocidades del aire en los álabes del quemador para metano, mezclas al 10 y 30%vol de H_2 y para H_2 puro.

Se ha comparado la llama en el interior del hogar para los diferentes combustibles atendiendo a la temperatura, velocidad y emisiones de CO y CO₂. Desde el punto de vista de las temperaturas se aprecia un flujo giratorio debido a los álabes del quemador que se mantiene en el hogar favoreciendo la mezcla aire-combustible.



En cuanto a la velocidad de mezcla, no se aprecian cambios significativos para los diferentes combustibles ya que el caudal de humos se mantiene prácticamente constante; velocidades máximas de unos 100m/s, velocidades medias de 42-52m/s y velocidad de mezcla en el interior del hogar entre 10 y 20m/s.



Comparando los perfiles de emisiones de CO y CO₂, se aprecia que cuando aumenta el contenido de H₂, la combustión tarda más en completarse quizá porque el mezclado aire combustible sea peor con mezclas hidrogenadas y porque se requiere mayor aire de combustión que el 21% de exceso de aire. Los valores de CO máximos en la llama de 7ppm, son valores despreciables.

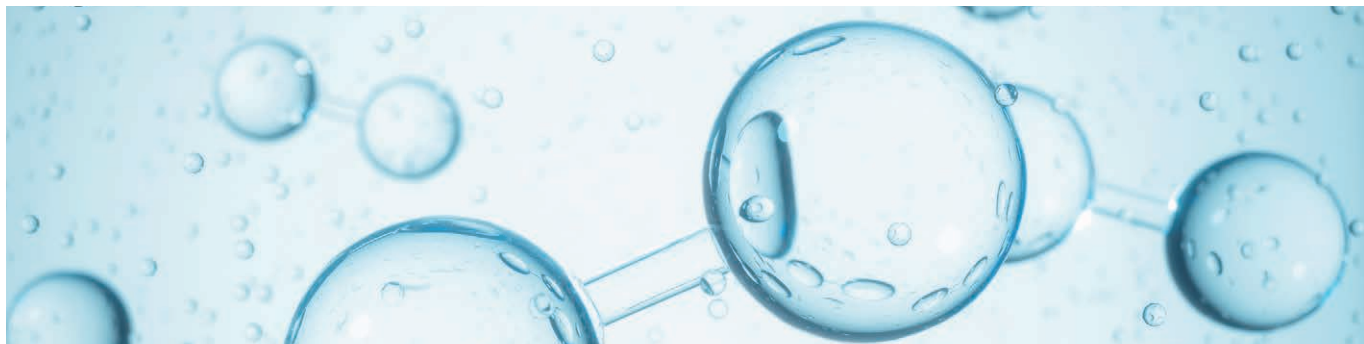
En la siguiente tabla se presentan las temperaturas máximas y medias en las zonas más representativas de la caldera junto con la diferencia relativa respecto al metano puro.

Variable/ combustible:	Metano	Mezcla hidrogenada con 10% de H ₂	Mezcla hidrogenada con 20% de H ₂	Mezcla hidrogenada con 30% de H ₂	Hidrógeno
T máx. Llama [°C]	1732	1739	1776		
T máx llama. Diferencia relativa respecto al metano [%]	0,0%	0,4%	2,5%	5,0%	10,3%
T media humos al final del hogar [°C]	979	984	991	991	1054
T media humos. Diferencia relativa respecto al metano [%]	0,0%	0,5%	1,2%	1,2%	7,7%
T máx_Disco cerámico del quemador [°C]	1068	1059	1039	1034	1174
T med_Disco cerámico del quemador [°C]	1032	1028	1010	1005	1010
T med_Disco cerámico. Diferencia relativa al metano [%]	0,0%	-0,4%	-2,1%	-2,6%	-2,1%
T máx_Anillo cerámico [°C]	950	926	920	919	950
T med_Anillo cerámico [°C]	803	775	770	763	807
T med_Anillo cerámico. Diferencia relativa al metano [%]	0,0%	-3,5%	-4,1%	-5,0%	0,5%
T máx_Álabes [°C]	182	181	180	178	199
T med_Álabes [°C]	38	38	37	37	39
T med_Álabes. Diferencia relativa al metano [%]	0,0%	0,0%	-2,6%	-2,6%	2,6%

Tabla 13. Impacto del contenido de H₂ en el combustible sobre la temperatura máxima de la llama, temperatura media de los humos al final del hogar, temperaturas máximas y medias en los aislantes, y álabes y diferencias relativas de las variables respecto al metano.

