



“INFORME DE EVALUACIÓN DE PRUEBAS
REALIZADAS EN H2SAREA”

Resultados de evaluación de pruebas para mezclas del 25 y 30 % H₂ y estudio
de casos industriales

Junio 2024

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	3
1.1	ANTECEDENTES.....	3
1.2	ALCANCE	4
1.3	OBJETO.....	5
2	RESUMEN EJECUTIVO – CICLO DE PRUEBAS DE MEZCLA H₂/GN 30 %	6
3	DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA H2LOOP	13
3.1	PLATAFORMA H2LOOP.....	13
3.2	COMPONENTES PRINCIPALES DEL LOOP PRINCIPAL.....	15
3.3	COMPONENTES PRINCIPALES INSTALACIÓN DOMÉSTICA	20
4	CASOS DE ESTUDIO INDUSTRIALES	22
4.1	HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO	23
4.2	CALDERA DE VAPOR AUXILIAR	23
5	PLAN DE PRUEBAS DEL H2LOOP	25
5.1	DETECCIÓN DE FUGAS	25
5.2	EVALUACIÓN DE VÁLVULAS.....	30
5.3	PRUEBA DE ESTACIÓN DE REGULACIÓN Y MEDIDA (ERM).....	32
5.4	PRUEBAS DE EQUIPOS PRESENTES EN INSTALACIONES DE USUARIO	37
5.5	ENSAYOS DE COMPATIBILIDAD DE MATERIALES EN AUTOCLAVES	42
6	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE LA POSICIÓN DE INYECCIÓN DE H₂	51
7	ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE RED DE DISTRIBUCIÓN	56
7.1	IDENTIFICACIÓN DE REDES	56
7.2	CREAR MODELO DE CÁLCULO	58
7.3	ANÁLISIS DE CADA UNO DE LOS ESCENARIOS	59
8	EVALUACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DEL H2LOOP CON 25 y 30 % H₂	69
8.1	CONDICIONES INICIALES	69
8.2	DURACIÓN.....	69
8.3	RESULTADOS.....	70
9	RESULTADOS DE CASOS DE ESTUDIO INDUSTRIALES	124
9.1	HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO	125
9.2	CALDERA AUXILIAR DE VAPOR.....	130
10	CONCLUSIONES	141
10.1	RED DE DISTRIBUCIÓN DE GN	141
10.2	INSTALACIÓN DE USUARIO.....	141
10.3	CASOS DE USO INDUSTRIAL	142
11	REFERENCIAS	143
12	ANEXOS	145

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El hidrógeno verde es uno de los vectores llamados a ser clave dentro de los objetivos de descarbonización de la economía. Uno de los retos más importantes, además del aumento de capacidad de generación de hidrógeno verde, es la necesidad de crear la infraestructura para la distribución del hidrógeno desde el punto de generación hasta el punto de uso. Esta distribución del hidrógeno verde puede realizarse a través de hidroductos 100 % H₂, mediante la creación de nuevos valles de hidrógeno en área de alta concentración de demanda. La otra alternativa, complementaria con la anterior, consiste en utilizar la red de distribución de gas actual para realizar Blending de hidrógeno con gas natural hasta un 20%, como la opción más económica y segura, al margen de ser una opción de rápida implementación, en lo que a la disponibilidad de la red se refiere. En un futuro, el biometano irá desplazando el gas natural hasta disponer de una red que distribuya gas 100 % renovable.

Antes de realizar una inyección de H₂ verde en las redes de gas natural existentes es necesario estudiar cómo sería su comportamiento y cuáles serían las adecuaciones necesarias para poder llevarlo a cabo. El proyecto H2sarea, desarrollado en los últimos 3 años, pretende dar respuesta a estas cuestiones, analizando el comportamiento de una red de distribución de gas natural con diferentes niveles de blending con hidrógeno.

Cabe resaltar que el proyecto H2Sarea se enmarca en el 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 Compressors, Erreka, Fidegas, H2Site, Orkli, Tecnalia, Ikerlan y el Centro Nacional del Hidrógeno.

1.2 ALCANCE

El alcance del proyecto H2Sarea contempla el conjunto de pruebas y estudios realizados para validar el uso de la red de gas natural existente para la distribución de gas natural con mezclas del 20% de hidrógeno verde, así como la utilización final de este combustible por parte de los usuarios:

- Diseño y construcción de la plataforma H2LOOP, réplica de la red de distribución de Nortegas, que ha permitido llevar a cabo las pruebas necesarias para la validación del Blending en la red de distribución e instalaciones de usuario.
- Estudio de investigación de los materiales existentes en la red de distribución de Nortegas y sus usuarios y su compatibilidad con H₂ y sus mezclas con GN.
- Investigación asociada al diseño óptimo de la posición de inyección de hidrógeno y diseño de la posición de hidrógeno de H2Sarea.
- Incorporación al proyecto nuevas líneas de investigación para analizar instalaciones de una tipología no estandarizable, como son las instalaciones industriales. Diseño de dos casos de uso industriales para, en una primera fase, poder analizar este tipo de instalaciones, desde una perspectiva de análisis CFD.
- Colaboración con el resto de los socios del proyecto para los objetivos comunes de análisis de fijaciones inteligentes, separación de hidrógeno o de-blending, desarrollo de componentes para calderas 100 % H₂, sensórica adaptada a las necesidades del Blending
- Modificación del modelo matemático para adaptar las herramientas existentes para el análisis de la capacidad de la red de distribución con gas natural para su funcionamiento con mezclas de gas natural e hidrógeno o hidrógeno 100 %.
- Análisis de la capacidad de la red de distribución de Nortegas con mezclas incrementales de hidrógeno desde el 5 % al 30 % en volumen.

1.3 OBJETO

El objeto de este informe es exponer los resultados de las pruebas y estudios realizados en el proyecto H2SAREA por parte de Nortegas.

En el informe se presentan las pruebas y los resultados del estudio del comportamiento de una futura red de gas natural cuando se inyecten mezclas de hasta un 20 % hidrógeno y los cambios a implementar para hacerlo posible, tanto desde el punto de vista de seguridad y operación de la red. Asimismo, se detallan 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 una caldera y una cocina de gas natural. 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.

En el informe también se detallan 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. 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.

Finalmente se presentan los resultados del análisis de la capacidad de red existente de gas natural para la inyección de hidrógeno verde y las adecuaciones que es necesario realizar en la red para diferentes niveles de blending deseados. Este estudio se ha realizado por parte del experto equipo de Análisis de Red de Nortegas, adecuando las herramientas informáticas existentes en la compañía para el estudio de distribución de mezclas de gas natural e hidrógeno.

2 RESUMEN EJECUTIVO – CICLO DE PRUEBAS DE MEZCLA H₂/GN 30 %

Nortegas ha finalizado con éxito la cuarta fase de las pruebas del proyecto H2SAREA, para la investigación y evaluación de materiales, componentes y sistemas, que representa la red futura de distribución de mezclas o “Blending” de H₂ con GN, mediante la plataforma de investigación H2LOOP. Esta quinta y sexta fase se han realizado con un 25 y 30 % de mezcla de H₂ en GN, como continuación del resto de fases donde se realizaron las mismas pruebas con un 5, 10, 15 y 20 % de mezcla.

La plataforma de investigación está construida con elementos presentes en la red de distribución de GN de Nortegas, que han estado durante más de 20 años en servicio, con el fin de poder evaluar el impacto de la distribución de H₂ en Blending con el GN por las redes de Nortegas.

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

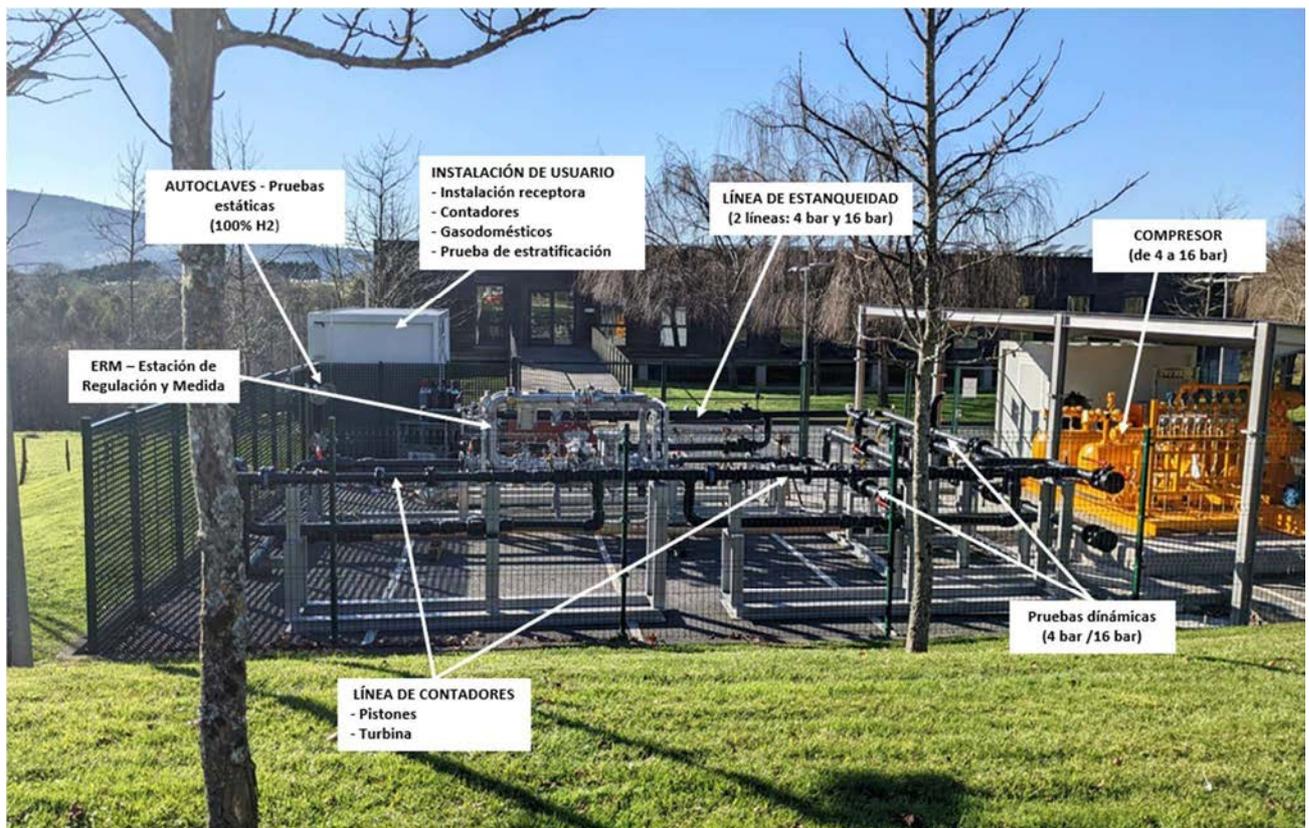


Figura 1. Plataforma de investigación H2LOOP.

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

- La red de distribución de GN

- Se ha comprobado el funcionamiento de la red de distribución de gas con una mezcla del 25 y 30 % H₂ con GN, durante 3.500 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 GN: 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 esta quinta y sexta ciclo de pruebas de Blending al 25 y 30 % de H₂, no se ha detectado ninguna incidencia ni fuga, en la red de distribución de gas por la acción del H₂ contenido en el GN.

Con estos resultados se puede concluir que las redes de distribución de GN están preparadas para distribuir mezclas de GN con el 30 % H₂.

- 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.



Figura 2. Contadores, caldera y cocina del H2LOOP.

- o Se ha realizado un exhaustivo análisis del comportamiento de la llama, no apreciándose cambios que deban ser tenidos en consideración.

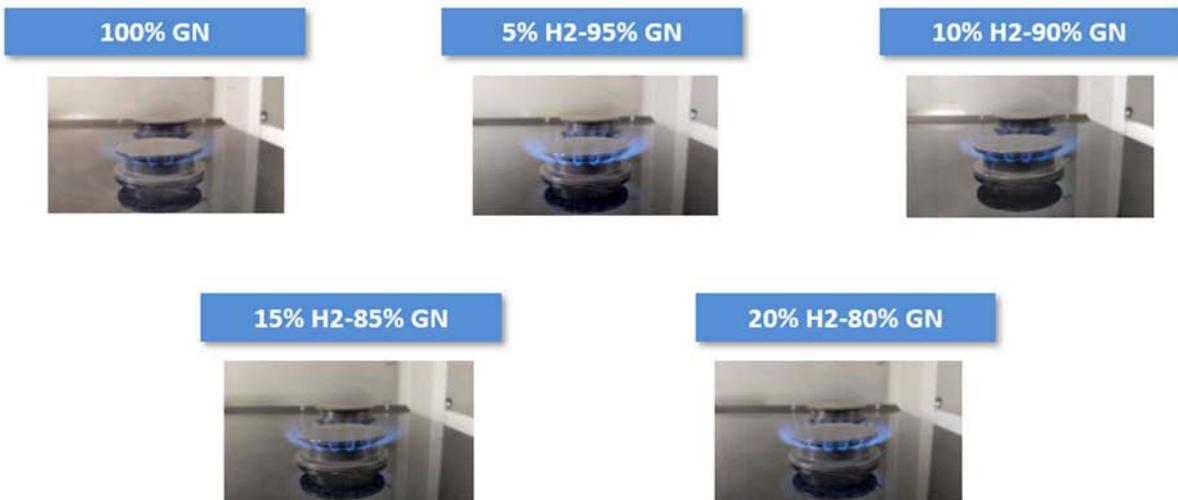


Figura 3. Llama de la cocina con diferentes mezclas de % H₂.

A lo largo de este cuarto ciclo de pruebas de Blending al 20 % de H₂, no se ha detectado ninguna incidencia ni fuga en las instalaciones de usuario y gasodomésticos, por la acción del H₂ contenido en el GN.

Con estos resultados se puede concluir que, en términos generales, las redes de usuario están preparadas para distribuir mezclas de GN con el 20 % H₂. Desde la perspectiva de distribución de GN, es fundamental entender las implicaciones que tendría la mezcla de GN con H₂ en los usuarios finales. El resultado satisfactorio de las pruebas realizadas nos permite estar cómodos respecto a la utilización de mezclas de 20 % de H₂ en GN 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 separarían el H₂ de su suministro. De esta forma, se puede aprovechar la posibilidad de descarbonización que ofrecen las mezclas de H₂ verde y GN sin impactar a dichos clientes. Cabe resaltar que la red de distribución de Nortegas no tiene conexiones internacionales de gas ni suministra gas a los grandes ciclos combinados de generación eléctrica.

- 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 GN con mezclas de H₂ 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, se ha simulado la combustión de diferentes mezclas de GN e H₂ 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 % GN 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 GN e H₂.
- Hasta el 30 % de H₂ no es necesario modificar los quemadores.
- La eficiencia térmica de la caldera apenas se ve impactada con mezclas de H₂ 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 de H₂.

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 H₂ en las actuales redes existentes de GN

Al inicio de las pruebas con el 10 % H₂ se validó y se puso en funcionamiento, tanto la acometida de GN, como la posición de inyección de H₂, mediante tecnología de inyección directa de H₂, la cual, previamente, había sido diseñado mediante simulación CFD (“Computational Fluid Dynamics”), tal y como se explica más adelante en el cuerpo del informe.

Esta instalación ha estado funcionando correctamente durante las 12.500 horas de las pruebas del 10 %, 15 %, 20 %, 25 % y 30 %.

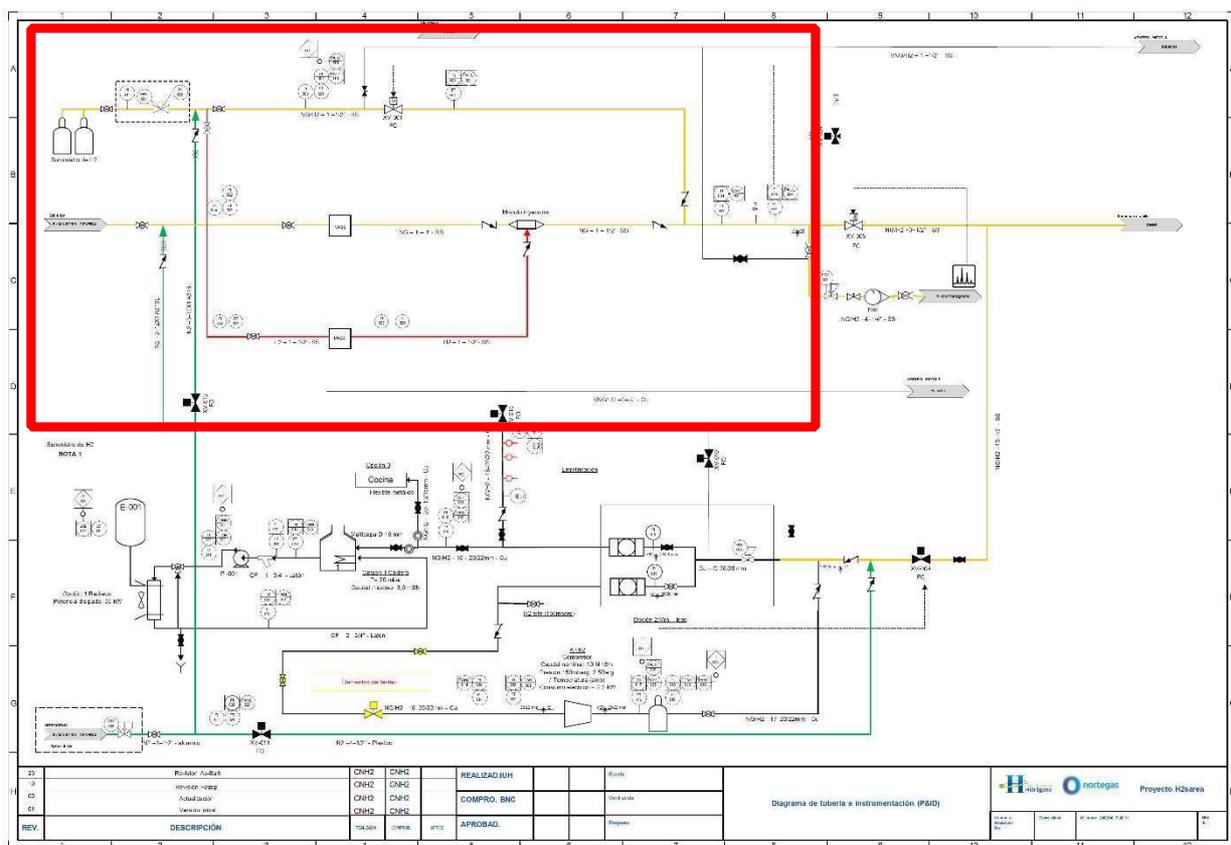


Figura 4. P&ID de la plataforma H2LOOP.

- Capacidad de la red de distribución de gas natural

El departamento de Análisis de Red de Nortegas ha realizado un estudio de las principales redes de distribución de Nortegas en el País Vasco.

Las principales conclusiones de este estudio son:

- Blending del 5% y del 10%

El incremento de caudal no supone un problema. La velocidad y presión experimentan pequeños cambios, manteniéndose en valores dentro del rango de operación.

- Blending del 20%

El incremento del caudal con el blending asciende a un 12% sobre el total. Por lo general, supone en ocasiones la ampliación o desdoblamiento de algunos tramos de red, en redes en las que no existen problemas de velocidad o presión previos:

- Araba: Ampliación o desdoblamiento de 537 metros de red y ampliación de 3 ERMs
- Bizkaia: Ampliación o desdoblamiento de 108 metros de red
- Gipuzkoa: Ampliación o desdoblamiento de 468 metros de red

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 GN actual y que se detallan en la Figura 5.

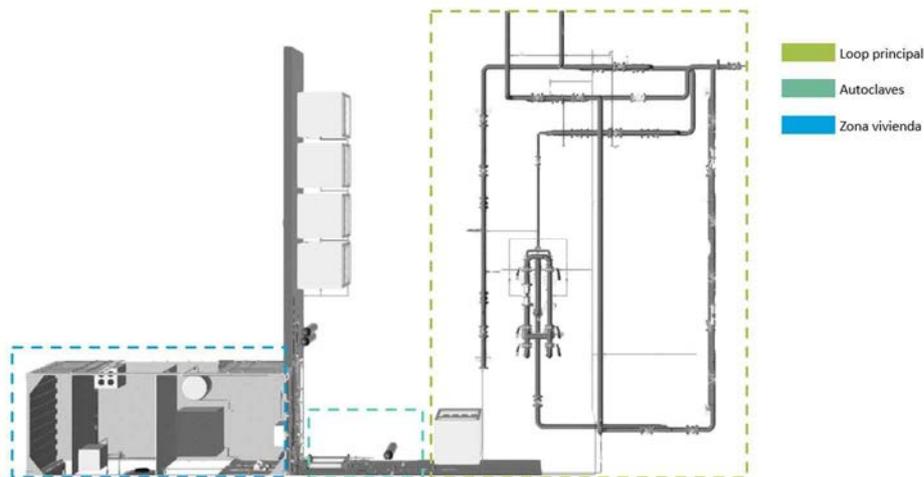


Figura 5. Esquema de las tres zonas principales del H2LOOP.

En la Figura 6 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 H₂ 100%, tanto en condiciones normales, como en

condiciones forzadas, que pueden simular un mayor tiempo de exposición o un nivel de estrés acelerado.

- o Adicionalmente, existen otra serie de instalaciones auxiliares que permiten que todos los elementos funcionen y se garantice el funcionamiento y seguridad del sistema.

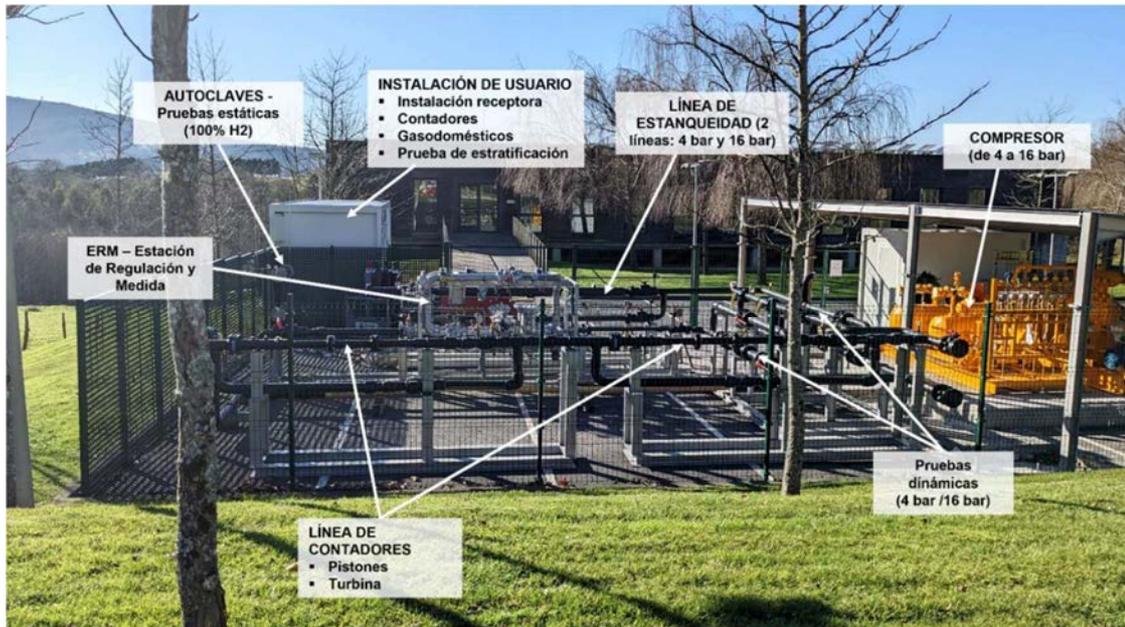


Figura 6. Vista general de la plataforma de investigación H2LOOP.

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 7). 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.