Combustible:	Metano	Mezcla hidrogenada con 10% de H ₂	Mezcla hidrogenada con 20% de H ₂	Mezcla hidrogenada con 30% de H ₂	Hidrógeno
T máx. Llama [°C]	1732	1739	1776	1818	1910
T máx llama. Diferencia relativa respecto al metano [%]	0,0%	0,4%	2,5%	5,0%	10,3%
T media humos al final del hogar [°C]	979	984	991	991	1054
T media humos. Diferencia relativa respecto al metano [%]	0,0%	0,5%	1,2%	1,2%	7,7%

Tabla 14. Impacto del contenido de H₂ en el combustible sobre la temperatura máxima de la llama y la temperatura media de los humos en el hogar.



Con respecto a los aislantes, las principales conclusiones son las siguientes:

- Las temperaturas máximas con H₂ son ligeramente superiores respecto a las del metano puro, pero no son significativas.
- En el disco cerámico refractario, las temperaturas medias son inferiores al aumentar el contenido de H₂ ya que el perfil de T de la llama cambia, obteniéndose valores mayores de T en puntos más alejados del aislante.
- En el anillo cerámico refractario las temperaturas medias también son inferiores al aumentar el contenido de H₂ por el mismo motivo.

Con respecto a las emisiones, las principales conclusiones son, derivadas del incremento de temperatura de llama, las siguientes:

- Los valores de CO son despreciables para todos los casos.
- Los valores de NO_x aumentan con el contenido de H₂, aunque con mezclas hasta el 30% vol. de H₂ se mantienen dentro de los rangos permitidos (<250 mg/m³).
- Aumenta el contenido de H₂O cuanto mayor sea el nivel de H₂.

Es de gran relevancia, tal y como ya ha sido comentado anteriormente actuar en el control de aireación del quemador de forma que se aumente la aireación de combustión para las diferentes mezclas hidrogenadas. Al 10%vol de H₂, el exceso de aire debería de aumentarse de 1,21 a 1,25 y a 1,34 al 30%vol de H₂.

Es por ello que se ha realizado un análisis específico para ver el impacto que tiene el ajuste de la aireación en el quemador sobre los principales aspectos que influyen en el modelo (aplicable a ambos casos de estudio).

En concreto, se realiza para el caso de uso de la caldera de vapor auxiliar con un Blending del 30% y ajustando el exceso de aire desde lambda 1,21 hasta lambda 1,34.

Tal y como se puede ver en las conclusiones que se recogen a continuación, con los ajustes de aireación se logran una mejora muy relevante y con impacto muy positivo, no solo para las emisiones, sino para todos los aspectos sobre los que tiene influencia la temperatura de llama.

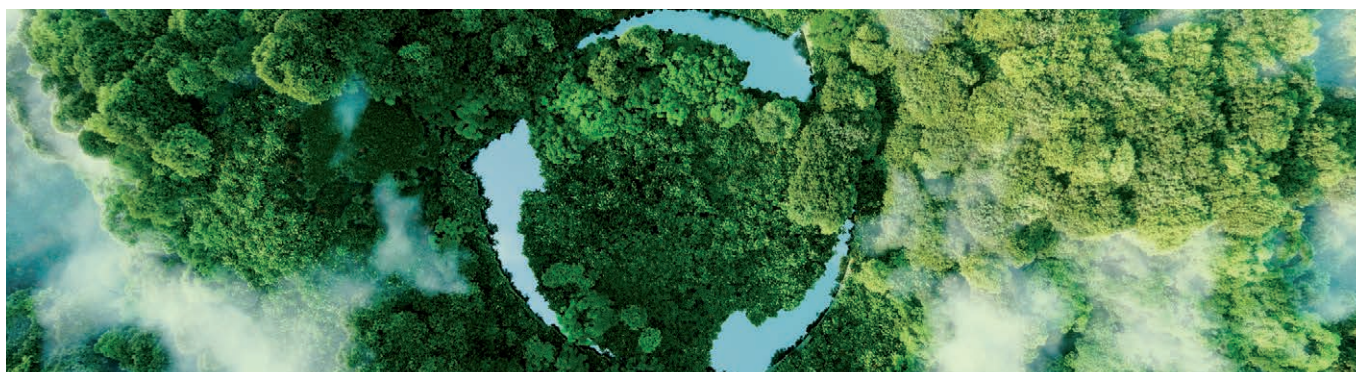
Aumentando la aireación de combustión, se reducen todas las temperaturas máximas de la caldera (llama, aislantes y álabes del quemador). Impacto positivo.

Combustible:	Llama [°C]	Disco cerámico del quemador [°C]	Anillo cerámico [°C]	Alabes [°C]
Metano	1732	1068	950	182
Mezcla hidrogenada con 10% de H ₂	1739	1059	926	181
Mezcla hidrogenada con 20% de H ₂	1776	1039	920	180
Mezcla hidrogenada con 30% de H ₂ (lambda=1.21)	1818	1034	919	178
Mezcla hidrogenada con 30% de H ₂ (lambda=1.34)	1789	1040	914	170
Hidrógeno	1910	1174	950	199

Al aumentar la aireación de combustión, las temperaturas medias en la caldera, disminuyen en general, salvo en el disco cerámico que aumentan ligeramente. Impacto positivo.

Combustible:	Humos al final del hogar [°C]	Humos al final del intercambiador [°C]	Disco cerámico del quemador [°C]	Anillo cerámico [°C]	Alabes [°C]
Metano	979	213	1032	803	38
Mezcla hidrogenada con 10% de H ₂	984		1028	775	38
Mezcla hidrogenada con 20% de H ₂	991		1010	770	37
Mezcla hidrogenada con 30% de H ₂ (lambda=1.21)	991		1005	763	37
Mezcla hidrogenada con 30% de H ₂ (lambda=1.34)	982		1012	761	36
Hidrógeno	1054		1010	807	39





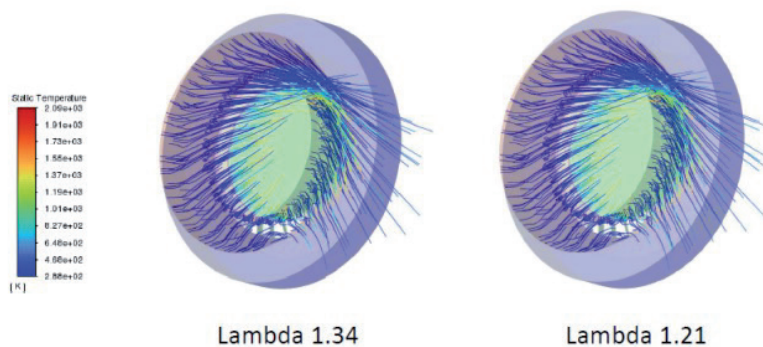
Aumentando la aireación de combustión, se reduce la transferencia de calor en el hogar, aumenta la transferencia en el segundo y tercer paso de humos de la caldera, aumentando de esta forma, la eficiencia térmica del proceso. Para mezclas hidrogenadas, mejora el proceso con el aumento de aireación. Impacto positivo.