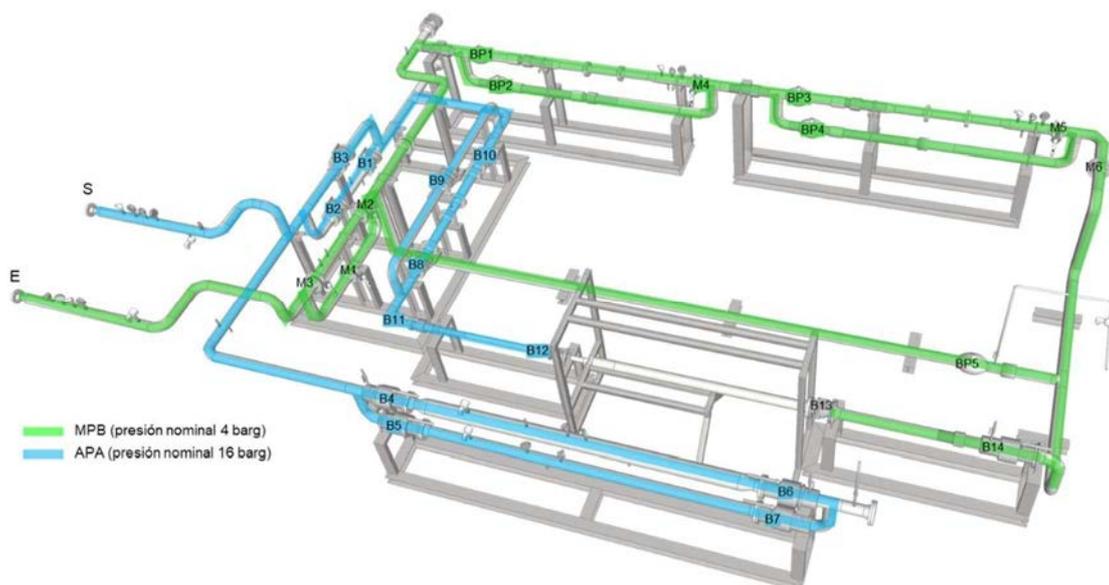


Figura 7. Esquema de las líneas de alta y baja presión LOOP principal.

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 GN.

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 8 y 9 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 10).



Figura 8. Válvulas de bola de acero en la línea de alta presión (referencias B1, B2 y B3).



Figura 9. Válvula de bola de acero a la entrada de la ERM (referencia B12).



Figura 10. 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 11 se muestran algunas válvulas de mariposa integradas en la línea de 4 bar.



Figura 11. 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 12 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.

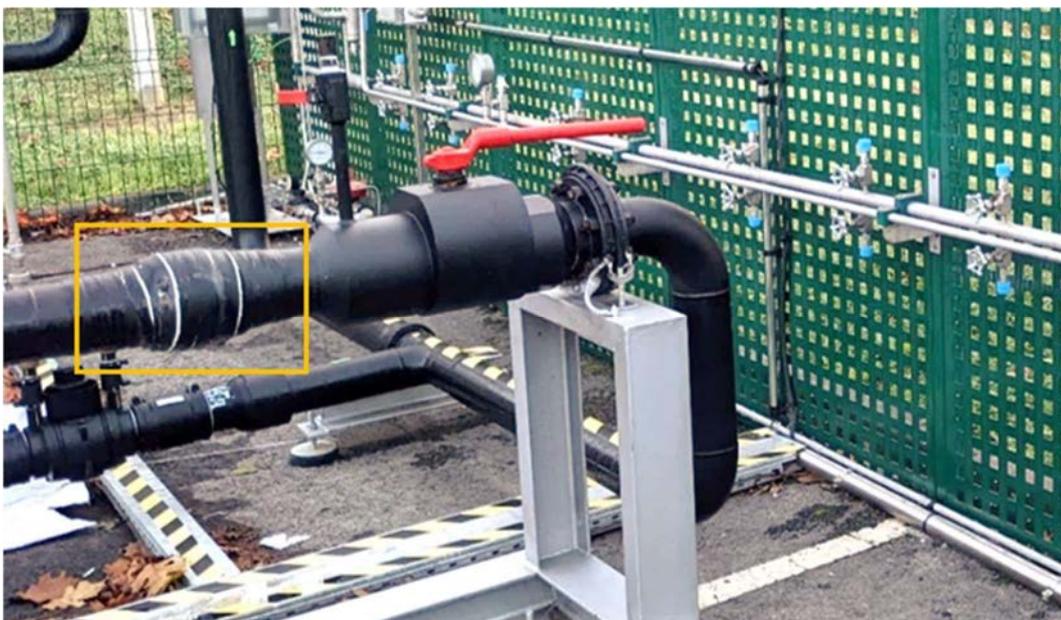


Figura 12. Junta dieléctrica a la salida de la ERM (línea 4 bar).

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 13 se muestran algunas válvulas de polietileno integradas en la línea de 4 bar.



Figura 13. 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 14 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.



Figura 14. 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 15 y 16), como se instalarían en una vivienda habitual.



Figura 15. Armario de regulación de vivienda (izq.) y contadores (dcha.).



Figura 16. Cocina de gas (izq.) y caldera de gas (dcha.).

4 CASOS DE ESTUDIO INDUSTRIALES

Los consumos de GN 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 ha 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 GN.
6. Análisis del impacto de las mezclas de H₂ e 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 H₂-GN.

En la Figura 17 se muestra la vista de mallado del horno utilizado en la simulación CFD con 2,5 millones de celdas.

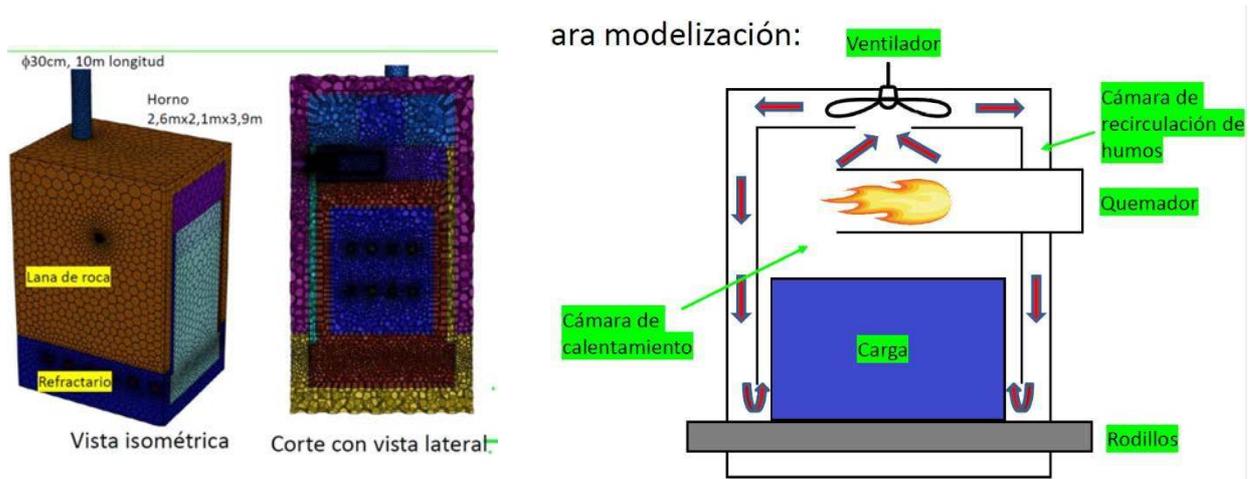


Figura 17. Vista de mallado de la simulación CFD.

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 3º haz de tubos, cámara de inversión, chimenea y aislamientos.



En la Figura 18 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.

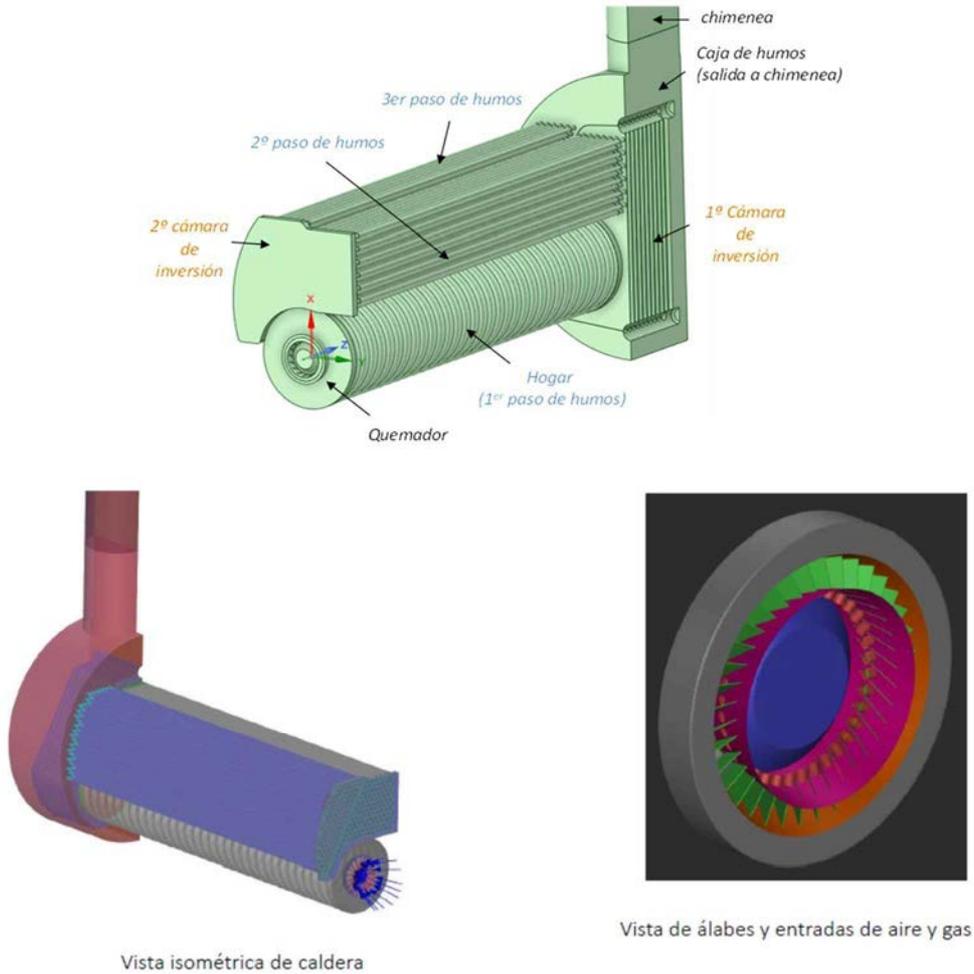


Figura 18. Vista de componentes contemplados para la simulación CFD.

5 PLAN DE PRUEBAS DEL H2LOOP

Se ha establecido un plan de pruebas para la primera fase que se llevará 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. H₂.
- Mezcla GN (red) 90 % vol. + 10 % vol. H₂.
- Mezcla GN (red) 85 % vol. + 15 % vol. H₂.
- Mezcla GN (red) 80 % vol. + 20 % vol. H₂.
- Mezcla GN (red) 75 % vol. + 25 % vol. H₂.
- Mezcla GN (red) 70 % vol. + 30 % vol. H₂.

Tanto el LOOP principal como la instalación de usuario operarán durante 3.000 horas con cada una de las mezclas (excepto para el 25 y 30 % H₂ que han sido 2.000 y 1.500 horas respectivamente) y para las cuales se han definido tres tipos de pruebas que se realizarán de manera periódica.

5.1 DETECCIÓN DE FUGAS

5.1.1 Objetivo

El objetivo de este estudio es evaluar si durante el periodo de operación se producen fugas de H₂ o un mal funcionamiento/respuesta en algún elemento del H2Loop e instalación de usuario. El H₂ es particularmente propenso a las fugas debido a su baja viscosidad y bajo peso molecular (las fugas son inversamente proporcionales a la viscosidad). Es por ello necesario evaluar la estanqueidad de la plataforma H2Loop. Se realizó un análisis exhaustivo de los componentes y se identificaron 552 puntos potenciales de fuga clasificados en 13 zonas que se muestran en la siguiente Figura 19 y Tabla 1.

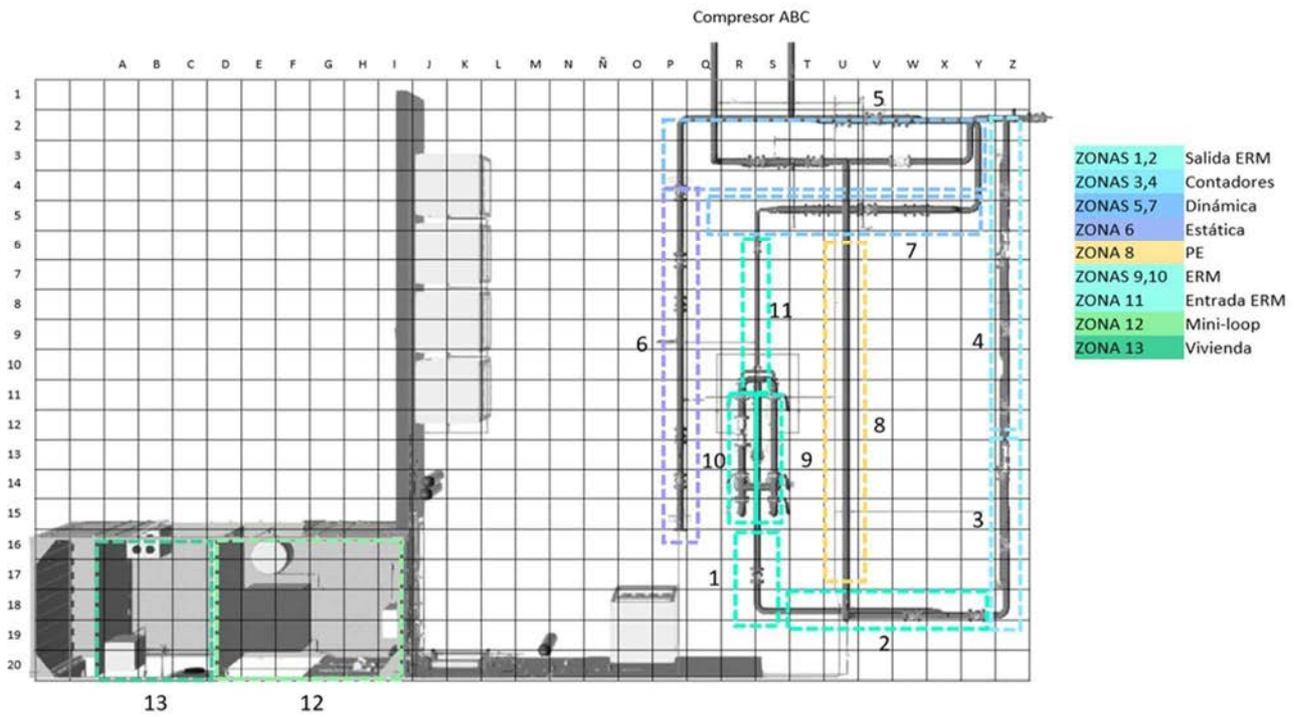


Figura 19. Clasificación de zonas de los puntos potenciales de fuga.

Tabla 1. Cantidad de componentes por Zona según Figura 19.

	Unión bridada	Soldadura	Junta dieléctrica	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 de emisión de burbujas. Las pruebas de burbujas para la localización de fugas son uno de los métodos no destructivos más utilizados debido a su simplicidad, rapidez y coste reducido.

Este método requiere una diferencia de presión para su correcto funcionamiento. En el H2loop, esta diferencia de presión está dada por la presión atmosférica (aproximadamente 1 bar) y la presión de la mezcla de gas (H₂ + GN) dentro de la tubería (3 ó 16 bares según a la sección que corresponda).

Para verificar la existencia de fugas, se coloca un líquido en contacto con el lado de menor presión. La fuga de gas puede detectarse observando la formación de burbujas en el líquido de detección (ej., agua jabonosa) o la presencia de una película líquida en los puntos de fuga. Este método proporciona indicaciones inmediatas de la existencia y ubicación de fugas grandes (10⁻² a 10⁻⁴ mbar.l/s). Puede requerirse un tiempo de inspección más largo para detectar fugas pequeñas (10⁻⁴ a 10⁻⁵ mbar.l/s). La velocidad de formación de burbujas, el tamaño de las burbujas formadas y la velocidad de crecimiento del tamaño de las burbujas proporcionan los medios para estimar el tamaño de la fuga.

Líquidos para burbujas y soluciones para espumas: Las pruebas de burbujas a menudo se clasifican según el líquido de prueba y el método de aplicación. En la técnica de inmersión en líquido, el sistema de prueba presurizado se sumerge en el medio de prueba (ej. agua). En el método de aplicación de película líquida, método utilizado en este proyecto, se hace fluir una capa delgada del medio de prueba sobre la superficie de baja presión del objeto.

Ventajas: Las pruebas de burbujas destacan por su simplicidad, velocidad y rentabilidad. Son sensibles y precisas para localizar fugas, incluso las pequeñas, sin necesidad de equipos complejos o sondas móviles. Para la inspección del H2Loop es una técnica adecuada debido a que permite inspeccionar componentes presurizados completos de manera simultánea sin haber interferencia entre las distintas fugas, como ocurre al utilizar métodos basados en sonido o ultrasonido.

Limitaciones: esta metodología es ampliamente utilizada en el sector gasista para la detección y reparación de fugas y no se utiliza para cuantificar tasas de fuga, para lo que existen otras técnicas más idóneas.

5.1.3 Periodicidad

El plan establecido para la detección de fugas se basa en las siguientes consideraciones: (i) la evidencia experimental de que las mezclas de gas 100 % H₂ presentan tasas de fuga similares que las mezclas de H₂/NG y el GN 100 % a presiones similares a la presión típica de distribución[1] (ii) el H2Loop trabaja con un bajo porcentaje de H₂ en la mezcla del gas (30 % máximo en volumen) (iii) el sistema opera a la intemperie, lo que hace que el gas no se acumule y que cualquier fuga de gas se mezcle con el aire, reduciendo así posibles riesgos de ignición. Debido a lo dicho anteriormente, se establece un programa de inspección de fugas similar a los establecidos para componentes de criticidad similar en instalaciones de GN: inspecciones cada 750 horas de funcionamiento para cada una de las mezclas de gas.

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 la fecha de la inspección, los operarios que realizan a cabo, la presión en las diferentes zonas y las fugas detectadas del H2LOOP. A continuación, se muestra una plantilla de ejemplo.

Sistema testeado (seleccionar de la lista):		ID	N° doc.	N° ficha	Rev.	H ₂ sarea
IF - Inspección de fugas		IF	H2SR-IF-C0,2-002	2	A	
Detalles de testeo						
Zona de testeo:	H2Loop y mini-loop				Campana (1; 5%; 10%):	20%
Fecha inicio:	09/10/2023	Presión (barg):	Alta: 14,1	Baja: 2,6	Estática: 3,5 / 1,8	Vivienda: 0,14
Fecha fin:	09/10/2023					Ref. procedimiento asociado: H2SR-PR-IF-A-001
Detalles:	No se han detectado fugas en ninguno de los 552 puntos que conforman el Loop principal (zonas 1-11), mini-loop (zona 12) y vivienda (zona 13).					
Información sobre el testeo						
La prueba de fugas se ha realizado acorde a la norma "EN 1593.1999 Ensayos no destructivos. Ensayos de fugas. Técnica de demisión de burbujas" y siguiendo el procedimiento H2SR-PR-IF-A-001.						
Coordenadas en plano:						
Próximos pasos						
Próxima inspección de fugas programada para el 6/11/2023						

ZONA	ID	Coordenadas en plano (ubicación)	Descripción	Sistema	Presión	Comentarios
ZONA 1	1		Union ERM salida contadores	Loop		
	2		Salida ERM	Loop		
	3		Union ERM salida contadores	Loop		
	4		Union ERM salida contadores	Loop		
	5		Union ERM salida contadores	Loop		
	6		Union ERM salida contadores	Loop		
	7		Union ERM salida contadores	Loop		
	8		Union ERM salida contadores	Loop		
	9		Union ERM salida contadores	Loop		
	10		Union ERM salida contadores	Loop		
	11		Union ERM salida contadores	Loop		
	12		Union ERM salida contadores	Loop		
	13		Union ERM salida contadores	Loop		
	14		Union ERM salida contadores	Loop		
	15		Union ERM salida contadores	Loop		
	16		Union ERM salida contadores	Loop		
	17		Union ERM salida contadores	Loop		
	18		Union ERM salida contadores	Loop		
	19		Union ERM salida contadores	Loop		
	20		Union ERM salida contadores	Loop		
	21		Union ERM salida contadores	Loop		
	22		Union ERM salida contadores	Loop		
	23		Union ERM salida contadores	Loop		
	24		Union ERM salida contadores	Loop		
ZONA 2	25		Union ERM salida contadores	Loop		
	26		Union ERM salida contadores	Loop		
	27		Union ERM salida contadores	Loop		
	28		Union ERM salida contadores	Loop		
	29		Union ERM salida contadores	Loop		
	30		Union ERM salida contadores	Loop		
	31		Union ERM salida contadores	Loop		
	32		Union ERM salida contadores	Loop		
	33		Union ERM salida contadores	Loop		
	34		Union ERM salida contadores	Loop		
	35		Union ERM salida contadores	Loop		
	36		Union ERM salida contadores	Loop		
	37		Union ERM salida contadores	Loop		
	38		Union ERM salida contadores	Loop		
	39		Union ERM salida contadores	Loop		
	40		Union ERM salida contadores	Loop		
	41		Union ERM salida contadores	Loop		
	42		Union ERM salida contadores	Loop		
	43		Union ERM salida contadores	Loop		
	44		Union ERM salida contadores	Loop		
	45		Union ERM salida contadores	Loop		
	46		Union ERM salida contadores	Loop		
	47		Union ERM salida contadores	Loop		
	48		Union ERM salida contadores	Loop		
49		Union ERM salida contadores	Loop			
50		Union ERM salida contadores	Loop			
51		Union ERM salida contadores	Loop			
52		Union ERM salida contadores	Loop			
53		Union ERM salida contadores	Loop			
54		Union ERM salida contadores	Loop			
55		Union ERM salida contadores	Loop			
56		Union ERM salida contadores	Loop			
57		Union ERM salida contadores	Loop			
58		Union ERM salida contadores	Loop			
59		Union ERM salida contadores	Loop			
60		Union ERM salida contadores	Loop			
61		Union ERM salida contadores	Loop			
62		Union ERM salida contadores	Loop			
63		Union ERM salida contadores	Loop			
64		Union ERM salida contadores	Loop			
65		Union ERM salida contadores	Loop			
66		Union ERM salida contadores	Loop			
67		Union ERM salida contadores	Loop			
68		Union ERM salida contadores	Loop			
69		Union ERM salida contadores	Loop			
70		Union ERM salida contadores	Loop			
71		Union ERM salida contadores	Loop			
72		Union ERM salida contadores	Loop			
73		Union ERM salida contadores	Loop			
74		Union ERM salida contadores	Loop			
75		Union ERM salida contadores	Loop			
76		Union ERM salida contadores	Loop			
77		Union ERM salida contadores	Loop			
78		Union ERM salida contadores	Loop			
79		Union ERM salida contadores	Loop			
80		Union ERM salida contadores	Loop			
81		Union ERM salida contadores	Loop			
82		Union ERM salida contadores	Loop			
83		Union ERM salida contadores	Loop			
84		Union ERM salida contadores	Loop			
85		Union ERM salida contadores	Loop			
86		Union ERM salida contadores	Loop			
87		Union ERM salida contadores	Loop			
88		Union ERM salida contadores	Loop			
89		Union ERM salida contadores	Loop			
90		Union ERM salida contadores	Loop			
91		Union ERM salida contadores	Loop			
92		Union ERM salida contadores	Loop			
93		Union ERM salida contadores	Loop			
94		Union ERM salida contadores	Loop			
95		Union ERM salida contadores	Loop			
96		Union ERM salida contadores	Loop			
97		Union ERM salida contadores	Loop			
98		Union ERM salida contadores	Loop			
99		Union ERM salida contadores	Loop			
100		Union ERM salida contadores	Loop			
101		Union ERM salida contadores	Loop			
102		Union ERM salida contadores	Loop			
103		Union ERM salida contadores	Loop			
104		Union ERM salida contadores	Loop			
105		Union ERM salida contadores	Loop			
106		Union ERM salida contadores	Loop			
107		Union ERM salida contadores	Loop			
108		Union ERM salida contadores	Loop			
109		Union ERM salida contadores	Loop			
110		Union ERM salida contadores	Loop			
111		Union ERM salida contadores	Loop			
112		Union ERM salida contadores	Loop			
113		Union ERM salida contadores	Loop			
114		Union ERM salida contadores	Loop			
115		Union ERM salida contadores	Loop			

Figura 20. Registro de detección de fugas. Ejemplo de plantilla utilizada.

Se registra en una tabla los 552 puntos potenciales de fugas divididos por zonas. La Figura 20 (abajo) muestra un ejemplo de los puntos analizados de las zonas 1, 2 y 3.

5.2 EVALUACIÓN DE VÁLVULAS

5.2.1 Objetivo

El objetivo de la prueba de válvulas es conocer si cada tipo de válvula integrada en la plataforma presenta algún problema en su funcionamiento al operar con una mezcla de GN con presencia de H₂. Las válvulas evaluadas se muestran en la Figura 21.

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7
Válvulas	BP1, M4	BP3 - M5	BP1, 2, 3, 4	BP3, 4 - M6	B5 - B7	B1 - B2	M2 – M3

B: válvula de bola, BP: válvula de bola PE, M: válvula de mariposa

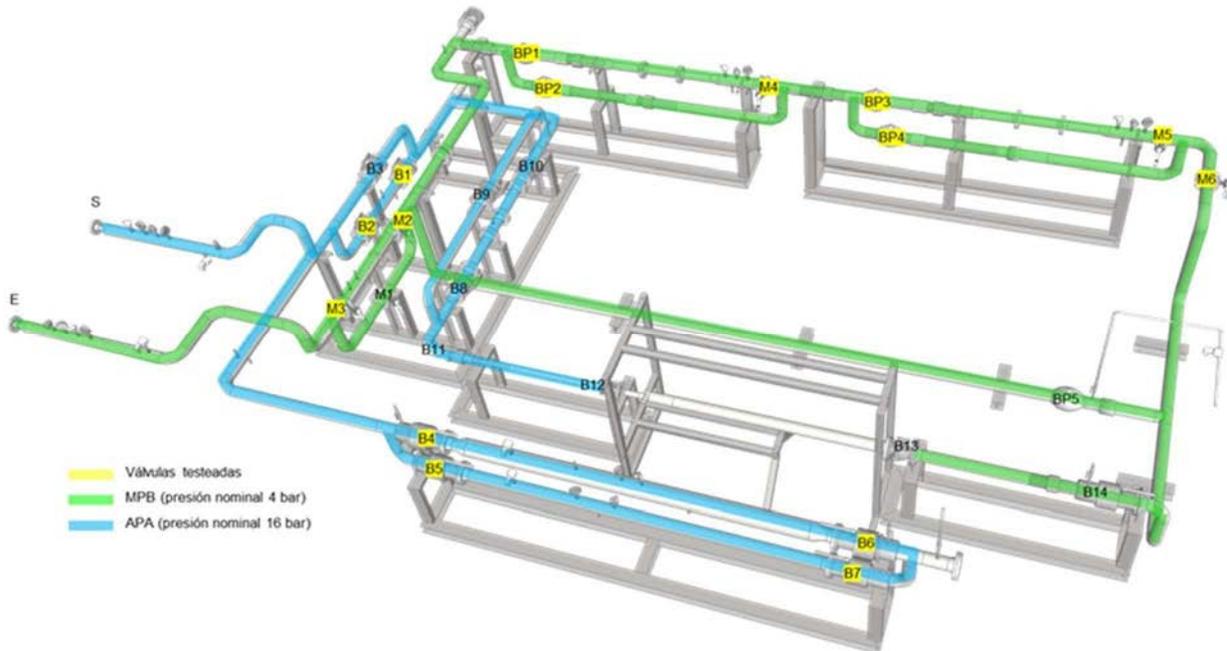


Figura 21. Válvulas integradas y testeadas en la plataforma H2Loop.

5.2.2 Procedimiento

ANSI/FCI 70.2 e IEC 534-4 son estándares que establecen varias clases de calidad de cierre de válvula, que van desde Clase I a Clase VI, y las diferentes condiciones de prueba para certificar esos niveles de fuga (ver Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de fugas según ANSI/FCI 70-2 e IEC 534-4.

Clase	Prueba	Fuga admisible(1)	Procedimiento
I			Se definen entre fabricante y usuario.
II	Aire o agua 10-50°C Presión entre 3-4 bar.; normalmente se hace con aire a 3,5 bar.	0,5% Cap. Nominal (5×10^{-3}) x Cap. Nom.	El fluido se aplica a la válvula con el obturador cerrado por el actuador a su alimentación requerida.
III	Idem.	0,1% Cap. Nominal (10^{-3}) x Cap. Nom.	Idem.
IV	Idem.	0,01% Cap. Nominal (10^{-4}) x Cap. Nom.	Idem.
IV-S1 (2)	Idem. Sólo en IEC 534-4	0,005% Cap. Nominal (5×10^{-6}) x Cap. Nom.	Idem.
V	*Agua 10-50°C a la presión diferencial real de trabajo *Aire-Nitrógeno 3,5bar-g	0,0005 ml./min. por pulgada de diámetro asiento por psi. de presión diferencial. 4,7 St. Ml/min. por cada pulgada de diá. orificio. (3)	Llenar el cuerpo de agua; aplicar presión de prueba. Cuando el líquido de fuga se ha estabilizado recogerlo en una bureta durante al menos 3 minutos.
VI (4)	Aire o Nitrógeno a la presión diferencial de trabajo o 3,5 bar., la que sea menor.	Burbujas/min. o bien ml/min. según tabla de la norma.	Las burbujas se medirán usando un tubo de 6mm diámetro exterior sumergido perpendicular en agua entre 3-6 mm

Aclaraciones:(1) Los valores porcentuales indican valores de admisibilidad respecto de la capacidad nominal de la válvula, en las condiciones de prueba. Valores en cursiva son los de la norma IEC 534-4.(2) La clase IV-S1 es 20 veces menor que clase IV. (3) IEC valora la Clase-V de otra manera. Con gas, por ejemplo, fuga= $10,8 \times 10^{-6} \times D$ asiento (mm) x capacidad nominal de la válvula, en Nm³/h. (4) La clase VI generalmente va asociada a un cierre "resilient seating", es decir elástico (como el PTFE) o metálico con cierta capacidad de recuperación.

El procedimiento para realizar la prueba de válvulas instaladas en el H2LOOP consiste en aislar, despresurizar y luego monitorizar la variación de presión y temperatura del tramo de válvulas de la prueba seleccionada. Para ello, en primer lugar, se circula el gas por un bypass para no crear sobrepresiones al cerrar las válvulas implicadas para cada prueba. En segundo lugar, se cierran las válvulas implicadas en cada prueba y se despresuriza dicho tramo hasta presión atmosférica. Se hace el cero del medidor de presión digital y se conecta al tramo de tubería despresurizado. De esta forma, en cada prueba se tienen válvulas con el gas a presión por un lado de la válvula y sin presión por el otro lado de la válvula. Debido a que ninguna válvula es 100 % estanca, se registra la presión y temperatura en la zona despresurizada

durante un tiempo y se compara el aumento de presión para la mezcla de H₂/GN a diferentes % H₂ (hasta un 30 % H₂).

La duración de cada parte de las pruebas viene definida por el diámetro de tubería y longitud del tramo. Los valores de presión en la zona despresurizada se registrarán mediante un manómetro digital (MD) para determinar la estanqueidad de las válvulas. El manómetro digital utilizado es el DruckTest GaWa EX que tiene una precisión de 2 mbar.

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

Para cada válvula evaluada, se mide la duración del ensayo y el cambio de presión al momento del inicio y del fin del ensayo, así como la variación de temperatura.

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 22). Se revisará 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 22. Componentes de la ERM.

Los elementos que componen la ERM y que se muestran en la Figura 22 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.

5.3.2 Procedimiento

El procedimiento corresponde al que se lleva a cabo por los técnicos de mantenimiento de Nortegas 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.

		MANTENIMIENTO PREVENTIVO ERM / ESC						62 - 12	
		ERM / ESC:		ERM H2 SAREA (LOOP) - 15% H2				14/07/2023	
CONTROL ERM			LINEA			CORRECTIVO		OBSERVACIONES	
Nº O.T.:	N/A	A	B	C	SÍ	NO			
Presión Entrada: MOP (bar)	> 16 >5 a 16 ≤ 5	13,8	13,8						
Presión diferencial filtro (bar)	< 0.5	0	0						
Presión Salida: MOP (bar)	> 16 >5 a 16 ≤ 5	2,67	2,40				Regulador Monitor Línea "A": 3,00 bar Regulador Principal línea "A": 2,60 bar VES Línea "A": 3,25 bar / VIS Línea "A": 3,50 bar Regulador Monitor línea "B": 3,00 bar Regulador Principal línea "B": 2,40 bar VES Línea "B": 3,75 bar / VIS Línea "B": 4,00 bar		
Obra Civil	Correcto / Incorrecto (C/I)						NO APLICA		
Obra mecánica	Correcto / Incorrecto (C/I)						NO APLICA		
Estanquidad	Correcto / Incorrecto (C/I)	BIEN	BIEN						
Revisión extintores	Correcto / Incorrecto (C/I)						NO APLICA		
Autoconsumos	Nº contador:	SN/ 80112152 / 2014				Lectura:	772873 M3		
MANTENIMIENTO ERM						SÍ	NO	OBSERVACIONES	
Nº O.T.:									
Edificio (Tejado, canalones, vallados, salas, etc.)								NO APLICA	
Armarios eléctricos/electrónicos (CC, control, calderas, dis. incendios, e						BIEN			
Equipos mecánicos (Circuito: agua, calderas, grupo electrógeno)								NO APLICA	
MOV (Control estanquidades, engrase, pintura, etc.)								NO APLICA	
Señalización						BIEN			
Revisión de EPI's								NO APLICA	
Medición de tierras						BIEN		1,47 OHM	
Equipotencialidad						BIEN			
Cumplimiento de los circuitos de SI según normativa ATEX						BIEN			
Estanquidades en regulación y seguridades de línea						BIEN			
Estanquidades en regulación y seguridades de línea fuel gas									
Filtro Sucio (Sí / No)						SI		TRASLADO FILTROS DE AUTOCLAVE A ERM	
Maniobra de válvulas.						BIEN			
CÓDIGO APARATOS INSPECCIÓN									
510.002.028		/	/	/	/	/	/	/	
REALIZADO/NOMBRE:	ANGEL GRANDE / JON ORTUONDO				REVISADO/NOMBRE:	GOTZON GARCÍA			
FIRMA:					FIRMA:				
FECHA:	14/07/2023				FECHA:	17/07/2023			
Tipos de Anomalías:		A - Correctivo obra civil		/ B - Correctivo obra mecánica		/ C - Correctivos varic			

PRUEBAS ALARMAS CON TELECONTROL															
SEÑALES DIGITALES				BIEN	MAL	SEÑALES ANALOGICAS				BIEN	MAL				
Fallo de fase						Presión Gasoducto Transporte									
Grupo electrógeno						Presión línea en servicio			BIEN						
Baja tensión de baterías						Presión línea en reserva									
Detección de gas						Temperatura de salida			BIEN						
Detección de incendios						Caudal corregido línea en servicio			BIEN						
Térmico bomba						Caudal corregido línea en reserva									
Fallo caldera/Baja Temperatura agua						Protección catódica									
Presostato						Presión de entrada			BIEN						
VIS L.A.					BIEN	Presión de salida									
VIS L.B.					BIEN	Caudal corregido									
Fallo corrector						Detección de gas									
Fallo auto vigilancia						Nivel THT									
Mando estación						PT2									
MOV's						PT4									
Puerta abierta armario															
Intrusión															
Cambio línea, selección de correctores															
Filtros sucios					BIEN										
Válvulas de líneas															
Inundación															
Fallo unidad de Odorización															
Fallo Compresor															
Fallo técnico video vigilancia															
OBSERVACIONES:															
CÓDIGO APARATOS INSPECCIÓN															
510.002.028 / / / /															
REALIZADO/NOMBRE:				ANGEL GRANDE / JON ORTUONDO				REVISADO/NOMBRE:				GOTZON GARCÍA			
FIRMA:								FIRMA:							
FECHA:				14/07/2023				FECHA:				17/07/2023			
Tipos de Anomalías:															
A - Correctivo obra civil / B - Correctivo obra mecánica / C - Correctivos varios															

Figura 23. Ficha de inspección del ERM.

5.4 PRUEBAS DE EQUIPOS PRESENTES EN INSTALACIONES DE USUARIO

5.4.1 Objetivo

El objetivo de esta prueba es estudiar el comportamiento de las instalaciones de un usuario tipo doméstico con mezclas de GN e H₂, hasta el 20 % H₂. Para ello, se ha estudiado el efecto de la mezcla de gases en contadores, cocina y caldera de GN.

Se ha evaluado el rendimiento de los dos tipos de contadores mecánicos y ultrasónicos con diferentes mezclas de gases y se ha realizado un análisis del funcionamiento con diferentes condiciones límite (temperatura y presión), y de la precisión de la medición con cambios en el caudal.

En las pruebas de la cocina y caldera se comprobará el funcionamiento de los equipos gasodomésticos (caldera y cocina), eficiencia de la caldera, composición de gases de combustión y consumo de combustible.

5.4.2 Procedimiento

A continuación, se describe el procedimiento para cada caso de estudio.

5.4.2.1 Contadores

Se han realizado pruebas con contadores inteligentes ultrasónicos y de membrana en colaboración con un fabricante de contadores (Ver Figura 24) donde se han evaluado el funcionamiento de los contadores a diferentes rangos de medida y con diferentes niveles de Blending.

El objetivo de las pruebas realizadas ha sido evaluar el rendimiento y la compatibilidad de contadores con diferentes mezclas de gases. La prueba ha consistido en verificar que los contadores de gas Sagemcom mantienen su precisión metrológica en mezclas con 10 % y 15 % de H₂ en volumen. Además, esta prueba también permite comparar los diferentes contadores y detectar cualquier diferencia significativa en su comportamiento.

Las pruebas se han llevado a cabo en remoto con 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 24. Línea contadores inteligentes ultrasónicos y de membrana.

Tal y como se observa en la Figura 24 se han colocado 4 contadores de cada tipología en dos líneas diferentes F1 y F2. Los contadores utilizados son los contadores de gas Sagemcom EF4EVO (modelo inteligente con tecnología de medición mecánica de volumen por membrana) y ES4EVO (modelo inteligente con tecnología de medición de caudal por ultrasonidos).

En el anexo 4 se muestran las principales características técnicas de los contadores sometidos a prueba.

En la siguiente tabla se muestran los test realizados donde se fijan diferentes caudales en cada línea de contadores (F1 y F2) para las dos mezclas de gases estudiadas, 90 %-10 % y 85 %-15 % de GN y H₂, respectivamente.

Tabla 3. Test realizados a los contadores con mezcla de gases con 10 % y 15 % de H₂.

Test		1	2	3	4	5	6	7
90 % GN 10 % H ₂	Caudal en línea F1 (m ³ /h)	3,70	2,90	2,00	1,00	0,12	0,95	
	Caudal en línea F2 (m ³ /h)	0,12	1,00	2,00	2,95	3,90	2,95	
85 % GN 15 % H ₂	Caudal en línea F1 (m ³ /h)	1,00	1,02	0,11	0,98	1,98	3,02	4,02
	Caudal en línea F2 (m ³ /h)	1,00	3,09	3,99	3,02	2,01	1,03	0,11

5.4.2.2 Cocina de GN

La instalación H2Loop cuenta con una cocina de GN de las siguientes características:

- Marca: SIEMENS
- Modelo: HSG6G6FQ00
- Potencia: 7,5 kW
- Tipo Certificado: Marcado CE
- N° de Serie: ER6A6PB70S/01

Asimismo, el H2Loop está equipado con reguladores de caudal de GN e H₂, que permiten seleccionar el volumen deseado de cada combustible y preparar las mezclas GN / H₂ para las pruebas de funcionamiento.

Para validar el correcto funcionamiento de la cocina, se ha probado su encendido y operación con las siguientes composiciones de combustible en volumen:

- 100 % GN
- 95 % GN / 5 % H₂
- 90 % GN / 10 % H₂
- 85 % GN / 15 % H₂
- 80 % GN / 20 % H₂

Para determinar la concentración de H₂ existente en la mezcla de combustible se ha utilizado el analizador de H₂ HY-OPTIMA 2740 que se muestra a continuación.



- | | |
|--|--|
| 1. Entrada de muestra | Racor 1/4" OD |
| 2. Entrada de gas de calibración | Racor 1/4" OD |
| 3. Filtro de partículas de acero, 60 µm | SS-4TF-60 (elemento filtrante SS-4F-K4-60) |
| 4. Válvula de 3 vías, 1/4" | |
| 5. Regulador de presión, entrada 0 – 10 bar; salida 0 – 600 mbar | |
| 6. Rotámetro 0,2 – 2,6 l/min | |
| 7. Analizador de hidrógeno H2Scan Modelo HO 2740 | |
| 8. Salida de muestra | Válvula de 2 vías, 1/4" |
| 9. Caja de conexiones | |

Figura 25. Analizador de H₂ HY-OPTIMA 2740.

5.4.2.3 Caldera de GN

La instalación H2Loop cuenta con una caldera de GN de las siguientes características:

- Marca: WINDSOR
- Modelo: WINDSOR 40R
- Potencia: 24 kW
- Tipo Caldera: Caldera de Condensación
- Tipo Certificado: Mercado CE
- N^o de Serie: 51BS3495

En el caso de la caldera, además de validar el correcto funcionamiento comprobando la producción de agua caliente para calefacción, se va a estudiar la eficiencia de la caldera y la composición de los gases de combustión para las diferentes mezclas de blending.

Para hacer este estudio se ha utilizado una sonda SICA-230 de la marca Sauerman, calibrada según el documento del anexo, que permite medir la composición y temperatura de los humos de la caldera de GN.

Para determinar la concentración de H₂ existente en la mezcla de combustible se ha utilizado el analizador de H₂ HY-OPTIMA 2740 que se muestra a continuación.

Para determinar la energía útil producida en la caldera se cuenta con un caudalímetro y sondas de temperatura calibradas a la entrada y la salida de la caldera.

Para la toma de datos en la caldera se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- Encender la caldera utilizando la mezcla de gases deseada
- Mantener en funcionamiento 2 minutos
- Realizar primera toma de datos:
 - Consumo combustible
- Mantener en funcionamiento 5 minutos
- Realizar segunda toma de datos:
 - Consumo combustible
 - Medición de humos

5.5 ENSAYOS DE COMPATIBILIDAD DE MATERIALES EN AUTOCLAVES

5.5.1 Objetivo

El objetivo del estudio de compatibilidad de los materiales es conocer si las principales propiedades mecánicas de los materiales se modifican al estar en contacto con mezclas que contienen H₂.

5.5.2 Procedimiento

De cara a la evaluación de los diferentes materiales presentes en la red de distribución para su trabajo con H₂, se realizaron ensayos acelerados en autoclaves de gas diseñados para operar a 16 bar con mezcla de H₂ y metano (3000 horas) y 100 % H₂ (1000 horas).

En esta etapa del proyecto se realizaron las siguientes actividades:

- Identificación de los materiales que existen dentro de la red de distribución de Nortegas (Tabla A1, Anexo)
- Identificación 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 H₂ gas.

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

1. Preparación de probetas, de acuerdo a la norma que aplique para cada componente/material.
2. Caracterización de materiales estado de recepción.
3. Exposición de probetas a mezclas GN+H₂ y 100 % H₂
4. Caracterización de materiales tras la exposición.
5. Análisis de resultados y conclusiones.

5.5.3 Identificación de los principales mecanismos de degradación

Materiales Metálicos

En general la literatura se reportan resultados experimentales y fundamentes teóricos acerca de la compatibilidad de materiales metálicos en atmósferas de H₂. La compatibilidad se demuestra mediante la comparación de ensayos de tracción en ambientes inertes con los de ambientes con H₂. Este es un ensayo que permite entender la aptitud de los materiales para poder trabajar en H₂.

Para evaluar la vida útil de los componentes una vez en servicio es necesario monitorear e inspeccionar las tuberías en busca de posibles defectos. La tenacidad a la fractura y el crecimiento de grieta por fatiga, junto con la información proveniente de las inspecciones de la línea, permiten evaluar los márgenes de seguridad en las condiciones de operación establecidas.

A continuación, se reportarán las observaciones reportadas en la literatura en relación a la compatibilidad de los materiales metálicos más utilizados en redes de distribución.

Tubería de acero al carbono:

De acuerdo con la bibliografía analizada este tipo de materiales se fragiliza en atmósferas de 100% H₂, Figura 26, incluso a presiones relativamente bajas, aunque no se aprecia incompatibilidad de las principales aleaciones empleadas (ej., X42, X50, X52 o X60) con presencia de H₂ hasta porcentajes de aproximadamente un 25% de H₂ en la mezcla H₂ +GN [2], [3].

Se considera necesario evaluar la compatibilidad de estos materiales tras su vida en servicio, considerando entre otras cosas, la influencia de soldaduras, daños mecánicos, corrosión, en contacto con mezclas de H₂ [4], [5].

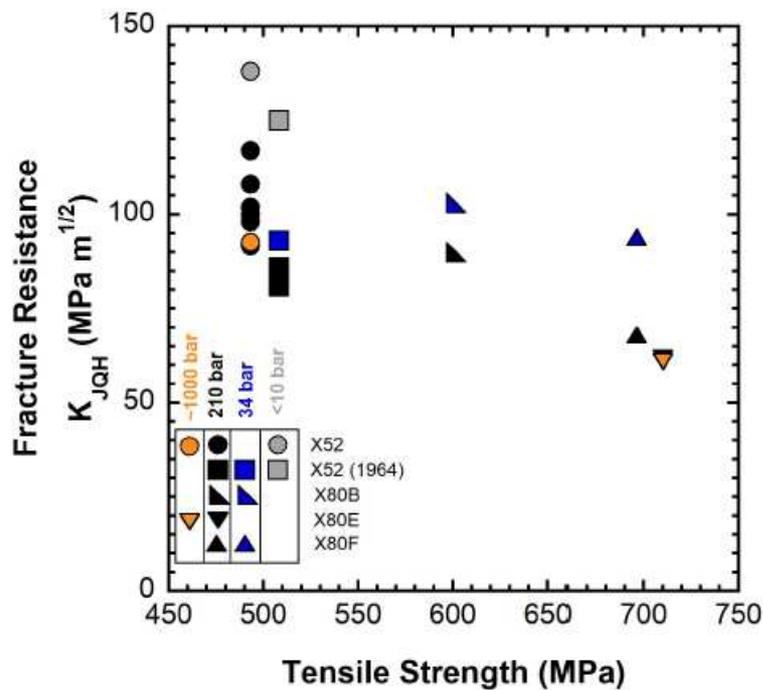


Figura 26. Correlación entre la resistencia a la tracción y la tenacidad a la fractura en ambientes de 100% H₂ a presión.

Tubería de fundición dúctil:

Según la información recogida se trata de tramos de la red de distribución de GN con características de trabajo concretas (cascos históricos, presiones de servicio limitadas).

De acuerdo con la bibliografía, la fundición dúctil se considera no adecuado para el servicio con H₂ al 100%. No se han encontrado estudios que permitan determinar si son compatibles con mezclas H₂+GN., por lo que es necesario analizar su comportamiento con mezclas GN+H₂, considerando las condiciones de trabajo de estas redes, así como concretar tipos de fundición, calidad, etc.