Combustible:	Flujo de calor del hogar [MW]	Flujo de calor del intercambiador [MW]	Total [MW]	Eficiencia térmica [%]
Metano	2,85 (48%)	2,69 (45%)	5,54	92%
Mezcla hidrogenada con 10% de H ₂	2,84 (47%)	2,70 (45%)	5,54	92%
Mezcla hidrogenada con 20% de H ₂	2,85 (48%)	2,69 (45%)	5,54	92%
Mezcla hidrogenada con 30% de H ₂ (lambda=1.21)	2,84 (47%)	2,67 (45%)	5,51	92%
Mezcla hidrogenada con 30% de H ₂ (lambda=1.34)	2,68 (45%)	2,87 (48%)	5,55	93%
Hidrógeno	2,99 (50%)	2,63 (44%)	5,62	94%

Aumentando la aireación de combustión, se reducen las emisiones de CO₂, de CO₂ (se completa mejor la combustión), del vapor de agua y disminuyen casi en un 50% las emisiones de NO_x. Impacto positivo.

Combustible:	CO [ppm]	CO ₂ [%]	NO _x [ppm]	H ₂ O [%]	O ₂ [%]
Metano	1,99e-4	7,92	19,39	15,86	3,53
Mezcla hidrogenada con 10% de H ₂	5,20e-4	7,69	23,86	16,24	3,49
Mezcla hidrogenada con 20% de H ₂	4,97e-4	7,41	37,89	16,67	3,50
Mezcla hidrogenada con 30% de H ₂ (lambda=1.21)	5,82e-4	7,10	73,38	17,24	3,46
Mezcla hidrogenada con 30% de H ₂ (lambda=1.34)	5,50e-8	6,52	37,81	15,8	4,9
Hidrógeno	0	0,03	321,31	29,10	3,35

Comparativa de temperaturas (mezcla de aire y gas) zona álabes:

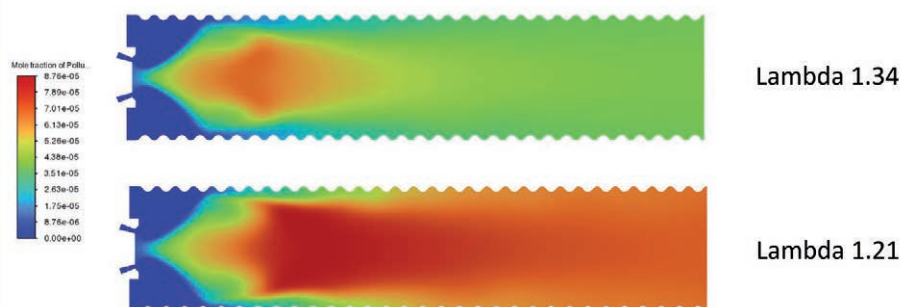


Comparativa de temperaturas en el hogar:



Comparativa de emisiones de NOx en el hogar:

Reducción casi del 50% en las emisiones de NOx debido a que baja la T de la llama y a que se completa mejor la reacción de combustión.



Conclusiones:

- Necesidad de ajustar los caudales de los combustibles a la potencia requerida para que no se vea afectado el proceso.
- Para mantener la potencia de cada quemador, los caudales volumétricos de combustible aumentan: llegando a ser 1,08 veces mayor para la mezcla del 10% vol. de H₂, un 1,16 veces mayor para la mezcla del 20%vol de H₂, 1,27 veces mayor para la mezcla del 30%vol de H₂ y hasta 3,34 veces superior para el H₂ puro respecto al caudal volumétrico de metano.
- Para mantener la producción de vapor es necesario ajustar los caudales de los combustibles y su aireación.
- Hasta el 30% de H₂ no es necesario modificar el quemador.
- En cuanto al control del quemador, se recomienda incrementar el tiempo de pre barrido de la caldera, para eliminar posibles bolsas de H₂. Por cuestiones de seguridad, sería conveniente reducir el tiempo máximo de detección de llama (con gas natural 3 s.) para que el corte se haga más rápido. El detector de llama es una célula UV. Habrá que comprobar su sensibilidad al contenido de H₂, aunque hasta el 10% no debe de existir ningún problema.
- La eficiencia térmica mejora al usar mezclas de gas natural e hidrógeno.
- En cuanto a las emisiones:
 - Los valores de CO son despreciables para todos los casos.
 - Los valores de NO_x aumentan con el contenido de H₂, aunque con mezclas hasta el 30% vol. de H₂ se mantienen dentro de los rangos permitidos (<250 mg/m³).
 - Aumenta el contenido de H₂O cuanto mayor sea el nivel de H₂.
 - Conforme a las conclusiones del estudio específico, se debe incrementar la aireación para disminuir la temperatura de llama y lograr una reducción relevante de las emisiones, al margen de que también mejoren, de forma general, otros parámetros del estudio.
- En cuanto a la posible degradación de los componentes de la caldera con mezclas de gas natural e hidrógeno debido a alta temperatura, el impacto sería bajo.
- Si se dieran puntos de condensación de humos en chimenea, sería necesario modificar la geometría para evitar problemas de oxidación.
- Al ser un calentamiento indirecto, no hay impacto sobre la carga térmica.
- En cuanto a la degradación de componentes por efecto de la temperatura, el impacto es bajo hasta un 30% de Blending y con incrementos de aireación despreciables.

9 CONCLUSIONES

9.1 RED DE DISTRIBUCIÓN DE GAS NATURAL

Se ha evaluado el funcionamiento de los elementos de la red de distribución de gas natural con mezclas de hidrógeno del 5% y 10%, en colaboración con TECNALIA.

Todos los elementos estudiados han funcionado con normalidad y no se han detectado fugas ni deterioro de los componentes de la plataforma relacionados con la presencia del 5% y 10% de hidrógeno en la mezcla.

9.2 INSTALACIÓN DE USUARIO

Se ha evaluado el funcionamiento de los equipamientos existentes en una instalación de usuario para las mezclas de hidrógeno del 5% y 10%, en colaboración con TECNALIA.

Todos los elementos estudiados han funcionado con normalidad y no se han detectado fugas ni deterioro de los componentes relacionados con la presencia del 5% y 10% de hidrógeno en la mezcla.

Tanto la caldera, como la cocina funcionan correctamente con los indicados porcentajes, no presentándose incidencias de ningún tipo.

9.3 CASOS DE USO INDUSTRIAL

En esta primera fase en colaboración con IKERLAN se han realizado dos casos de estudio para un horno de tratamiento térmico y una caldera auxiliar de vapor con modelización CFD hasta el 30% de mezclas de hidrógeno.

Los dos casos de estudio analizados muestran que es viable utilizar mezclas de hasta el 30% de hidrógeno en estos equipos.

Se han presentado los casos de uso a los clientes industriales y a lo largo de las próximas semanas nos reuniremos con ellos para tratar de articular proyectos piloto que validen los resultados hasta, al menos, un 20% de hidrógeno.

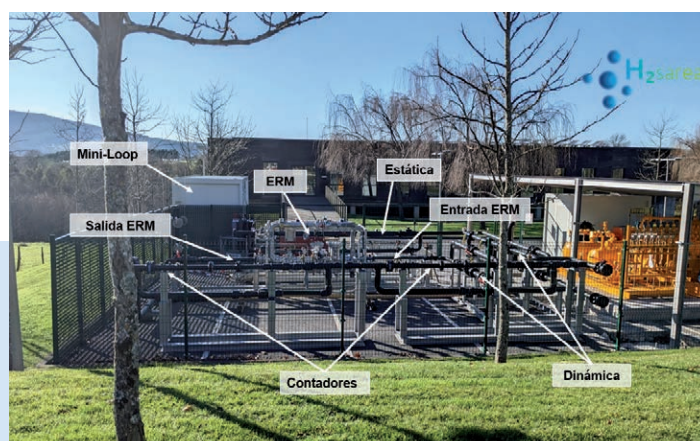
10 ANEXOS

ANEXO 1 - PRUEBA DE FUGAS

El H₂LOOP está comprendido desde la zona 1 hasta la zona 11, mientras el Mini-Loop está comprendido en las zonas hasta la zona 11 corresponden al H₂Loop y las zonas 12 y 13:

La prueba de fugas se realiza cada 750h de operación y se analizan los 552 puntos de fuga potenciales divididos en 497 puntos en la zona del LOOP principal y 55 puntos en la zona del Mini-LOOP, para los diferentes elementos de la red de distribución:

	Unión bridada	Soldadura	Junta dieléctrica	Picaje	Válvula	Contador	Antirretorno	Codo	Filtro	Regulador	Otros elementos	TOTAL
Contadores	38	49		15	7	2	1					111
Estática	20	19		3	4							46
Dinámica	48	60	1	25	8							142
Tubería PE	6	3		1	2			1			1	14
ERM	17	45		14	16	1			2	4		99
Entrada ERM	2	4		3	1							10
Salida ERM	26	32	1	8	6						1	75
Total Loop	157	212	2	69	44	3	1	1	2	4	2	497
Mini Loop	10	1		11	9		1	20		2	1	55



ANEXO 2 - PRUEBA DE MATERIALES

Las pruebas de materiales se clasifican por campañas con las siguientes fechas programadas:

	Fecha de inicio	Fecha de fin
Campaña 1	07/03/22	13/07/22
Campaña 2	11/07/22	26/01/23
Campaña 3	29/11/22	31/03/23
Campaña 4	01/02/23	31/05/23
Campaña 5	14/03/23	17/07/23
Campaña 6	03/04/23	30/11/23



Los materiales identificados en la línea de distribución (LD), así como en la acometida (A), la instalación receptora colectiva (IRC) y en la instalación receptora individual (IRI) se detallan en la siguiente tabla:

Material	Aleación	Componente	LD	A	IRC/IRI
Metálicos					
Férreos					
Aceros al carbono	API-5L gr-B	Tubería	●		
	API-5L gr-x45	Tubería	●		
	API-5L gr-x60	Tubería	●		
	API-5L gr-x70	Tubería	●		
	Acero (*)	Tubería		●	●
	Acero bicromado	Llave edificio		●	●
Fundición	Fundición dúctil (*)	Tubería	●		
	Fundición gris (*)	Tubería	●		
Aceros inoxidables	1.4408 (AISI 316)	Llave de mariposa		●	
	1.4021 (AISI 420)	Llave de mariposa		●	
	Acero inoxidable (*)	Llave edificio, Tubería		●	●
	Acero corrugado (*)	Tubería			●
	AISI 316	Llave de bola		●	
	AISI 410	Llave de bola		●	
	AISI 304	Extremo tubería			●
	1.4305 (AISI 303)	Conexiones, llave mariposa		●	●
No férreos					
Aluminio	Aluminio (*)	Llave mariposa		●	
Zinc	Zamak (*)	Llave	●	●	
Aleaciones cobre	Cobre (*)	Tubería		●	●
	Bronce (*)	Llave mariposa		●	
	Latón (*)	Llave edificio, toma Peterson		●	●
	Latón CW614N o CW617N	Transiciones		●	●
	Latón recubierto níquel (*)	Tubería		●	●
No metálicos					
Polietileno SRD11		Tubería	●		
Polietileno SRD17		Tubería	●		
Polietileno		Tubería, llave		●	
PTFE (Teflón)		Llave de bola, llave de edificio, toma Peterson		●	●
Flexilite		Llave de bola		●	
PTFE+C+Grafito		Llave de bola		●	
EPDM (caucho de etileno)		Llave de mariposa, elastómero, O-Ring		●	
NBR (nitrilo)		Llave de edificio		●	●
Elastómero		Transiciones, tubería, toma Peterson		●	
Cartón		Juntas		●	
Multicapa		Tubería			●

*Sin especificaciones de aleación

PLAN DE ENSAYOS DE PRUEBAS DE MATERIALES

CONDICIONES DE EXPOSICIÓN:

- **Atmósfera:** Hidrógeno 100%.
- **Presión:** 16 bar
- **Duración de la exposición:** 1.000 horas.