Tubería de cobre:

Teóricamente el cobre y sus aleaciones no son susceptibles de sufrir fragilización por H₂, Figura 27 a) y b). Sin embargo, es necesario evaluar principalmente las uniones (soldaduras) y posibles degradaciones que puedan haber sufrido este tipo de tuberías en servicio por si éstas puedan influir en la susceptibilidad del componente a sufrir fragilización por H₂

Otros componentes metálicos:

Existen componentes fabricados con materiales que pudieran ser susceptibles a la fragilización por H₂, principalmente aceros inoxidable martensíticos (301 SS, 304SS) y ferríticos (406SS, 440SS), Figura 27. Estos materiales no se encuentran dentro del alcance de este análisis, por lo que deberán estudiarse en caso de considerarse necesario.

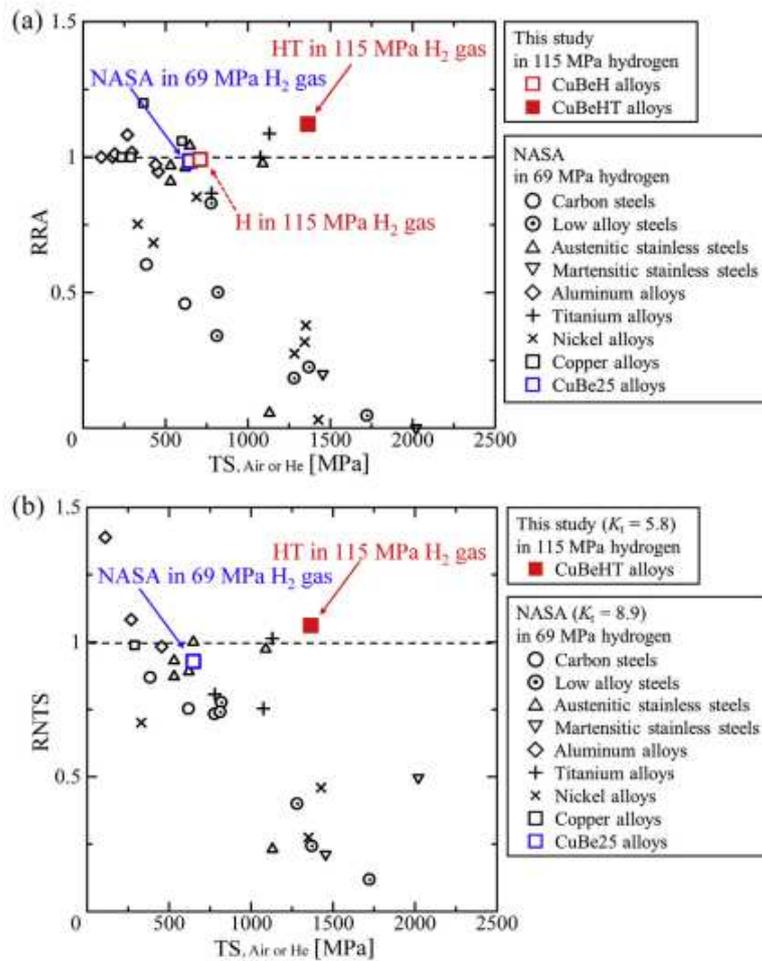


Figura 27. Dependencia de la resistencia a la tracción (TS) en función de la reducción relativa del área (RRA) y la resistencia relativa a la tracción en la probeta enallada (RNTS): (a) RRA a temperatura ambiente, (b) RNTS a temperatura ambiente.

Materiales no metálicos

Productos que existen en la red de NORTEGAS: tubería y juntas. Principales aspectos que considerar: Degradación de propiedades mecánicas y Permeación de H₂ (blistering).

Tubería de Polietileno:

Teóricamente los grados de polietileno empleados en la red de distribución no son susceptibles de sufrir degradación por contacto con H₂ [6].

Es necesario estudiar si la degradación u otras alteraciones que los materiales puedan sufrir en su vida en servicio, puedan influir en su comportamiento en contacto con H₂ [7].

De acuerdo con la bibliografía analizada, existe permeación de H₂ a través de tuberías de polietileno [8].

Juntas:

No se dispone de información sobre muchos de los materiales de las juntas actuales de la red de distribución. Tampoco se ha encontrado en bibliografía información sobre el comportamiento de materiales no metálicos en contacto con mezclas de GN e H₂ [6], [9]

De manera general las juntas se hallan en múltiples geometrías. La mayoría son materiales elastoméricos y no soportan cargas mecánicas elevadas ya que trabajan principalmente a compresión [6]. Los materiales elastoméricos pueden deformarse y tienen la capacidad de recuperar su forma original al liberarse de la carga mecánica [8]. Los materiales más habituales de juntas son; nitrilo, neopreno, poliacrilato, Viton, caucho de monómero etileno propileno dieno (EPDM).

Debido a la falta de información concreta, se consideró necesario realizar estudios concretos de las juntas existentes en la red de distribución de NORTEGAS en contacto con mezclas de GN e H₂.

5.5.4 Evaluación de la compatibilidad de materiales con H₂

El estudio de compatibilidad de los materiales se lleva a cabo mediante ensayos estandarizados empleando probetas extraídas de los componentes de la red de distribución 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 100 % H₂ y presión de 16 bar durante 1000 horas. Tras la exposición al H₂, se lleva a cabo la caracterización de las probetas expuestas mediante ensayos de deformación

lenta 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 H₂: Se determina el contenido de H₂ mediante conductividad térmica por fusión en gas inerte /detección infrarroja. El equipo en donde se analizaron las muestras es el analizador LECO TCH-600.

Se analizó el contenido de H₂ en muestras metálicas en estado de recepción y tras la exposición a H₂ y/o mezclas.

Metodología: para la determinación del contenido de las muestras tras la exposición a H₂, se prepararon muestras cilíndricas de diámetro 3 mm y longitud 10 mm y se expusieron a H₂. Tras la exposición se introdujeron en nitrógeno líquido para suprimir cualquier tipo de proceso difusivo activado por temperatura y se han extraído de éste inmediatamente antes del ensayo.

Fragilización por H₂: Para evaluar la susceptibilidad de los materiales a la fragilización por H₂ se desarrolló un método 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, Figura 28. 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 H₂ puro. Las probetas tras la exposición se almacenan en nitrógeno líquido. Mediante el 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. Si Z2/Z1 > 0,85, la fragilización del material es limitada y se considera apto para operar en las condiciones de presión de H₂ y temperatura del ensayo.

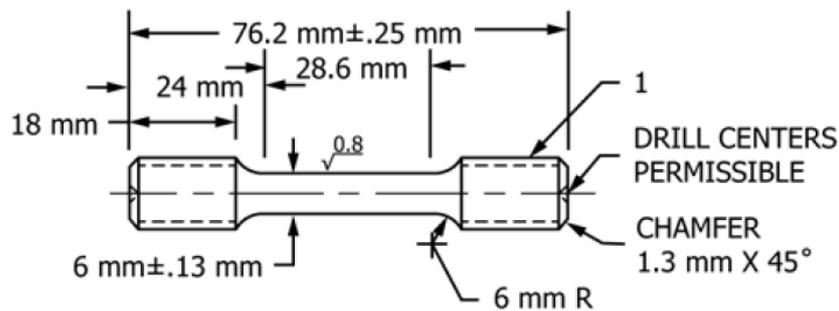


Figura 28. Probeta estándar sin entalla para ensayo de deformación lenta, según norma ASTM G142.

Caracterización microestructural y micro durezas

Se preparó una probeta metalográfica de una sección transversal del tubo en el caso de muestras 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 realizó según procedimiento interno de Tecnia. Una vez preparadas las probetas, se analizaron mediante microscopía óptica y se realizaron micrografías representativas de las principales observaciones que se lleven a cabo.

Se realizaron mediciones de microdurezas según EN ISO 6507-1 para las probetas sin soldadura y según ISO 9015-2 para las probetas con soldadura. En la Figura 29, se presenta un ejemplo de macro y micrografías de acero de tubería API 5L GRADO B para el estado de recepción (M1XAR) y luego de estar expuesto a 1000 horas en atmósferas de 100% H₂ a 16 bares (M1XH2). Se muestran macrografías de la soldadura, el valor medio obtenido de microdureza en cada una de las zonas de la soldadura - material aporte (A) y Zona afectada térmicamente (ZAT), así como detalles de la microestructura. Debido al enfriamiento extremadamente rápido que sufre el material en la zona de aporte (sin difusión), se produce una transformación martensítica del metal líquido. La morfología de unidades de martensita como placas lenticulares individuales (ver Figura 29) tiene una sub-estructura consistente de finas agujas. La formación de martensita proporciona una alta dureza y por lo tanto, es una microestructura más susceptible de fragilización en presencia de H₂. La microestructura de la zona afectada térmicamente (ZAT) presenta dos fases distinguibles, un grano de típicamente de austenita y zonas de precipitados en regiones cercanas a bordes de grano.

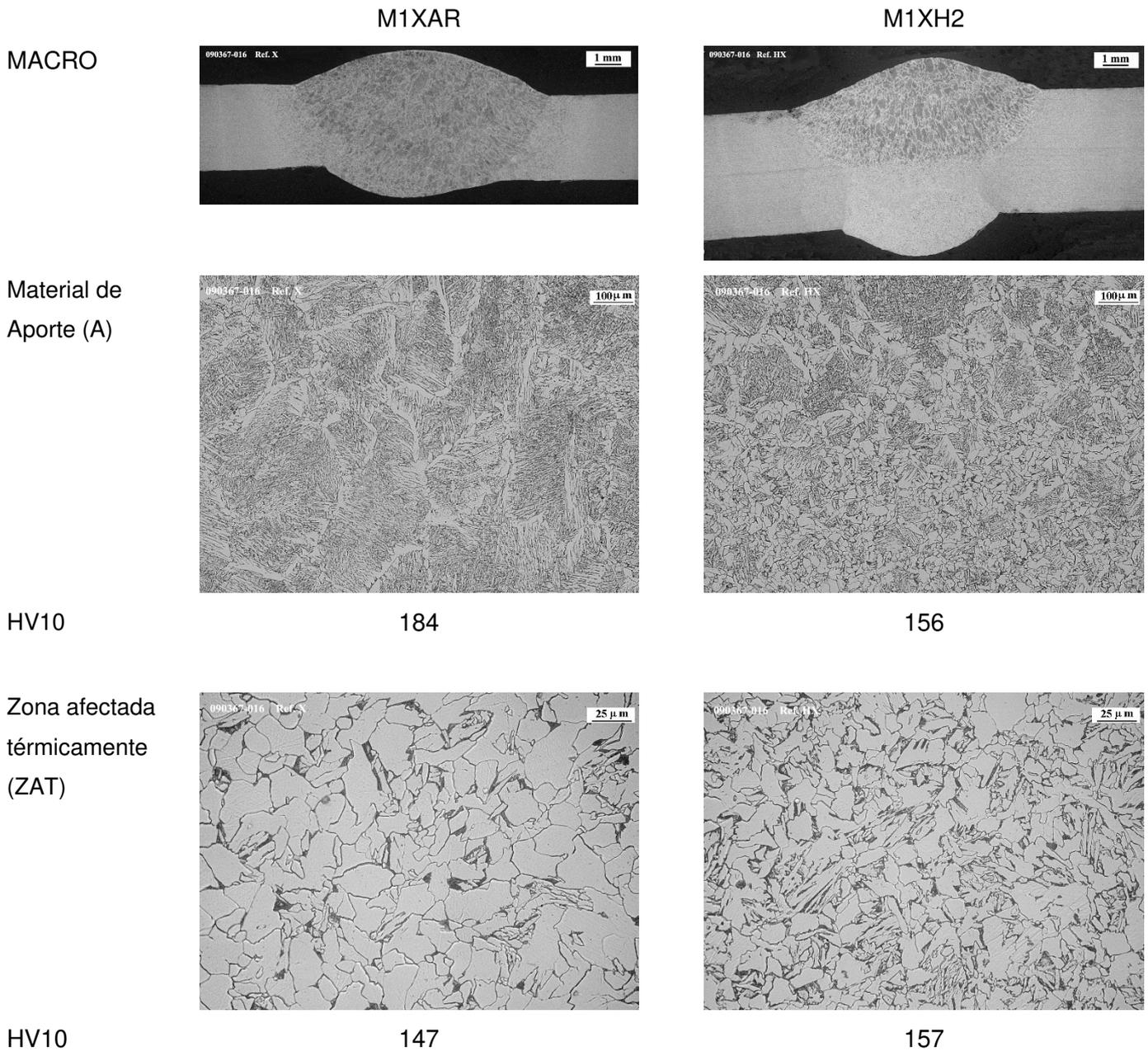


Figura 29. Macrografías, micrografías y microdurezas de acero de tubería API 5L GRADO B soldado.

Ensayo de compresión y medida de espesores.

En el ensayo de compresión, se evaluó la deformación remanente que presentan las juntas tras retirar una fuerza de compresión. Se evaluó si las juntas expuestas a H₂ sufren modificación de la capacidad de deformación. Para ello, se llevó 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.

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

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

Se realizaron seis campañas de pruebas en los autoclaves. En este informe se reportan los resultados de todas las campañas.

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 H₂, de cara a poder realizar las mezclas de H₂ y GN de forma automática partiendo de dos corrientes, una de GN y otra de H₂.

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 H₂.

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 provocarían 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

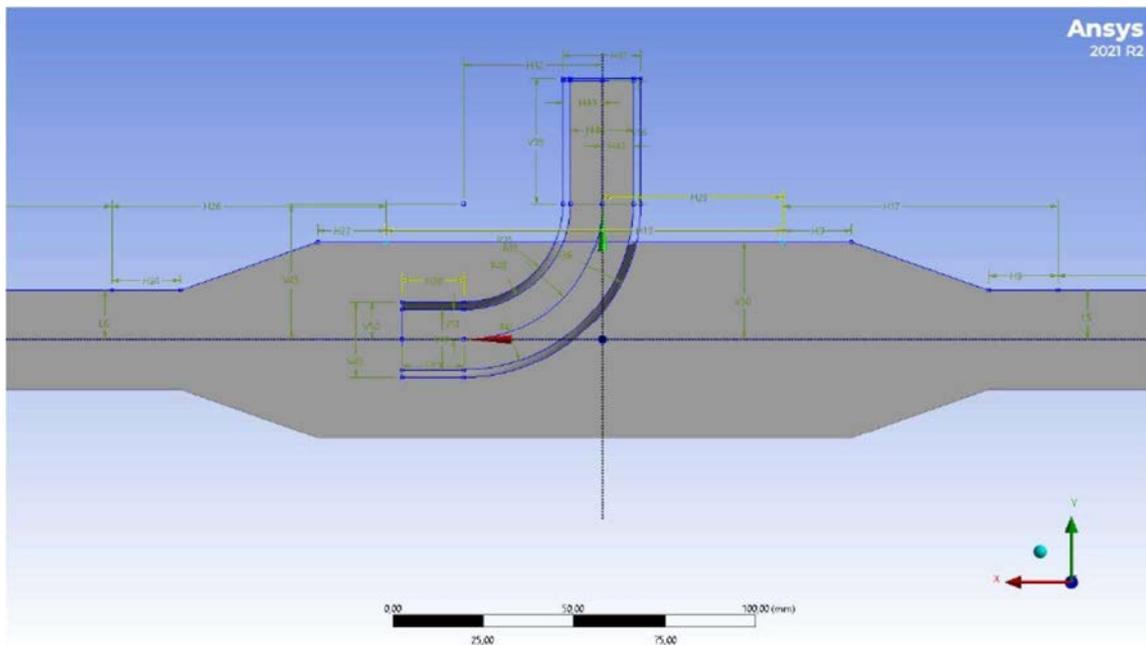


Figura 30. Geometría del módulo de inyección.

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

Tabla 4. Dimensiones de diseño optimizadas.

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

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 10 m. Dando como resultado que para todas las situaciones analizadas para un caudal de mezcla de 15Nm³/h trabajando a una presión de 3,5 bar 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.

Tabla 5. Resumen a la distancia que se obtiene el U-Index objetivo.

U-Index Objetivo	GN-5%H2	GN-10%H2	GN-20%H2	GN-30%H2
99,995 %	4,29 m	3,48 m	3,47 m	4 m

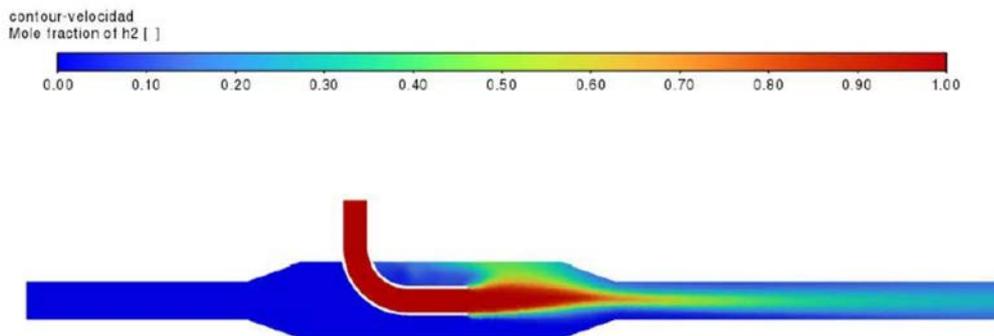
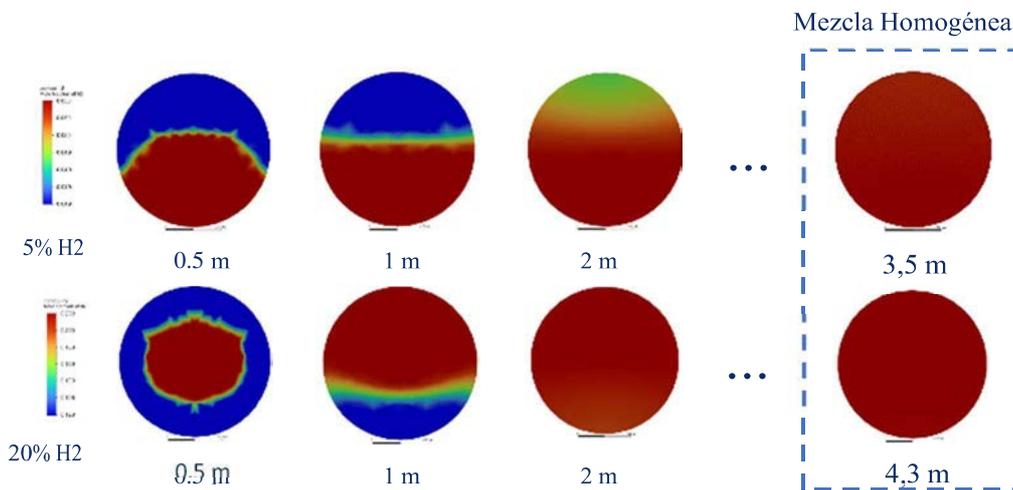


Figura 31. Simulación de la inyección con un 20 % de H₂.

- 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 %.

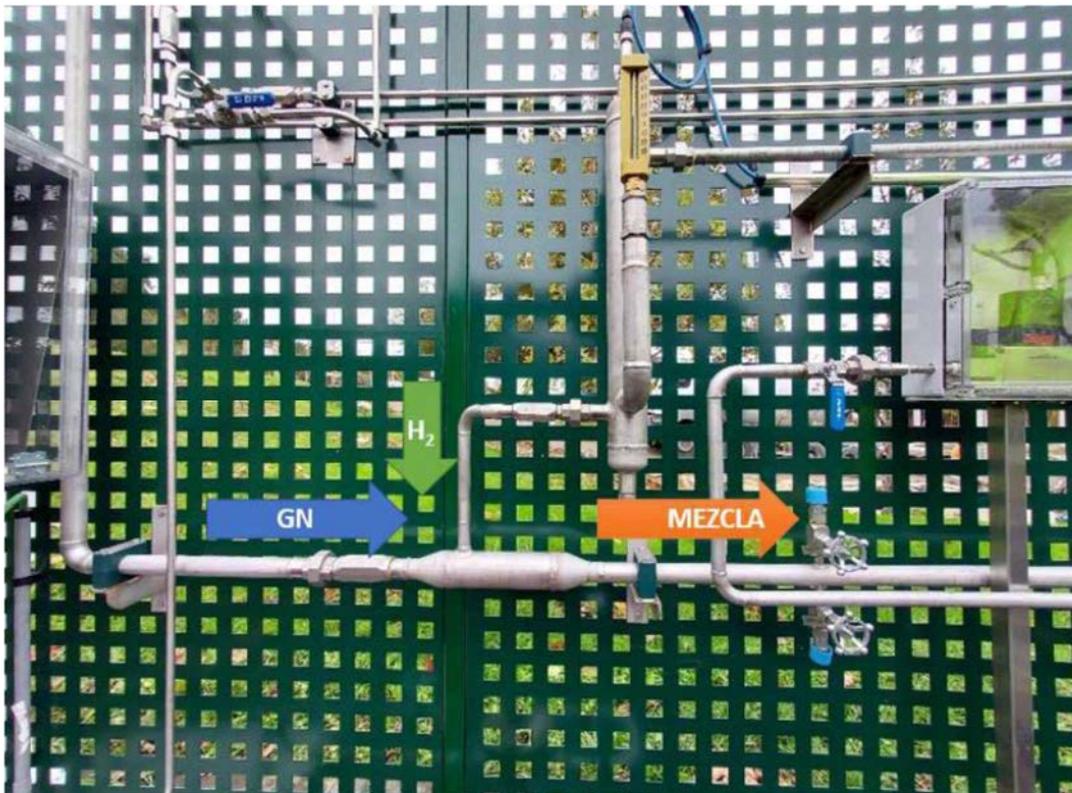


Figura 32. Punto de inyección de H₂ en GN.

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.

Se realizan las pruebas con mezclas desde el 5 % al 30 % de H₂ y se pretenden validar los datos obtenidos en el estudio de simulación CFD realizado:

- Informe de simulación: se obtiene mezclas homogéneas de GN + H₂, desde 5 % hasta 30 % H₂, a una distancia comprendida entre 3,5 y 4,3 m.



Figura 33. Puntos de muestreo y trabajos en campo con el analizador de H₂.

Los resultados experimentales: permiten demostrar que la mezcla de GN e H₂ es homogénea desde el 5 % hasta el 30 % de H₂, 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 H₂ es del 10 %, lo cual se verifica tras su llenado.

7 ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE RED DE DISTRIBUCIÓN

Para la misma demanda de energía de un usuario, es necesario vehicular el triple de volumen de hidrógeno que de gas natural. Debido a esta característica del hidrógeno, dentro del proyecto H2Sarea se incluyó la tarea de estudiar la capacidad de las principales redes de distribución de gas natural de Euskadi y qué medidas sería necesario adoptar para poder inyectar hasta un 20% de hidrógeno verde.

7.1 IDENTIFICACIÓN DE REDES

El primer paso de esta tarea ha sido la identificación de las principales redes de gas natural de cada provincia. Para la selección de las redes a estudiar se ha seguido el siguiente criterio:

- Redes de alta presión (redes de 16 bar)
- Redes de otros rangos de presión, según los siguientes factores:
 - Caída de presión en la misma reconocible.
 - Caudal demandado / distribuido en valores altos.
 - Numero de cups que abastece alto.
 - Redes con redes de cascos históricos aguas abajo de las mismas.
 - Redes que se encuentren en una zona geográfica afectada por algún proyecto de H₂.

Las redes seleccionadas para el estudio han sido:

Araba

Denominación	Presión	Longitud (m)	Nº Puntos de Suministro
VITORIA – IRUÑA DE OCA	10 bar	68.421	119
LLANADA ALAVESA	16 bar	45.894	18
OION	16 bar	1.346	1
VITORIA-GASTEIZ	4 bar	351.509	63.073
VITORIA-GASTEIZ “CASCO VIEJO”	150 mbar	5.448	2.526
VITORIA-GASTEIZ “ABETXUKO”	150 mbar	6.427	1.222

Bizkaia

Denominación	Presión	Longitud (m)	Nº Puntos de Suministro
ANTURTZI-CASTRO URDIALES	16 bar	27.140	4
BIZKAIA	16 bar	224.780	151
BILBAO	4 bar	271.603	79.548
CASCO VIEJO BILBAO	200 mbar	6.315	2.247
MARGEN IZQUIERDA	4 bar	207.698	51.605
ZIERBANA - PUERTO BILBAO	16 bar	510	3
BERMEO-MUNDAKA	16 bar	7.009	4

Gipuzkoa

Denominación	Presión	Longitud (m)	Nº Puntos de Suministro
BERGARA-OÑATE-ESKORIATZA	16 bar	44.528	60
IRUN	16 bar	11.209	3
IRUN-HONDARRIBIA	4 bar	110.772	22.803
CASCO VIEJO HONDARRIBIA	150 mbar	1.290	378
GIPUZKOA - BIZKAIA	16 bar	293.447	172
ANILLO DONOSTIA	400 mbar	10.476	168
DONOSTIA	24 mbar	110.460	39.694
ALTZO	16 bar	1.703	1
TOLOSA-BERASTEGI	16 bar	16.826	3
ZALDIBIA-AMEZKETA	16 bar	9.084	5
LEGORRETA	16 bar	2.750	3

7.2 CREAR MODELO DE CÁLCULO

Nortegas cuenta con herramientas para el análisis de la capacidad de red, con el que se puede estudiar la viabilidad de nuevos puntos de suministro y las posibles mejoras en la red existente para descongestionar las redes de distribución de gas natural que están muy saturadas.

Se ha realizado una parametrización de la herramienta para poder hacer las simulaciones de capacidad de red de para los niveles de blending del 5%/10%/20% de H₂ y para el caso del 100% H₂.

La composición del gas natural empleado para el estudio en porcentajes es el siguiente:

Elementos		0%	5%	10%	20%
METANO	C1	90	85,5	81	72
HIDRÓGENO	H2	0	5	10	20
ETANO	C2	4	3,8	3,6	3,2
PROPANO	C3	1,3	1,2	1,2	1
BUTANO	C4N	0,2	0,2	0,2	0,2
NITRÓGENO	N2	2,2	2,1	1,9	1,8
DIÓXIDO DE CARBONO	CO2	0,5	0,5	0,5	0,4
SULFATO DE HIDRÓGENO	H2S	1,7	1,6	1,6	1,4

En todas las redes seleccionadas se ha estudiado la capacidad de estas en el día del año más desfavorable (cuando la demanda de gas natural es máxima)

7.3 ANÁLISIS DE CADA UNO DE LOS ESCENARIOS

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en los análisis de capacidad de cada una de las redes estudiadas y las actuaciones que sería necesario llevar a cabo en estas para poder distribuir gas natural en diferentes niveles de blending de H₂.

Araba

En Araba se han estudiado las principales redes de distribución de gas natural:



Figura 34. Red Vitoria – Iruña de Oca.

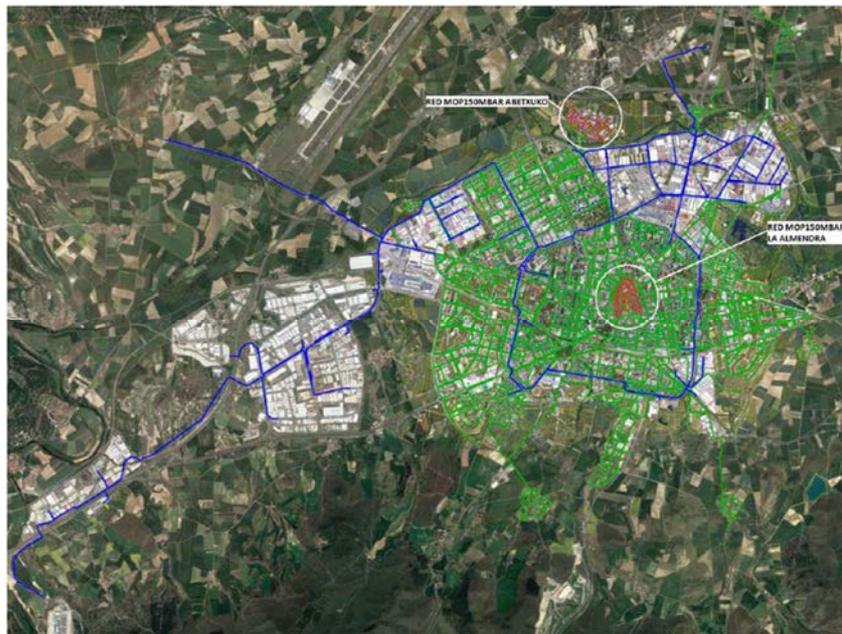


Figura 35. Redes de Vitoria (4 bar); Casco Viejo y Abetxuko.

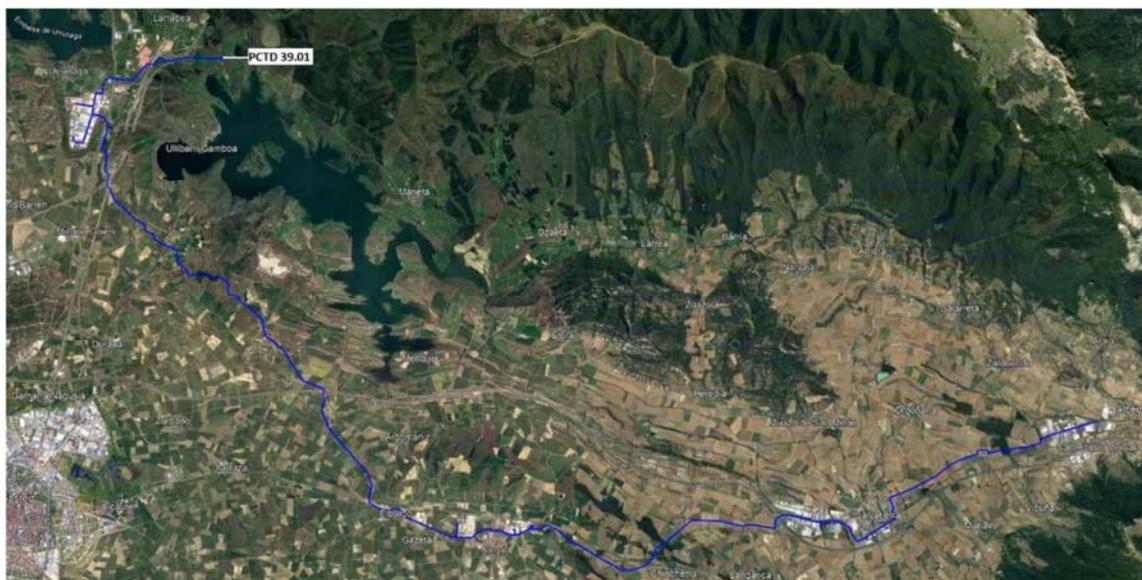


Figura 36. Red de Llanada Alavesa.



Figura 37. Red de Oion.

BIZKAIA

En Bizkaia se han estudiado las principales redes de distribución de gas natural:

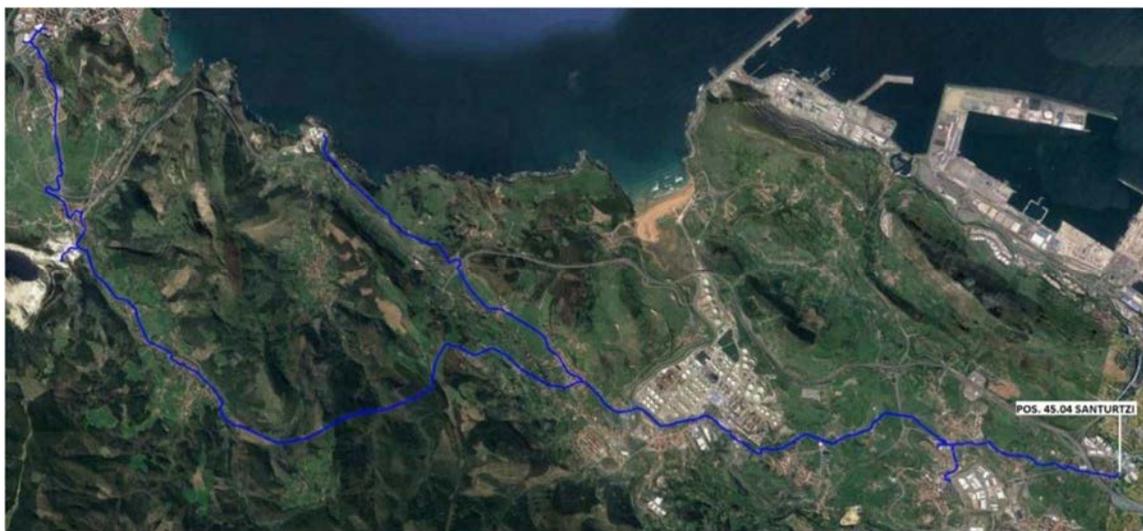


Figura 38. Red de Santurtzi – Castro Urdiales.

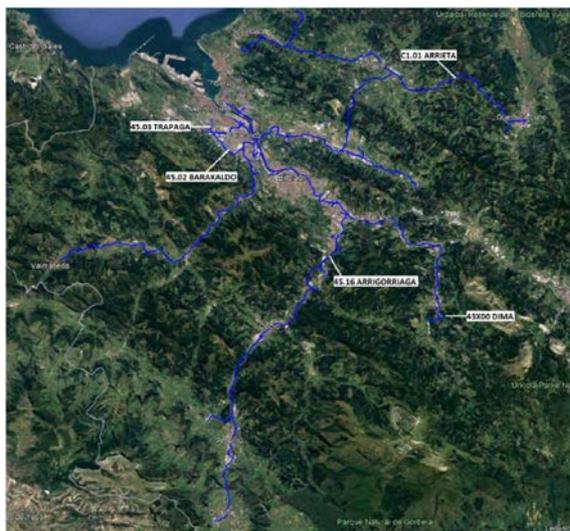


Figura 39. Red de Bizkaia.



Figura 40. Redes de Bilbao y Casco Viejo Bilbao.



Figura 41. Red de Margen Izquierda.



Figura 42. Red de Puerto de Bilbao.

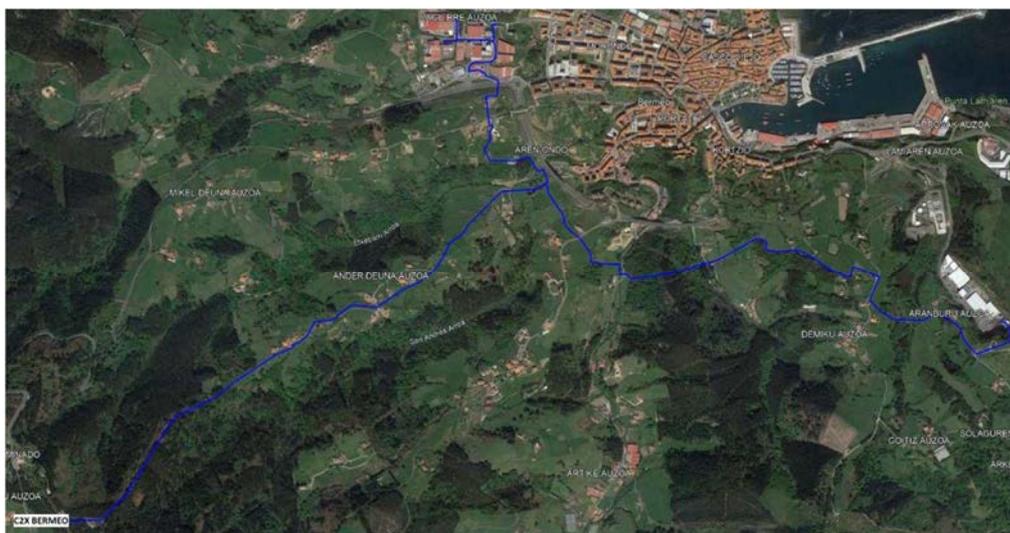


Figura 43. Red de Bermeo - Mundaka.

GIPUZKOA

En Gipuzkoa se han estudiado las principales redes de distribución de gas natural:

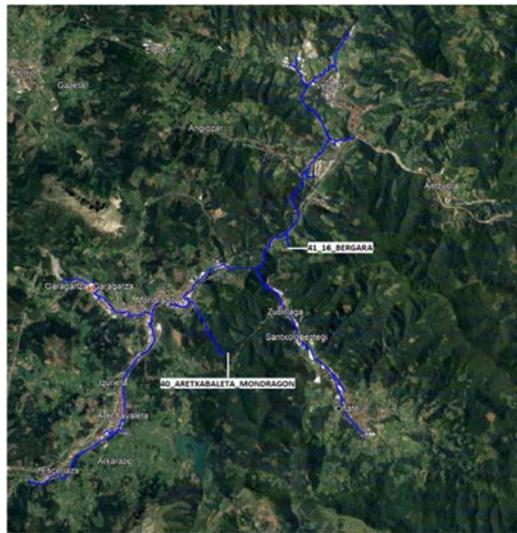


Figura 44. Red de Bergara – Aretxabaleta - Mondragón.

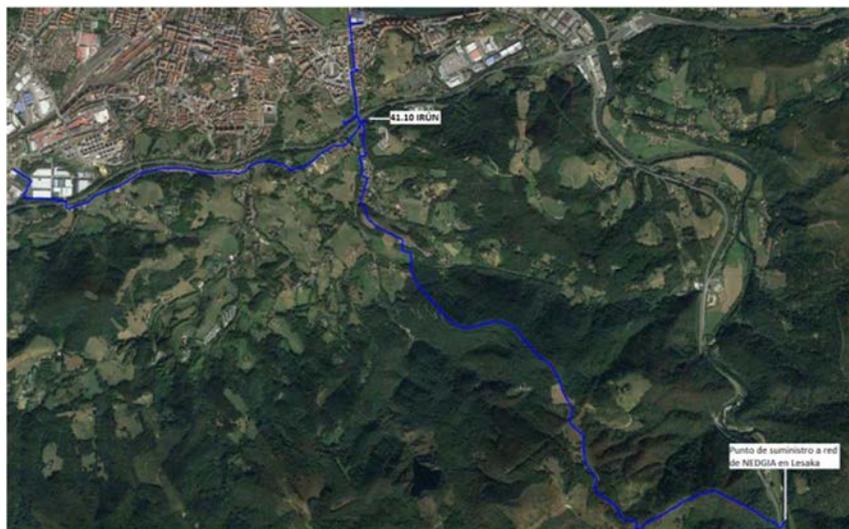


Figura 45. Red de Irún – Lesaka.

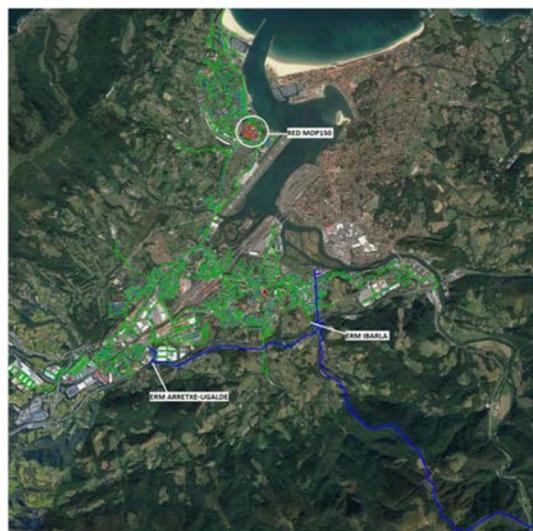


Figura 46. Red de Irún - Hondarribia.



Figura 47. Red de Casco Viejo Hondarribia.



Figura 48. Red de Gipuzkoa - Bizkaia.



Figura 49. Red de anillo de Donostia.



Figura 50. Red de Donostia.

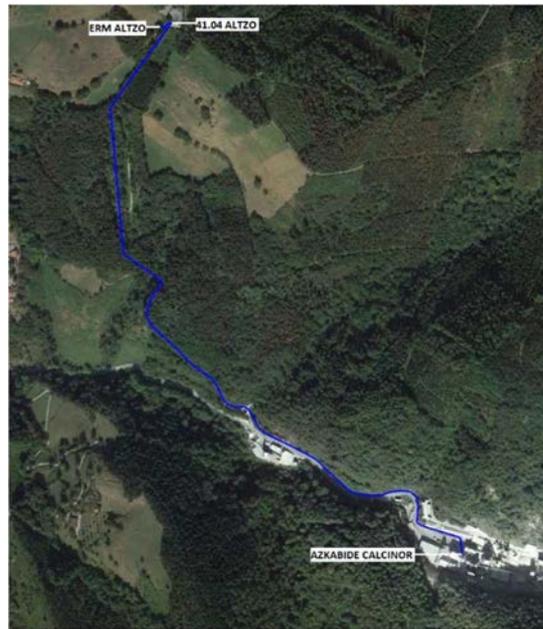


Figura 51. Red de Altzo.

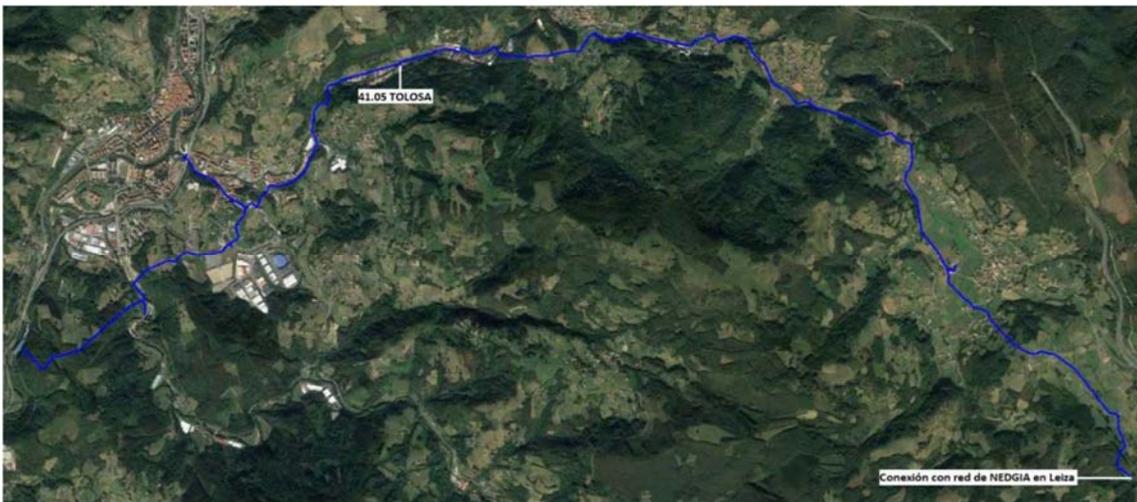


Figura 52. Red de Tolosa – Berástegi.

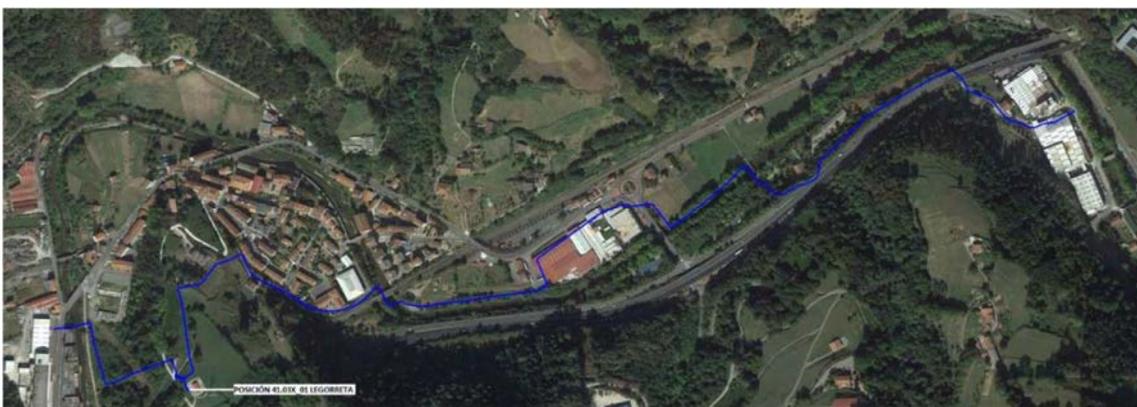


Figura 53. Red de Legorreta.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en los análisis de capacidad de cada una de las redes estudiadas y las actuaciones que sería necesario llevar a cabo en estas para poder distribuir gas natural en diferentes niveles de blending de H₂.

Las conclusiones del estudio son:

Blending del 5% y del 10%

El incremento de caudal no supone un problema. La velocidad y presión experimentan pequeños cambios, manteniéndose en valores dentro del rango de operación.

Blending del 20%

El incremento del caudal con el blending asciende a un 12% sobre el total. Por lo general, supone en ocasiones la ampliación o desdoblamiento de algunos tramos de red, en redes en las que no existen problemas de velocidad o presión previos:

Araba

Denominación	Presión	Longitud de la red (m)	Tramos a reforzar (m)
VITORIA – IRUÑA DE OCA	10 bar	68.421	537
LLANADA ALAVESA	16 bar	45.894	
OION	16 bar	1.346	
VITORIA-GASTEIZ	4 bar	351.509	3 ERM
VITORIA-GASTEIZ “CASCO VIEJO”	150 mbar	5.448	
VITORIA-GASTEIZ “ABETXUKO”	150 mbar	6.427	
TOTAL		479.045	537 m +3 ERM

Bizkaia

Denominación	Presión	Longitud de la red (m)	Tramos a reforzar (m)
SANTURTZI-CASTRO URDIALES	16 bar	27.140	
BIZKAIA	16 bar	224.780	108
BILBAO	4 bar	271.603	
CASCO VIEJO BILBAO	200 mbar	6.315	
MARGEN IZQUIERDA	4 bar	207.698	
ZIERBANA - PUERTO BILBAO	16 bar	510	
BERMEO-MUNDAKA	16 bar	7.009	
TOTAL		745.055	108

Gipuzkoa

Denominación	Presión	Longitud de la red (m)	Tramos a reforzar (m)
BERGARA-OÑATE-ESKORIATZA	16 bar	44.528	7
IRUN	16 bar	11.209	
IRUN-HONDARRIBIA	4 bar	110.772	
CASCO VIEJO HONDARRIBIA	150 mbar	1.290	
GIPUZKOA -BIZKAIA	16 bar	293.447	461
ANILLO DONOSTIA	400 mbar	10.476	
DONOSTIA	24 mbar	110.460	
ALTZO	16 bar	1.703	
TOLOSA-BERASTEGI	16 bar	16.826	
ZALDIBIA-AMEZKETA	16 bar	9.084	
LEGORRETA	16 bar	2.750	
TOTAL		612.545	468

8 EVALUACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DEL H2LOOP CON 25 y 30 % H₂

8.1 CONDICIONES INICIALES

Excepto para las pruebas del 5 % de H₂ donde se ha empleado gas sintético con la mezcla suministrada ad hoc, el resto de pruebas se han realizado las mezclas con GN proveniente de la red de distribución y con H₂ suministrado en botellas utilizando el módulo de inyección de H₂, el cual ha sido validado tras un estudio de CFD (véase apartado 6 DISEÑO Y EVALUACIÓN DE LA POSICIÓN DE INYECCIÓN DE H₂).

8.2 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:

Tabla 6. Fechas de las pruebas realizadas con diferentes blendings en el H2loop.

% 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
25 %	16 de enero de 2024	9 de abril de 2024	2.000 h
30 %	9 de abril de 2024	11 de junio de 2024	1.500 h

8.3 RESULTADOS

8.3.1 Detección de fugas

A lo largo de las 2000 horas de funcionamiento de la mezcla 25 % H₂ / 75 % GN y otras 1500 horas de funcionamiento con la mezcla 30 % H₂ / 70 % GN se han realizado dos inspecciones de detección de fugas para cada mezcla. Durante las diferentes inspecciones no se ha detectado ninguna fuga en los elementos de la red, ni de instalaciones de usuario hasta un rango de 10⁻⁵ mbar.l/s. De igual forma que ocurrió en las pruebas del 5, 10, 15 y 20 %.