CAMPAÑA 1

Ensayo	Normativa	Referencia								
		M1	M1x	M2	M3x	P1	P2	J1	J2	J3
Caracterización química	ASTM E415				●					
Análisis del contenido de Hidrógeno	LECO	●		●						
Fragilización	Procedimiento interno	●	●	●	●					
Ensayo de doblado	EN ISO 5173		●		●					
Ensayo de tracción poliméricos	ISO 527-2					●	●			
Microdureza	EN ISO 6507-1	●	●	●	●					
Microdureza cordón de soldadura	EN ISO 9015		●		●					
Microestructura	Procedimiento interno	●	●	●	●	●	●			
Medida de espesores	Procedimiento interno							●		●
Inspección visual	Procedimiento interno							●		●
Compresión set	ISO 815-1							●	●	●

CAMPAÑA 2

Ensayo	Normativa	Referencia				
		P1-1	P3	J1-2	MEM1	MEM2
Ensayo de tracción poliméricos	EN ISO 6507-1	●	●			●
Inspección visual	Procedimiento interno		●	●	●	

CAMPAÑA 3

Ensayo	Normativa	Referencia			
		M4	M4X	M2-2	M5
Fragilización	Procedimiento interno	●	●	●	●
Microdureza	EN ISO 6507-1	●	●		
Microestructura	Procedimiento interno	●			

RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS:

CAMPAÑA 1

Componente y material	Ref.	Imagen	Resultado
Tubería de acero Api 5l Grado B	M1		El material no ha sufrido fragilización por hidrógeno en las condiciones de exposición. 
Tubería de acero Api 5l Grado B con soldadura	M1X		El análisis microestructural no revela la presencia de defectos o diferencias atribuibles a la exposición en hidrógeno. 
Tubería de fundición	M2		No se aprecian diferencia en la microestructura de las muestras analizadas antes y después de la exposición. 
Casquillo de acero con soldadura a tope	M3X		Con los datos actuales no es posible extraer conclusiones sobre si el material es susceptible a sufrir fragilización por hidrógeno. Repetir ensayo
Tubería de polietileno PE100	P1		No se observan diferencias en la microestructura de la muestra ni en las propiedades mecánicas después de la exposición. 
Tubería de polietileno PE80	P2		No se observan diferencias en la microestructura de la muestra. 
Juntas NBR	J1		La inspección visual tras la exposición muestra ampollamiento en la superficie. Repetir ensayo
Juntas de cartón	J2		No se observan defectos ni modificaciones en la junta. 
Junta plana elastomérica	J3		No se observan defectos ni modificaciones en la junta. 

CAMPAÑA 2

Componente y material	Ref.	Imagen	Resultado
Tubería de polietileno PE100	P1-2		No se observan diferencias en la microestructura de la muestra ni en las propiedades mecánicas después de la exposición. 
Tubería de polietileno PE100	P3		No se observan diferencias en la microestructura de la muestra ni en las propiedades mecánicas después de la exposición. 
Juntas NBR	J1-2		La inspección visual tras repetir la prueba de exposición muestra de nuevo ampollamiento en la superficie.  Repetir ensayo bajo compresión ¹
Membrana ERM	MEM1		No se observan defectos en la superficie ni modificaciones en las propiedades mecánicas de la membrana. 
Membrana ERM	MEM2		No se observan defectos en la superficie ni modificaciones en las propiedades mecánicas de la membrana. 

¹ El modo normal de trabajo de la junta es bajo compresión, razón por la que se ha de repetir la prueba en las condiciones de trabajo embridada

CAMPAÑA 3

Componente y material	Ref.	Imagen	Resultado
Tubería de acero Api 5L Grado B X42	M4		El material no ha sufrido fragilización por hidrógeno en las condiciones de exposición. 
Tubería de acero Api 5L Grado B X42 con soldadura	M4X		El material no ha sufrido fragilización por hidrógeno en las condiciones de exposición. 
Tubería de fundición	M2-2		El material ha sufrido fragilización por hidrógeno en las condiciones de exposición.  Repetir ensayo
Tubería de cobre	M5		El análisis microestructural no revela la presencia de defectos o diferencias atribuibles a la exposición en hidrógeno. 