8.3.2 Prueba Válvulas

Para cada punto de muestreo se ha registrado el tiempo de muestreo, presiones y temperaturas iniciales y finales en la zona a estudiar. Este registro se ha realizado para las siguientes mezclas GN / H₂:

- 100 % GN
- 95 % GN / 5 % H₂
- 90 % GN / 10 % H₂
- 85 % GN / 15 % H₂
- 80 % GN / 20 % H₂
- 75 % GN / 25 % H₂
- 70 % GN / 30 % H₂

Para el calcular la tasa de fuga tras las pruebas, se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$Tasa\ de\ fuga\ \left(\frac{mL}{min}\right) = \frac{diferencia\ de\ presión \cdot volumen}{tiempo\ (min.) \cdot presión\ atmosférica\ (bar)}$$

La presión es dependiente de la temperatura, por ello se normalizaron los volúmenes calculados en función de la presión y temperatura registrada.

$$\frac{P_1 * V_1}{T_1} = \frac{P_2 * V_2}{T_2}$$

Debido a que el volumen del tramo donde se realiza el test es conocido y se registran las presiones y temperaturas tanto al inicio como al final de la prueba, se pueden calcular los volúmenes iniciales y finales normalizados. Con dichos volúmenes se ha calculado el volumen de repaso que se ha producido durante la prueba.

$$V_{repaso} = V_{Nfinal} - V_{Ninicial}$$

La tasa de fuga al final es el volumen que ha repasado entre el tiempo que ha transcurrido del ensayo.

$$Tasa\ de\ fuga\ \left(\frac{ml}{min}\right) = \frac{V_{repaso}}{t_{prueba}}$$

Los resultados obtenidos de la prueba de válvulas con las diferentes mezclas GN/H₂ se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 7. Resultados de las pruebas de fugas realizadas a las válvulas.

- 100 % GN

Prueba	Válvulas testeadas	Tiempo test (min)	P zona con presión. (barg)	P inicial tramo (barg)	P final tramo (barg)	Temp. inicial (°C)	Temp. final (°C)	Volumen tramo (mL)	Vni (mL)	Vnf (mL)	Vr (mL)	Tasa fuga (ml/min)
1	BP1 - M4	30	2,68	0,406	0,414	9,4	10,9	19635	26587	26596,27	8,67	0,29
2	BP3 - M5	30	2,68	0,354	0,376	9,4	10,9	19635	25613,5	25888,2	274,70	9,16
3	BP1,2,3,4	60	2,66	0,402	0,408	7,2	8,0	39270	53441,4	53515,3	73,86	1,23
4	BP3,4 - M6	60	2,39	0,416	0,424	11,6	7,5	23562	31881,7	32528,5	646,82	10,78
5	B5 - B7	60	12,80	0,468	0,640	7,2	7,9	27489	39153,6	43591,2	4437,60	73,96
6	B1 - B2	30	13,67	0,386	0,388	8,2	9,2	8836	11846,1	11821,0	-25,08	-0,84
7	M2 - M3	30	2,53	0,348	0,352	8,3	9,2	11781	15360,4	15356,5	-3,97	-0,13

- 95 % GN / 5 % H₂

Prueba	Válvulas testeadas	Tiempo test (min)	P zona con presión. (barg)	P inicial tramo (barg)	P final tramo (barg)	Temp. inicial (°C)	Temp. final (°C)	Volumen tramo (mL)	Vni (mL)	Vnf (mL)	Vr (mL)	Tasa fuga (ml/min)
1	BP1 - M4	30	2,47	0,430	0,534	3,2	5,1	19635	27643,79	29433,42	1789,64	59,65
2	BP3 - M5	30	2,61	0,336	0,346	5,1	7,1	19635	25666,86	25672,56	5,70	0,19
3	BP1,2,3,4	60	2,72	0,418	0,426	3,2	4,5	39270	54827,88	54876,20	48,31	0,81
4	BP3,4 - M6	60	2,72	0,336	0,346	5,1	7,1	23562	30800,23	30807,07	6,84	0,11
5	B5 - B7	60	9,91	0,430	0,534	3,2	4,5	27489	38701,30	41295,84	2594,54	43,24
6	B1 - B2	30	14,19	0,334	0,328	23,5	24,5	8836	10817,62	10733,26	-84,36	-2,81
7	M2 - M3	30	2,61	0,228	0,218	23,5	24,5	11781	13288,67	13137,32	-151,34	-5,04

- 90 % GN / 10 % H₂

Prueba	Válvulas testeadas	Tiempo test (min)	P zona con presión. (barg)	P inicial tramo (barg)	P final tramo (barg)	Temp. inicial (°C)	Temp. final (°C)	Volumen tramo (mL)	Vni (mL)	Vnf (mL)	Vr (mL)	Tasa fuga (ml/min)
1	BP1 - M4	30	2,41	0,476	0,484	13,8	15,4	19635	27471,15	27465,58	-5,57	-0,19
2	BP3 - M5	30	2,41	0,410	0,414	14,1	15,7	19635	26226,28	26154,30	-71,97	-2,40
3	BP1,2,3,4	60	2,41	0,464	0,468	15,7	15,5	39270	54141,11	54325,32	184,21	3,07
4	BP3,4 - M6	60	2,40	0,452	0,462	12,1	13,7	23562	32627,43	32666,87	39,44	0,66
5	B5 - B7	60	14,47	0,302	0,392	12,1	13,7	27489	34168,52	36302,98	2134,46	35,57
6	B1 - B2	30	13,96	0,256	0,262	10,4	12	8836	10662,17	10652,46	-9,71	-0,32
7	M2 - M3	30	2,45	0,454	0,464	10,5	11,5	11781	16428,13	16481,99	53,86	1,80

- 85 % GN / 15 % H₂

Prueba	Válvulas testeadas	Tiempo test (min)	P zona con presión. (barg)	P inicial tramo (barg)	P final tramo (barg)	Temp. inicial (°C)	Temp. final (°C)	Volumen tramo (mL)	Vni (mL)	Vnf (mL)	Vr (mL)	Tasa fuga (ml/min)
1	BP1 - M4	30	2,59	0,126	0,128	21,4	21,9	19635	20472,72	20473,90	1,19	0,04
2	BP3 - M5	30	2,59	0,026	0,026	21,4	21,9	19635	18675,68	18644,04	-31,65	-1,05
3	BP1,2,3,4	60	2,55	0,178	0,184	22,1	22,6	39270	42712,85	42855,40	142,56	2,38
4	BP3,4 - M6	60	2,56	0,690	0,704	18,2	20,5	23562	37133,01	37144,99	11,98	0,20
5	B5 - B7	60	13,70	0,328	0,432	18,2	20,5	27489	34114,44	36471,74	2357,30	39,29
6	B1 - B2	30	14,05	0,026	0,026	21,2	21,6	8836	8409,77	8398,36	-11,41	-0,38
7	M2 - M3	30	2,56	0,126	0,128	21,0	21,6	11781	12300,33	12296,85	-3,49	-0,11

- 80 % GN / 20 % H₂

Prueba	Válvulas testeadas	Tiempo test (min)	P zona con presión. (barg)	P inicial tramo (barg)	P final tramo (barg)	Temp. inicial (°C)	Temp. final (°C)	Volumen tramo (mL)	Vni (mL)	Vnf (mL)	Vr (mL)	Tasa fuga (ml/min)
1	BP1 - M4	30	2,55	0,386	0,392	18,4	18,9	19635	25403,75	25469,00	65,25	2,18
2	BP3 - M5	30	2,55	0,282	0,286	18,2	18,9	19635	23531,74	23547,84	16,09	0,54
3	BP1,2,3,4	60	2,55	0,362	0,374	19,1	20,5	39270	49816,43	50011,54	195,11	2,71
4	BP3,4 - M6	60	2,55	0,338	0,340	16,2	15,9	23562	29662,58	29737,32	74,74	1,25
5	B5 - B7	60	13,80	0,496	0,584	16,8	15,8	27489	38572,84	40963,19	2390,35	39,84
6	B1 - B2	30	13,80	0,108	0,114	15,9	17,4	8836	9239,69	9241,18	1,49	0,05
7	M2 - M3	30	2,55	0,194	0,204	16,1	17,8	11781	13255,33	13287,04	31,71	1,06

- 75 % GN / 25 % H₂

Prueba	Válvulas testeadas	Tiempo test (min)	P zona con presión. (barg)	P inicial tramo (barg)	P final tramo (barg)	Temp. inicial (°C)	Temp. final (°C)	Volumen tramo (mL)	Vni (mL)	Vnf (mL)	Vr (mL)	Tasa fuga (ml/min)
1	BP1 - M4	30	2,8	0,304	0,324	16,1	19,2	19635	24105,18	24211,68	106,51	3,55
2	BP3 - M5	30	2,8	0,342	0,352	14,7	17,4	19635	24921,18	24871,78	-49,41	-1,65
3	BP1,2,3,4	60	2,7	0,344	0,352	20,2	21	39270	48980,05	49134,76	154,70	2,58
4	BP3,4 - M6	60	2,8	0,378	0,356	18,5	14,5	23562	30299,81	30235,36	-64,45	-1,07
5	B5 - B7	60	14,4	0,396	0,754	18,6	14,6	27489	35794,86	45512,03	9717,16	161,95
6	B1 - B2	30	14,4	0,274	0,282	15	17,6	8835,75	10640,75	10611,14	-29,61	-0,99
7	M2 - M3	30	2,8	0,302	0,332	16,1	19,5	11781	14441,15	14598,94	157,79	5,26

- 70 % GN / 30 % H₂

Prueba	Válvulas testeadas	Tiempo test (min)	P zona con presión. (barg)	P inicial tramo (barg)	P final tramo (barg)	Temp. inicial (°C)	Temp. final (°C)	Volumen tramo (mL)	Vni (mL)	Vnf (mL)	Vr (mL)	Tasa fuga (ml/min)
1	BP1 - M4	30	2,6	0,298	0,312	18,5	20,7	19635	23797,92	23871,93	74,01	2,47
2	BP3 - M5	30	2,6	0,288	0,296	18,5	20,7	19635	23616,43	23583,72	-32,71	-1,09
3	BP1,2,3,4	60	2,6	0,504	0,524	22,5	23,2	39270	54328,13	54914,25	586,12	9,77
4	BP3,4 - M6	60	2,6	0,27	0,292	22,2	26,1	23562	27597,58	27704,88	107,30	1,79
5	B5 - B7	60	12,6	0,25	0,366	22,2	23,2	27489	31695,37	34489,08	2793,70	46,56
6	B1 - B2	30	12,6	0,192	0,204	22,3	21,4	8835,75	9716,75	9843,48	126,73	4,22
7	M2 - M3	30	2,6	0,216	0,232	22,3	21,4	11781	13213,65	13426,54	212,89	7,10

En la siguiente tabla se muestran las tasas de fuga de las válvulas para GN y los diferentes mezclas de blending realizadas.

Tabla 8. Tasa de fuga de las válvulas para los diferentes tipos de mezclas de gases.

Válvulas	Tasa de fuga (ml/min)						
	100 %	5 % H ₂	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %
BP1 - M4	0,29	59,65	-0,19	0,04	2,18	3,55	2,47
BP3 - M5	9,16	0,19	-2,40	-1,05	0,54	-1,65	-1,09
BP1,2,3,4	1,23	0,81	3,07	2,38	2,71	2,58	9,77
BP3,4 - M6	10,78	0,11	0,66	0,20	1,25	-1,07	1,79
B5 - B7	73,96	43,24	35,57	39,29	39,84	161,95	46,56
B1 - B2	-0,84	-2,81	-0,32	-0,38	0,05	-0,99	4,22
M2 - M3	-0,13	-5,04	1,80	-0,11	1,06	5,26	7,10

Para graficar los resultados se ha desechado la tasa de fuga al 5 % H₂ para la prueba de válvulas BP1 – M4 y la tasa de fuga al 25 % H₂ para la prueba de válvulas B5 – B7 debido a que sus valores son incoherentes con respecto al resto de resultados obtenidos. En el futuro se realizará de nuevo dicha prueba para comprobar si ha habido algún error en la medición. Los valores negativos son debidos a la sensibilidad del equipo de medición y no a fugas. Los valores negativos indican que la válvula ha sido estanca en la prueba.

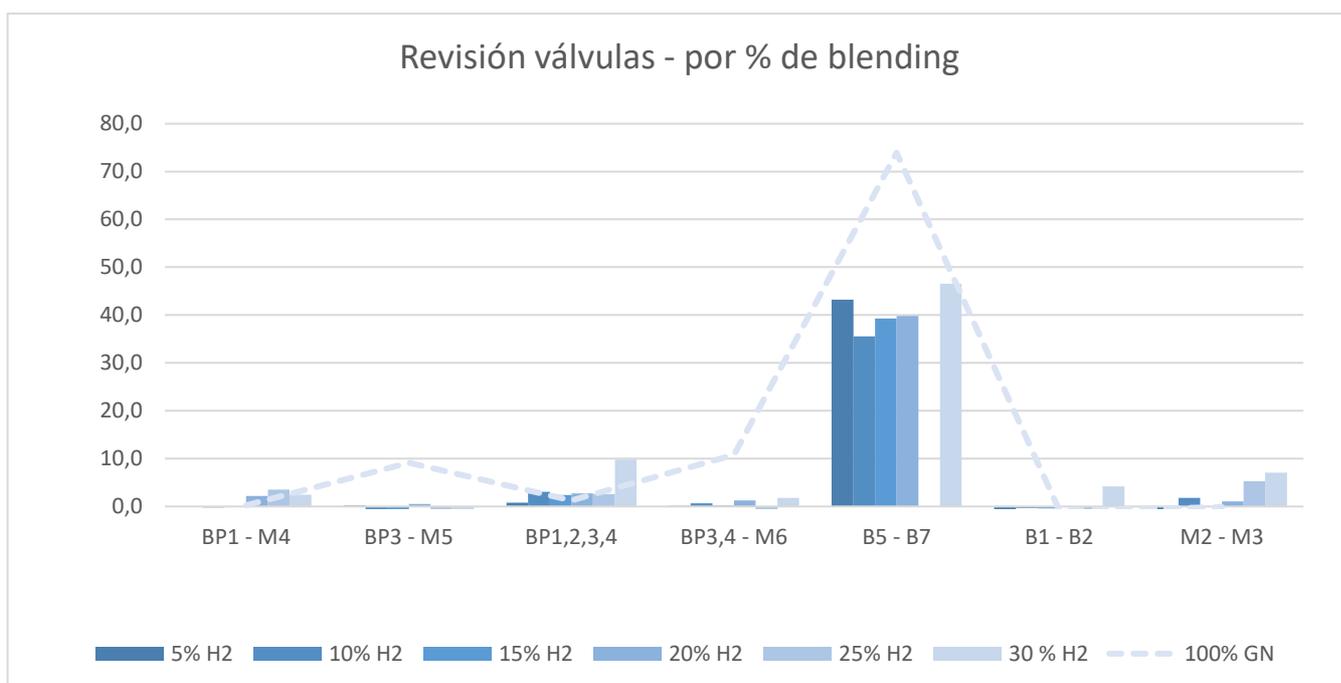


Figura 54. Tasa de fuga de los diferentes tipos de válvulas para diferentes mezclas de gases.

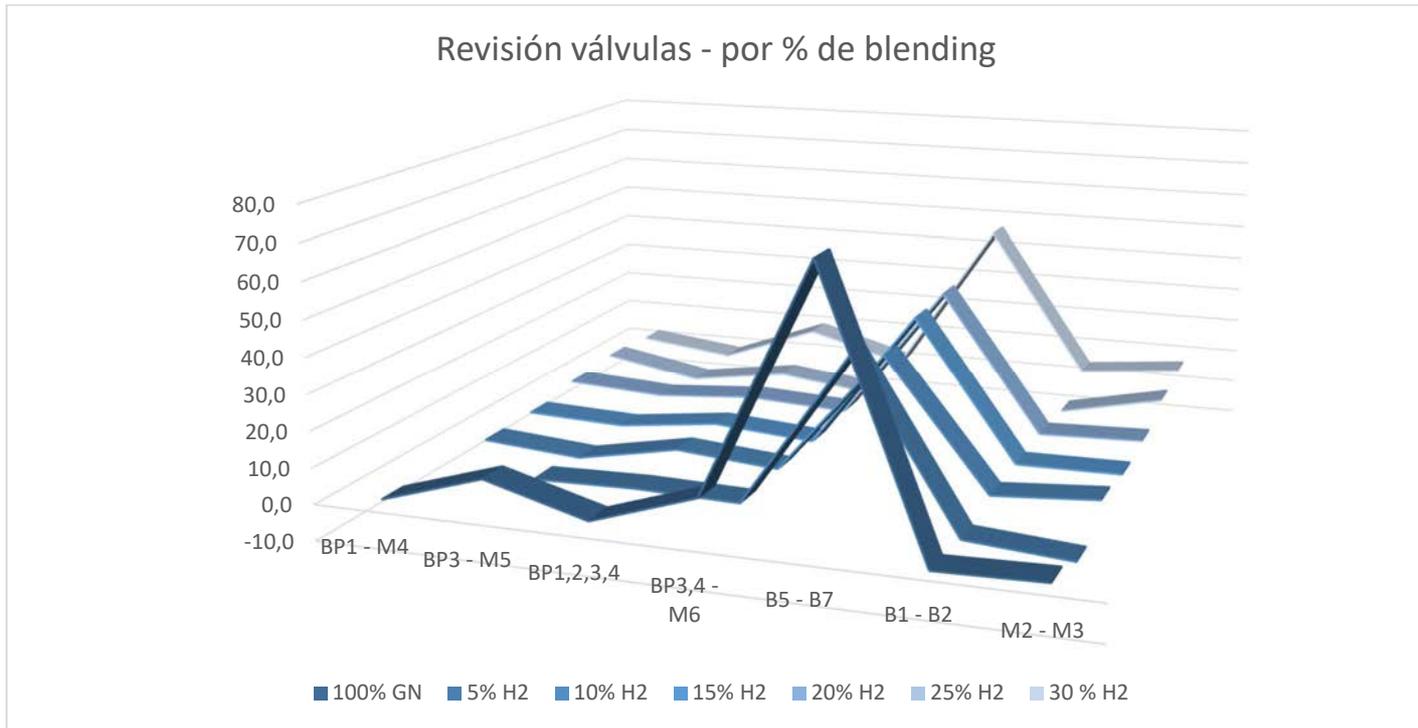


Figura 55. Tasa de fuga de los diferentes tipos de válvulas para diferentes mezclas de gases.

En la Figura 54 y 55, se muestra la tasa de fuga en cada tramo de válvulas testeadas para 100 % GN y para blendings de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 % de H₂.

Los datos obtenidos no muestran una diferencia en el comportamiento entre el GN y los diferentes tipos de blendings. No se puede determinar que la estanqueidad de las válvulas sean diferentes al usar blending que GN.

La inclusión de H₂ en la mezcla de GN hasta un 30 % no altera sustancialmente su naturaleza y propiedades, respaldando la consideración de esta combinación como un componente integral de la categoría de GN.

8.3.3 Prueba ERM

En cada una de las fases de pruebas se realiza una prueba completa de operación de la ERM, de acuerdo a 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 25 y 30 % 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.



Figura 56. Componentes del ERM (juntas, filtros, etc).

8.3.4 Pruebas de equipos presentes en instalaciones domésticas

8.3.4.1 Contadores

A continuación, se muestran los resultados de los contadores para las diferentes mezclas de GN/ H₂.

- **90 % GN / 10 % H₂**

Tabla 9. Resultados de la prueba de contadores para una mezcla de 90 % GN / 10 % H₂.

		-	10:30	11:30	13:00	14:00	16:00	17:00
		<i>Pressure bar</i>	1,292	1,2558	1,20001	1,2833	1,2486	1,2833
		<i>Temperature °C</i>	10,5	12,6	15,6	17,8	27,6	21,2
	F1	<i>Flow meter m³/h</i>	3,07	2,45	2,49	0,85	0,20	0,79
		<i>Flow Lab m³/h</i>	3,70	2,92	3,00	1,00	0,26	0,97
		<i>Vb calculated average m³</i>	3,17	2,40	2,33	0,89	0,25	0,66
M	MIT0032315647535	<i>Vb [m³]</i>	3,184	2,388	2,347	0,896	0,251	0,653
	MIT0032315647538	<i>Vb [m³]</i>	3,132	2,404	2,328	0,884	0,247	0,65
U	MIT0032315647532	<i>Vb [m³]</i>	3,149	2,404	2,332	0,886	0,254	0,655
	MIT0032315647533	<i>Vb [m³]</i>	3,204	2,386	2,314	0,883	0,249	0,662
	F2	<i>Flow meter m³/h</i>	0,12	0,84	2,49	2,41	6,58	2,36
		<i>Flow Lab m³/h</i>	0,12	0,99	3,00	2,95	7,78	2,99
		<i>Vb calculated average m³</i>	0,11	0,80	2,29	2,45	6,53	2,07
M	MIT0032315647536	<i>Vb [m³]</i>	0,107	0,794	2,283	2,451	6,49	2,086
	MIT0032015545174	<i>Vb [m³]</i>	0,105	0,803	2,296	2,459	6,535	2,082
U	MIT0032315775811	<i>Vb [m³]</i>	0,107	0,79	2,288	2,45	6,539	2,052
	MIT0032315775810	<i>Vb [m³]</i>	0,107	0,798	2,29	2,451	6,57	2,047

En la tabla se pueden observar los siguientes valores:

1. F1, F2 → indican las dos líneas de contadores
2. Se han registrado el tiempo y las condiciones ambientales en el momento de cada prueba presión y temperatura.
3. Valores diferentes de caudal:
 - Caudalímetro: es el caudal corregido teniendo en cuenta las condiciones de temperatura y presión (15 °C, 1 atm).
 - Caudal de laboratorio: el caudal registrado por el caudalímetro situado en las instalaciones que permite modificar y adaptar manualmente el caudal de cada línea F1 y F2.
 - Vb media calculada: dadas las condiciones de caudal variables, y la interferencia entre las dos líneas, se decidió utilizar la media de las lecturas de los cuatro medidores.

El cálculo de V_b para los medidores G4/G6:

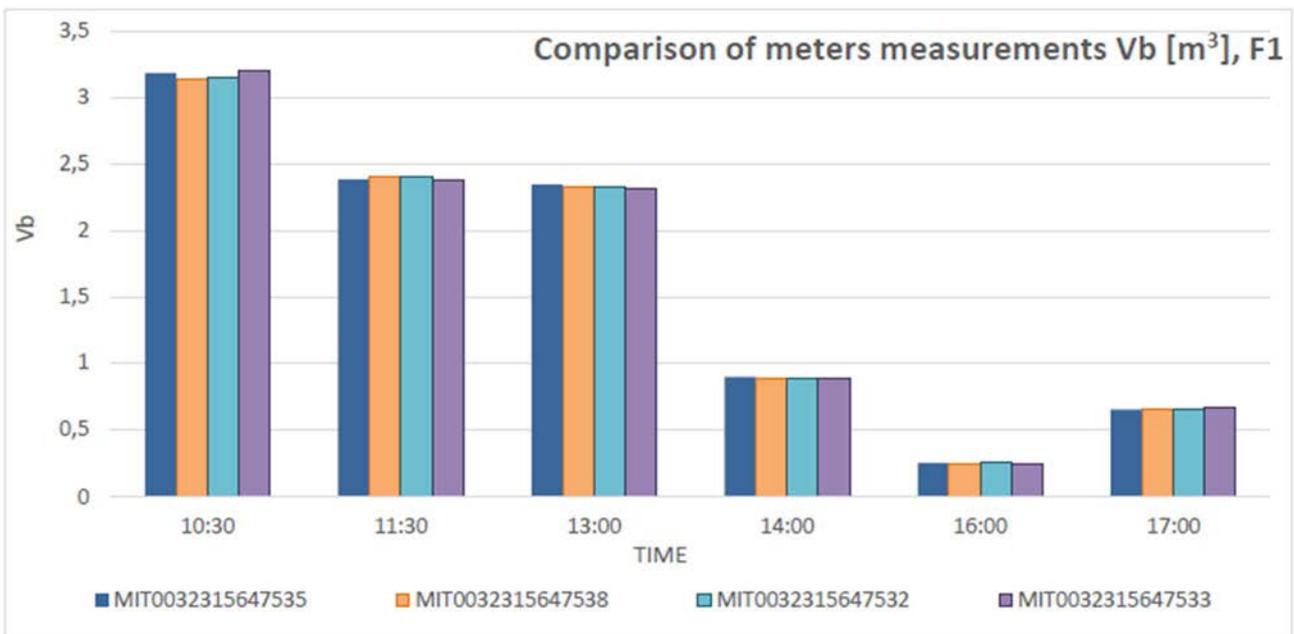
$$V_b = V_c * T_{real}/T_N$$

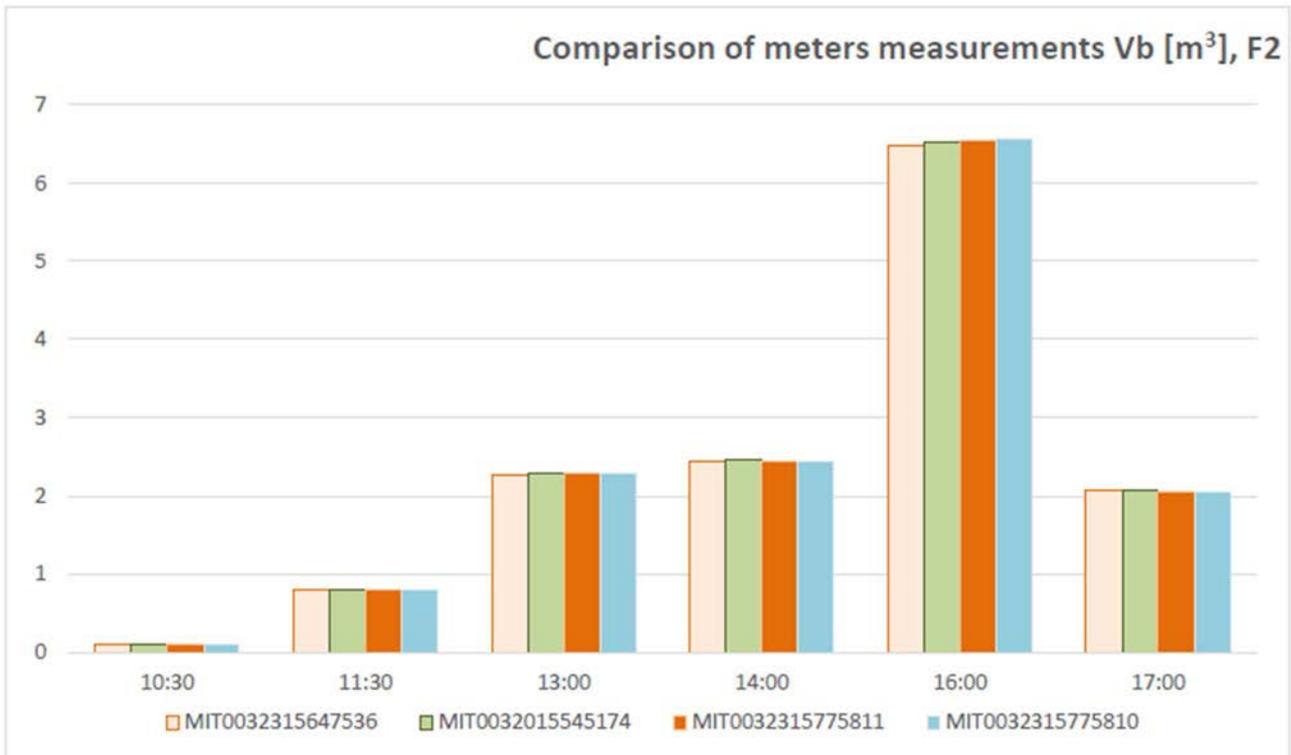
Donde: T_{real} son las condiciones ambientales durante el experimento, medidas hora a hora.

T_N se refieren a la "condición nominal" temp= 15°C.

4. U y M representan medidor ultrasónico y mecánico.
5. Se han utilizado diferentes colores para el número de serie del medidor con el fin de que los gráficos sean más claros.

Las siguientes figuras representan los resultados obtenidos para la mezcla de 90 % GN /10 % H₂:



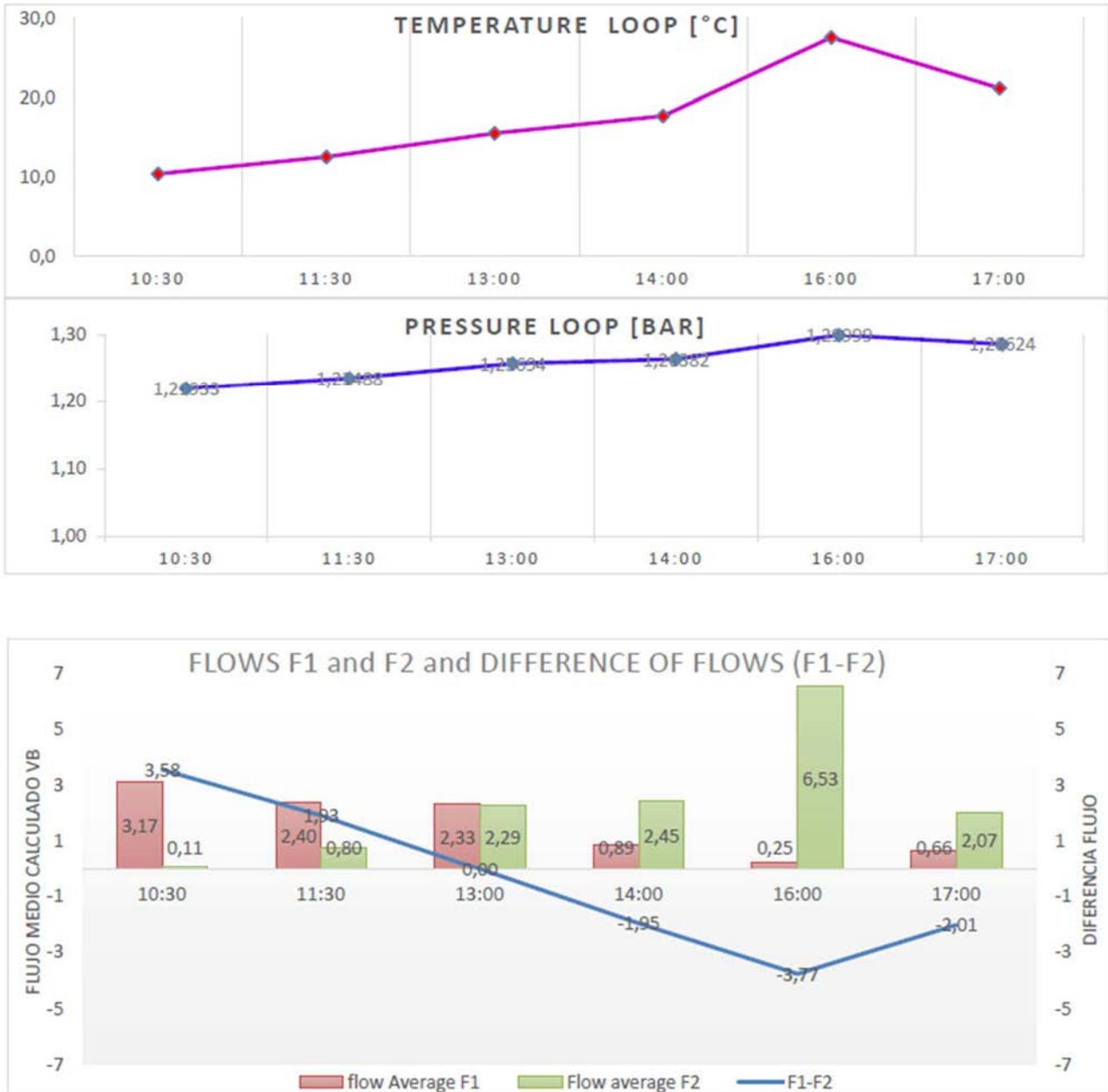


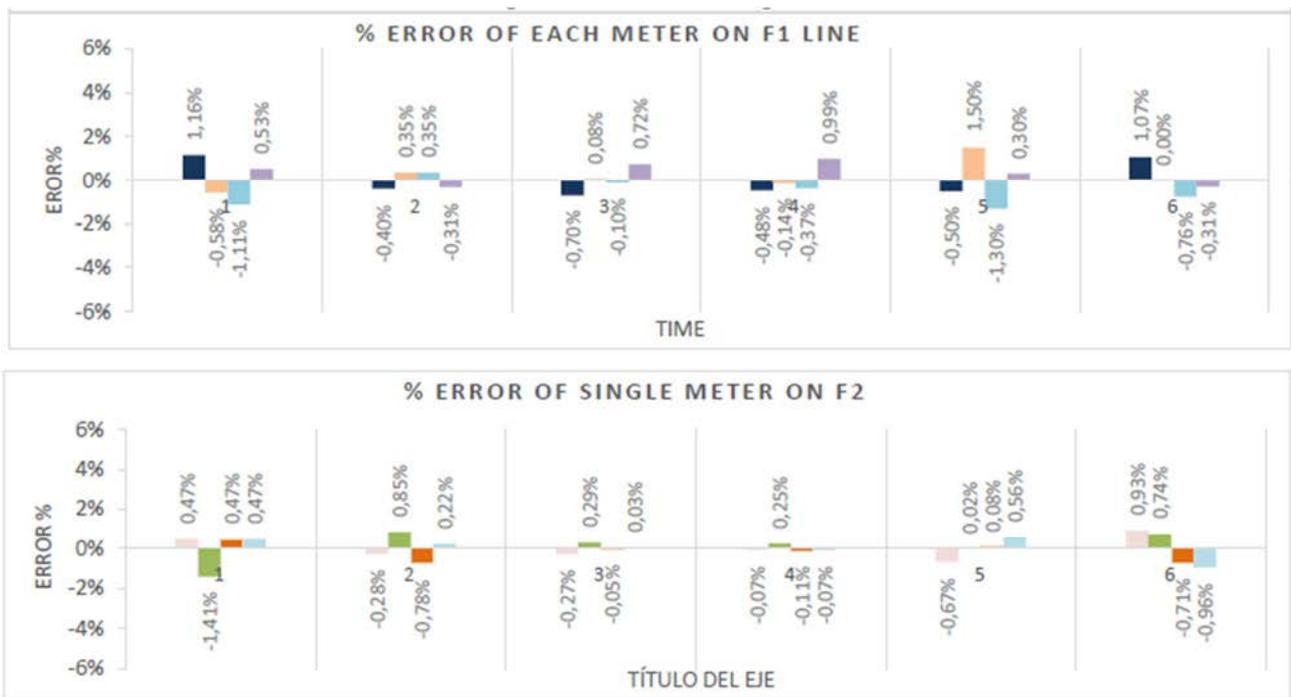
Para analizar la precisión de medición de todos los contadores y las diferencias entre las lecturas obtenidas, se ha calculado para cada línea (F1 y F2) la media del volumen medido por los cuatro contadores y se calculó la desviación de la lectura de cada contador con respecto a la lectura media de su línea correspondiente:

Tabla 10. Resultados la media del volumen medido y la desviación de la lectura de cada contador para una mezcla de 90 % GN / 10 % H2.

		-	10:30	11:30	13:00	14:00	16:00	17:00
		<i>Pressure bar</i>	1,292	1,2558	1,20001	1,2833	1,2486	1,2833
		<i>Temperature °C</i>	10,5	12,6	15,6	17,8	27,6	21,2
	F1	<i>Flow meter m³/h</i>	3,07	2,45	2,49	0,85	0,14	0,79
		<i>Flow Lab m³/h</i>	3,70	2,92	3,00	1,00	0,135	0,97
		<i>Vb calculated average m³</i>	3,17	2,40	2,33	0,89	0,13	0,66
M	MIT0032315647535	<i>Vb error</i>	0,53%	-0,31%	0,72%	0,99%	0,30%	-0,31%
	MIT0032315647538	<i>Vb error</i>	-1,11%	0,35%	-0,10%	-0,37%	-1,30%	-0,76%
U	MIT0032315647532	<i>Vb error</i>	-0,58%	0,35%	0,08%	-0,14%	1,50%	0,00%
	MIT0032315647533	<i>Vb error</i>	1,16%	-0,40%	-0,70%	-0,48%	-0,50%	1,07%
	F2	<i>Flow meter m³/h</i>	0,12	0,84	2,49	2,41	3,29	2,36
		<i>Flow Lab m³/h</i>	0,12	0,99	2,00	2,95	3,89	2,99
		<i>Vb calculated average m³</i>	0,11	0,80	2,29	2,45	3,27	2,07
M	MIT0032315647536	<i>Vb error</i>	0,47%	-0,28%	-0,27%	-0,07%	-0,67%	0,93%
	MIT0032015545174	<i>Vb error</i>	-1,41%	0,85%	0,29%	0,25%	0,02%	0,74%
U	MIT0032315775811	<i>Vb error</i>	0,47%	-0,78%	-0,05%	-0,11%	0,08%	-0,71%
	MIT0032315775810	<i>Vb error</i>	0,47%	0,22%	0,03%	-0,07%	0,56%	-0,96%

También se ha analizado la evolución de las condiciones ambientales (tendencia de temperatura y presión) y la evolución de las condiciones de ensayo (diferencia de presión entre las 2 líneas) que se reflejan en las siguientes figuras:

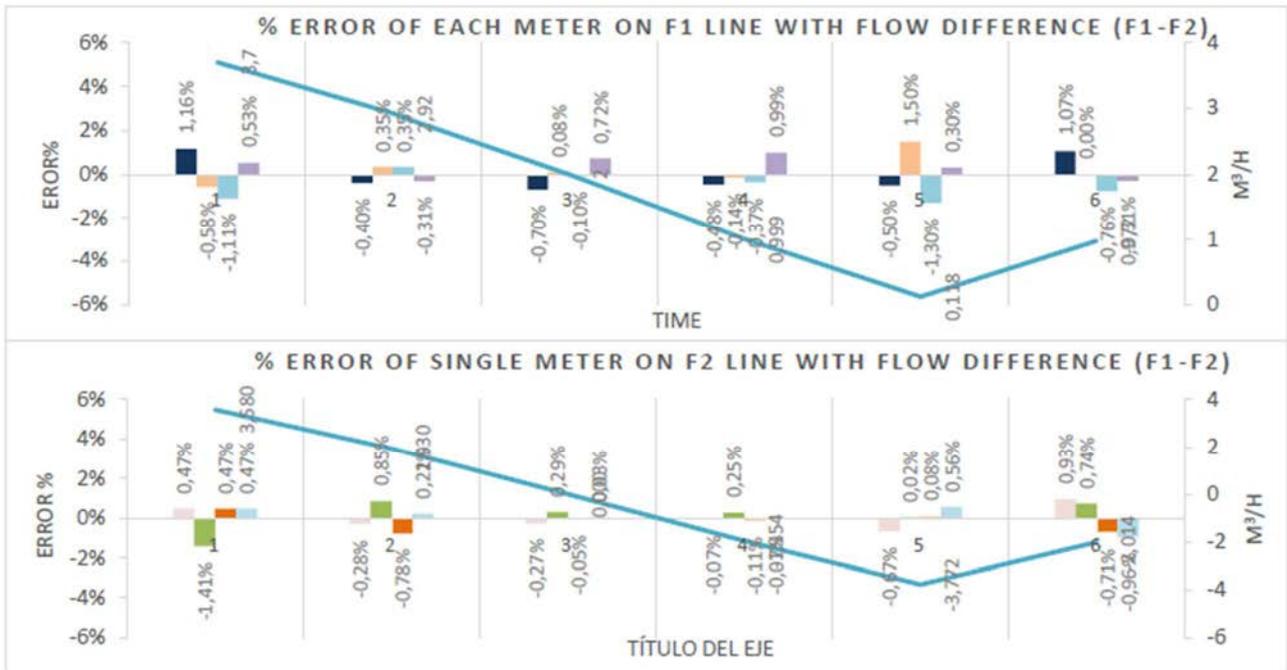




Los errores porcentuales calculados deben ser analizados como errores relativos. Por lo tanto, los errores reales serían aún menores que el valor absoluto.

Para darnos una explicación de estas pequeñas discrepancias, hemos hecho algunas suposiciones:

- 1) Las mediciones de volumen son sensibles a la temperatura, aunque los medidores están diseñados y calibrados para trabajar en un rango de temperatura de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pero, como se puede observar no se nota ninguna tendencia relacionada entre temperatura y error. Además, los medidores son capaces de compensar el volumen calculado con el rango de temperatura. Por lo tanto se descarta esta hipótesis.
- 2) Las mediciones de volumen también dependen mucho de la presión atmosférica. Sin embargo, la variación de la presión durante el día no fue relevante.
- 3) La precisión del contador varía en función del valor del caudal: en caudales bajos (por debajo de $Q_{\min} = 0,06\text{ m}^3/\text{h}$, los contadores, y por encima, todos los contadores mecánicos, tienden a perder precisión).
- 4) Debido a la forma de la unión mecánica de las 2 líneas F1 y F2 (forma de T) y su proximidad a los contadores, se planteó la hipótesis de que la diferencia entre los caudales de las dos líneas (F1 y F2) podría estar creando una interferencia entre ellas (debido a la presión delta en la unión).



- **85 % GN / 15 % H₂**

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la mezcla 85 % GN con 15 % H₂.

Tabla 11. Resultados de la prueba de contadores para una mezcla de 85 % GN / 15 % H₂.

			10:30	11:30	13:00	14:00	16:00	17:00	
		<i>Pressure bar</i>	1,08	1,12	1,15	1,18	1,24	1,23	1,24
		<i>Temperature °C</i>	4,40	7,70	11,30	14,30	21,30	21,00	21,30
	F1	<i>Flow meter m³/h</i>	0,96	0,97	0,07	0,88	3,41	2,61	3,38
		<i>Flow Lab m³/h</i>	1,00	1,02	0,17	0,98	4,29	3,02	4,02
		<i>Vb calculated average m³</i>	0,91	1,00	0,13	0,87	3,50	2,38	3,26
M	MIT0032315647535	<i>Vb [m³]</i>	0,897	1,018	0,127	0,873	3,505	2,389	3,256
	MIT0032315647538	<i>Vb [m³]</i>	0,91	0,992	0,131	0,865	3,48	2,376	3,256
U	MIT0032315647532	<i>Vb [m³]</i>	0,919	0,994	0,138	0,875	3,5	2,382	3,252
	MIT0032315647533	<i>Vb [m³]</i>	0,915	0,986	0,141	0,873	3,509	2,385	3,262
	F2	<i>Flow meter m³/h</i>	0,96	2,76	3,47	2,62	3,45	0,91	0,09
		<i>Flow Lab m³/h</i>	1,00	3,09	5,98	3,02	4,35	1,03	0,11
		<i>Vb calculated average m³</i>	0,94	2,24	3,50	2,70	3,59	0,88	0,12
M	MIT0032315647536	<i>Vb [m³]</i>	0,932	2,207	3,503	2,72	3,594	0,868	0,112
	MIT0032015545174	<i>Vb [m³]</i>	0,94	2,249	3,503	2,73	3,608	0,874	0,113
U	MIT0032315775811	<i>Vb [m³]</i>	0,934	2,244	3,472	2,629	3,569	0,896	0,119
	MIT0032315775810	<i>Vb [m³]</i>	0,942	2,245	3,51	2,71	3,574	0,887	0,119