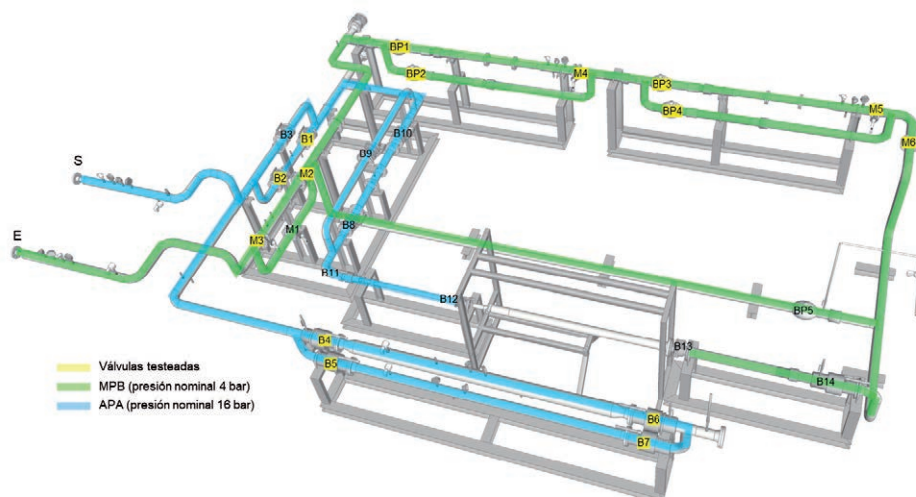
ANEXO 3 – PRUEBA DE VÁLVULAS

Las pruebas de válvulas se han realizado sobre los siguientes tres tipos de válvulas: mariposa (M), bola de acero (B) y bola de polietileno (BP).

Tramo	Diam	Distancia
BP1 - M4	4"	2,5 m
BP2 - BP1,3,4	4"	5 m
BP3 - M5	4"	2,5 m
BP4 - M6	4"	3 m
B1 - B2	4"	0.5 m
B4 - B6	4"	3.5 m
B5 - B7	4"	3.5 m
B8 - B10	4"	1.5 m

Tramo	Tiempo
0.5 m – 2,5 m	30 min
3 m - 5,5 m	1 h

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7	Prueba 8
Válvulas	BP1, M4	BP2 - B3,4	BP3 - M5	BP4 - M6	M2 M3	B1 - B2	B4 - B6	B5 - B7
Tiempo	30 min	1 h	30 min	1 h	30 min	30 min	1 h	1 h





"Nortegas" hace referencia a NORTEGAS ENERGIA DISTRIBUCIÓN, S.A.U., compañía distribuidora de gas natural perteneciente al Grupo Nortegas (<https://www.nortegas.es/>).

Nortegas no pretende, por medio de esta publicación, prestar un servicio o asesoramiento profesional y toda la información contenida en este documento se proporcionan únicamente con fines informativos y divulgativos. Nortegas ha hecho todos los esfuerzos razonables para garantizar la exactitud y la integridad de la información presentada. Sin embargo, no garantiza la precisión, actualidad, integridad o idoneidad de la información y no asume ninguna responsabilidad legal por cualquier error, omisión o imprecisión que pueda surgir ni, en ningún caso, asume responsabilidad de ninguna pérdida, daño o lesión que pueda surgir directa o indirectamente del uso o la confianza en la información presentada en este documento.

"Nortegas" refers to NORTEGAS ENERGIA DISTRIBUCIÓN, S.A.U., a natural gas distribution company belonging to Nortegas Group (<https://www.nortegas.es/>).

Nortegas does not intend, through this publication, to provide a professional service or advice and all the information contained in this document is provided for informational and educational purposes only. Nortegas has made all reasonable efforts to ensure the accuracy and completeness of the information presented. However, it does not guarantee the accuracy, currency, completeness or suitability of the information and does not assume any legal responsibility for any errors, omissions or inaccuracies that may arise nor Nortegas in any event assumes responsibility for any loss, damage or injury that may arise directly or indirectly from the use of or reliance on the information presented in this document.