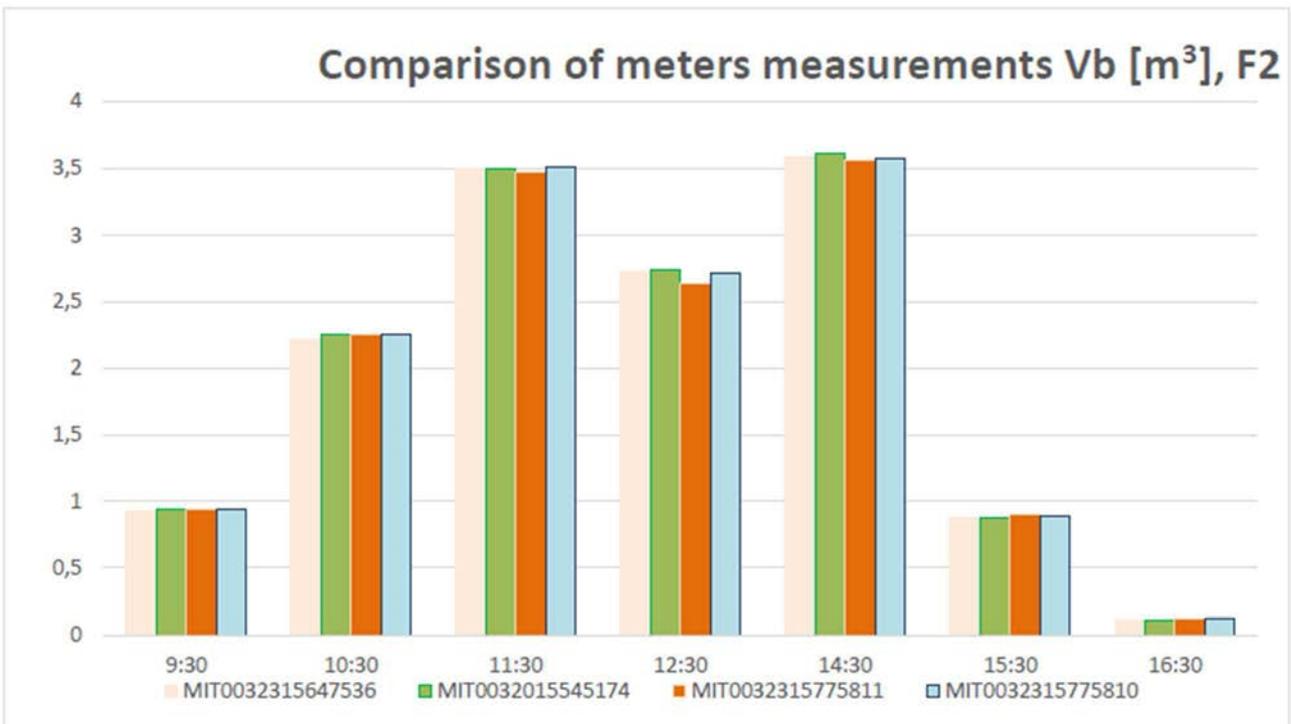
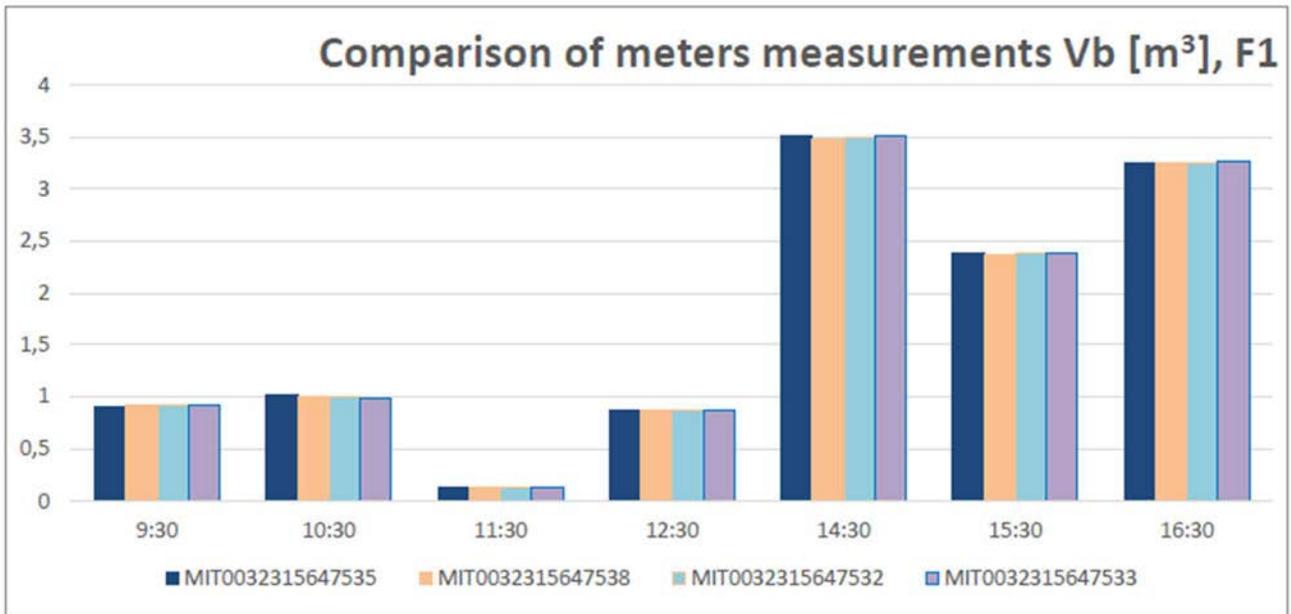
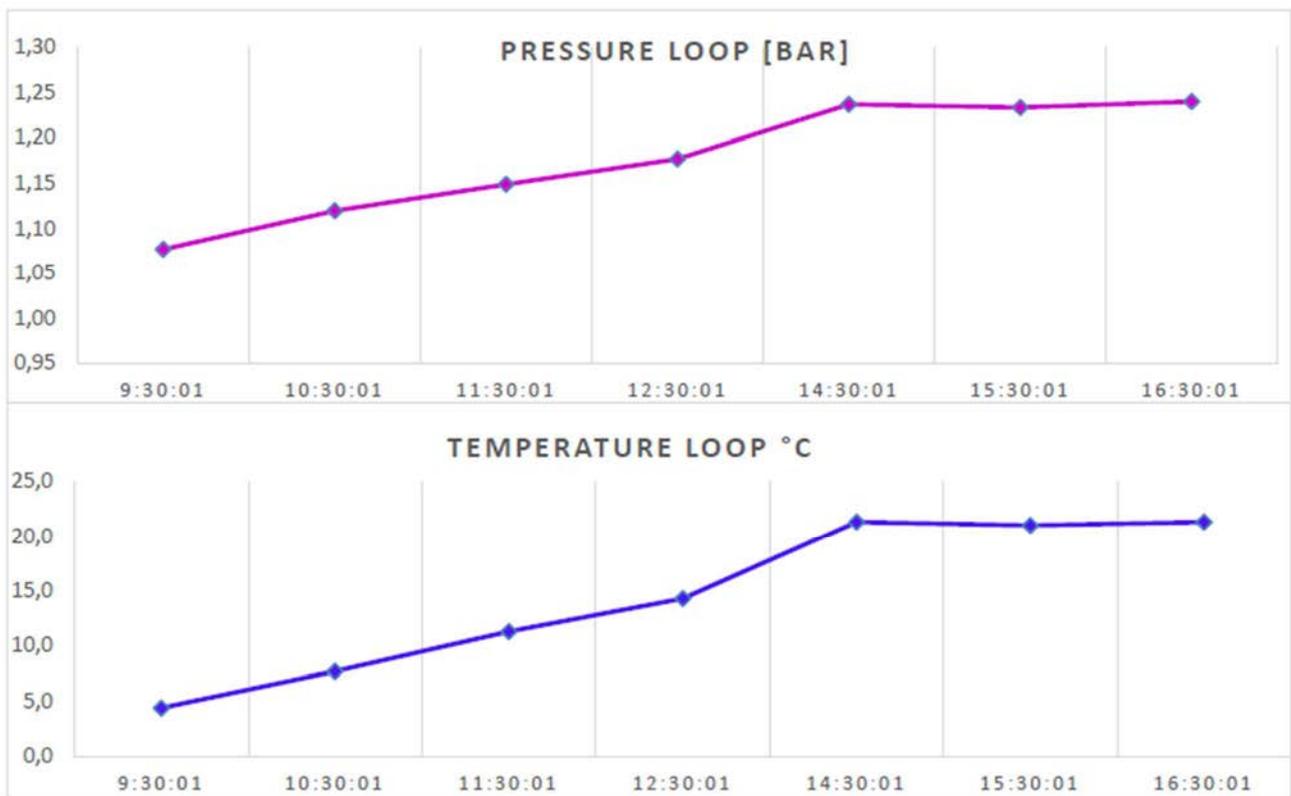
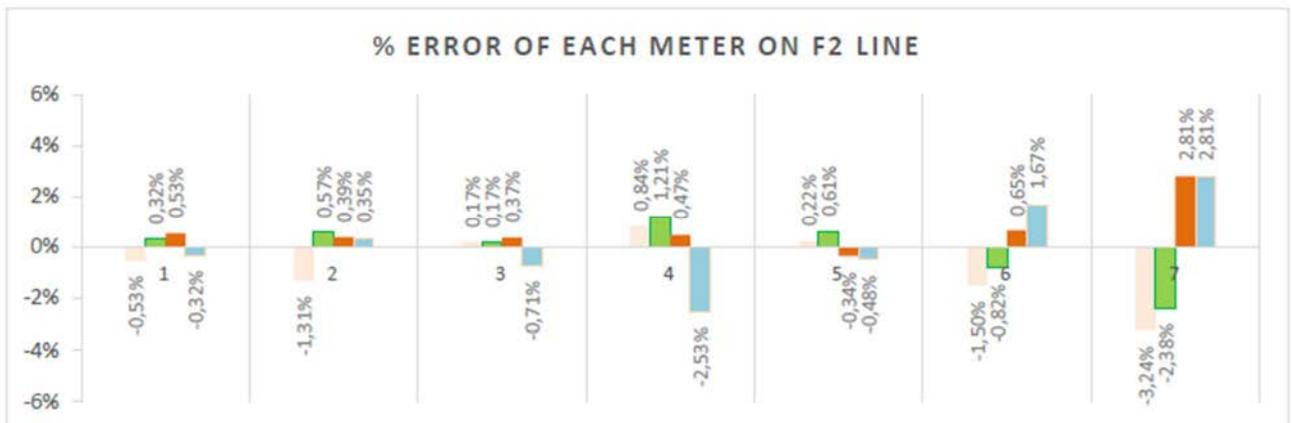
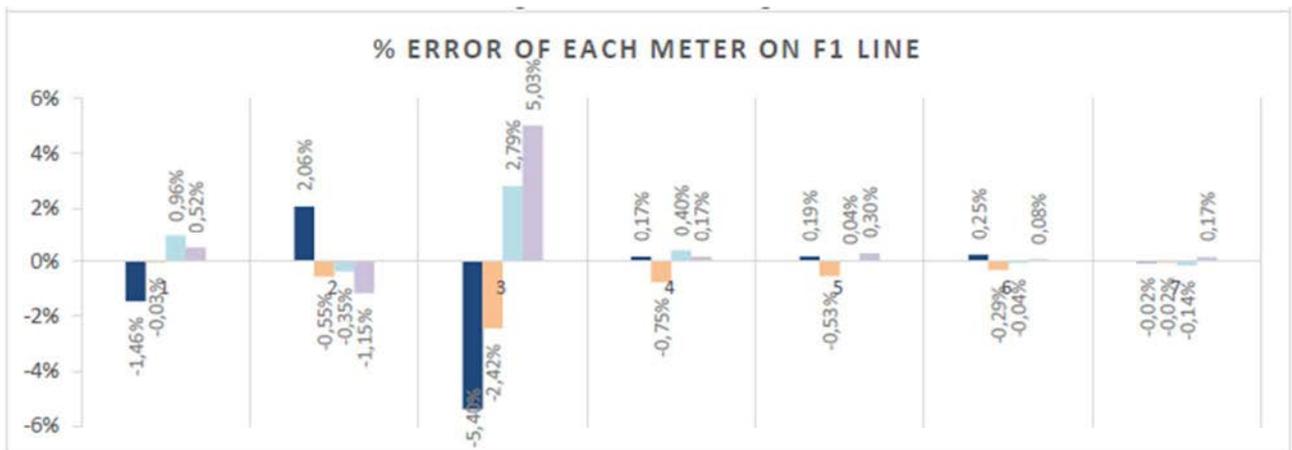
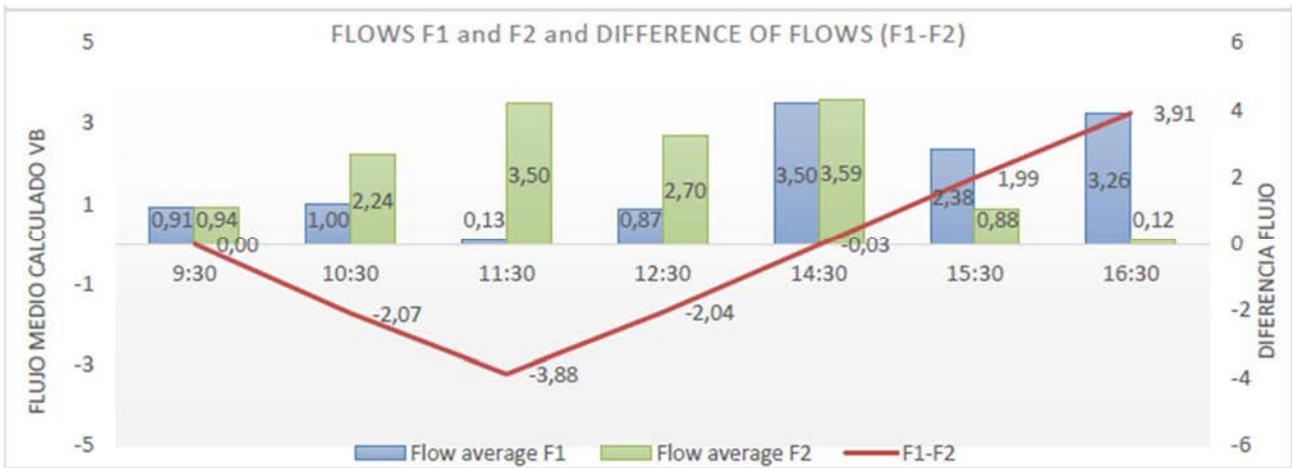


Tabla 12. Resultados la media del volumen medido y la desviación de la lectura de cada contador para una mezcla de 85 % GN / 15 % H2.

		-	10:30	11:30	13:00	14:00	16:00	17:00	18:00
		<i>Pressure bar</i>	1,08	1,12	1,15	1,18	1,24	1,23	1,24
		<i>Temperature °C</i>	4,40	7,70	11,30	14,30	21,30	21,00	21,30
	F1	<i>Flow meter m³/h</i>	0,96	0,97	0,07	0,88	3,41	2,61	3,38
		<i>Flow Lab m³/h</i>	1,00	1,02	0,17	0,98	4,29	3,02	4,02
		<i>Vb calculated average m³</i>	0,91	1,00	0,13	0,87	3,50	2,38	3,26
U	MIT0032315647533	<i>Vb error</i>	0,52%	-1,15%	5,03%	0,17%	0,30%	0,08%	0,17%
	MIT0032315647532	<i>Vb error</i>	0,96%	-0,35%	2,79%	0,40%	0,04%	-0,04%	-0,14%
M	MIT0032315647538	<i>Vb error</i>	-0,03%	-0,55%	-2,42%	-0,75%	-0,53%	-0,29%	-0,02%
	MIT0032315647535	<i>Vb error</i>	-1,46%	2,06%	-5,40%	0,17%	0,19%	0,25%	-0,02%
	F2	<i>Flow meter m³/h</i>	0,96	2,76	3,47	2,62	3,45	0,91	0,09
		<i>Flow Lab m³/h</i>	1,00	3,09	3,98	3,02	4,35	1,03	0,11
		<i>Vb calculated average m³</i>	0,94	2,24	3,50	2,70	3,59	0,88	0,12
U	MIT0032315775811	<i>Vb error</i>	-0,32%	0,35%	-0,71%	-2,53%	-0,48%	1,67%	2,81%
	MIT0032315775810	<i>Vb error</i>	0,53%	0,39%	0,37%	0,47%	-0,34%	0,65%	2,81%
M	MIT0032315647536	<i>Vb error</i>	-0,53%	-1,31%	0,17%	0,84%	0,22%	-1,50%	-3,24%
	MIT0032015545174	<i>Vb error</i>	0,32%	0,57%	0,17%	1,21%	0,61%	-0,82%	-2,38%



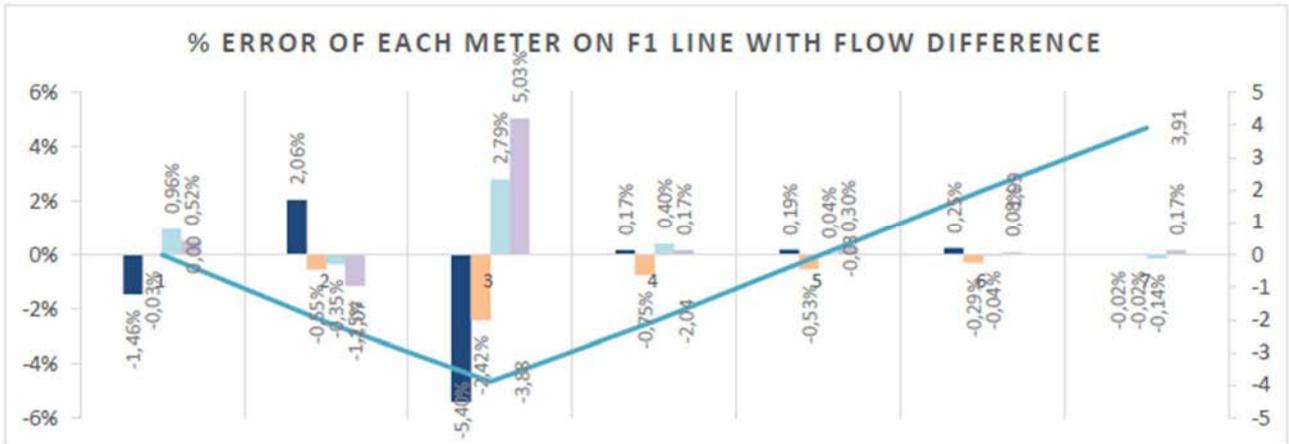


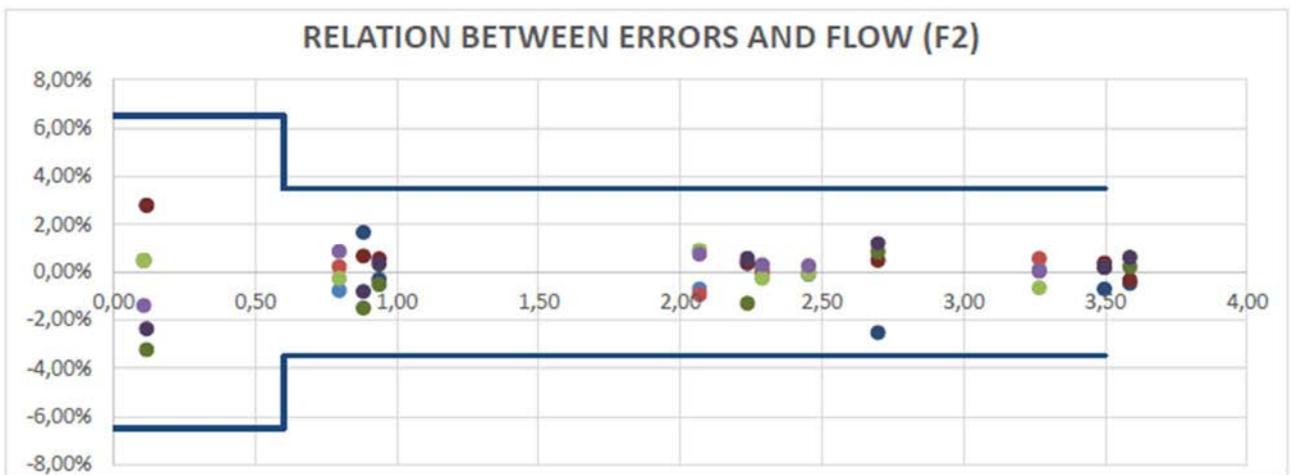
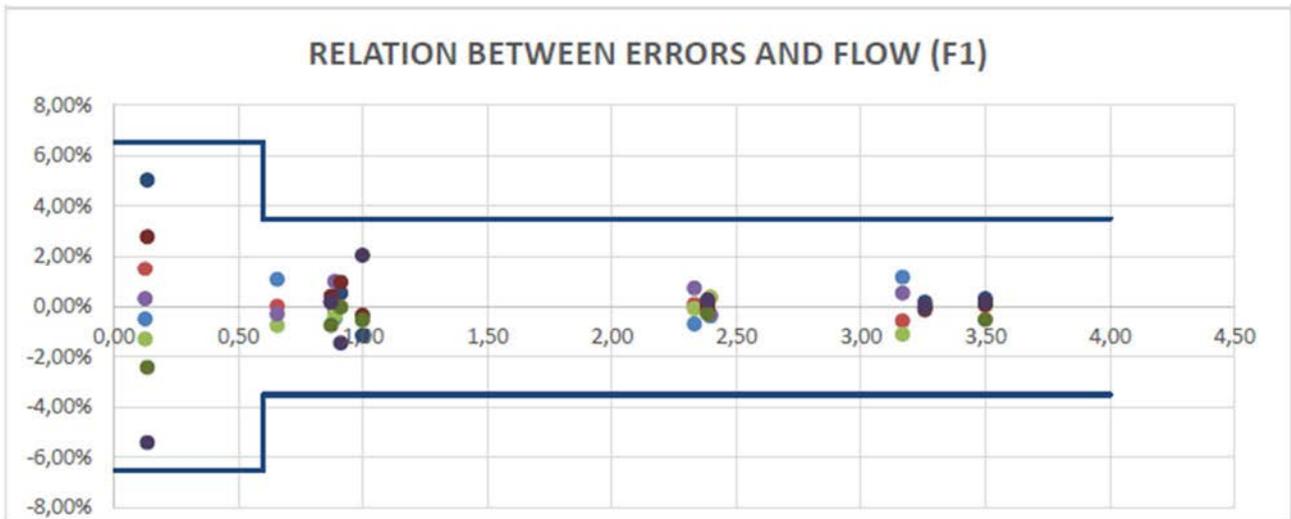
Los resultados con un 15 % de H₂ indican que:

1. La temperatura no influyen en la precisión de los contadores.
2. La presión atmosférica no interviene en las desviaciones de lecturas entre los medidores.

3. Precisión en caudales bajos: para caudales bajos ($\sim 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$), los errores son mayores. Sin embargo, esto es normal y las normas MID (EN 1359 y EN 14236) describen este comportamiento considerando una tolerancia de error más alta en caudales bajos, como se puede ver en los siguientes gráficos.

4. Errores en caudales altos y disposición de las líneas de contadores: La correlación de los datos entre los diferentes % de H_2 confirma la hipótesis de una interferencia entre las dos líneas cuando se fijan caudales muy diferentes en las 2 líneas.

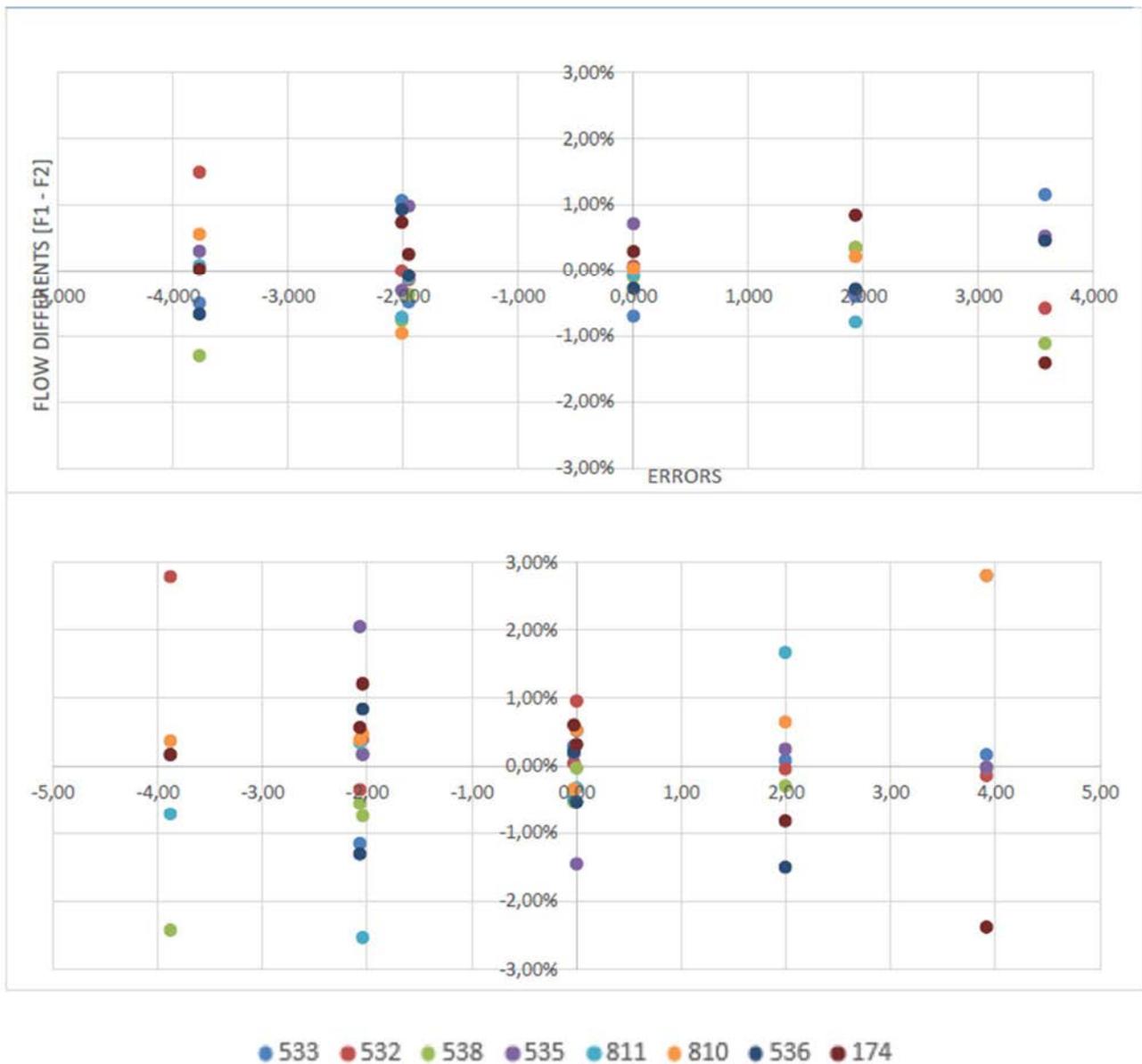




Se observa un comportamiento similar en los dos caudales, en donde se ve un aumento del porcentaje relativo de error en los caudales bajos.

Esto era esperable ya que se calculan de forma relativa por tanto en base a la media de los cálculos de los 4 contadores de la misma línea. En cualquier caso, estamos dentro de los límites MID de error por lo que es normal tener un poco de oscilación.

A continuación, se muestran los errores de todos los contadores y los relacionaremos con la diferencia de las dos corrientes, como hicimos antes, pero correlacionando el comportamiento de todos los contadores (F1-F2).



Los contadores miden correctamente el caudal con diferentes mezclas de GN / H₂.

También es interesante observar que, en caso de diferencias de lectura entre los contadores, las mediciones de una tecnología metrológica determinada son coherentes entre sí:

Los contadores US muestran la misma tendencia y los contadores mecánicos la misma tendencia.

Las divergencias entre las dos tecnologías se producen cuando los flujos muy diferentes de las 2 líneas se afectan mutuamente. Esto se debe al hecho de que los contadores US son mucho más sensibles a las pequeñas variaciones y mucho más precisos que los contadores mecánicos cuando la presión no es estable. De hecho, representa la diferencia de capacidad de medición de cada tecnología y con el

medidor ultrasónico pudimos revelar la interferencia. Los contadores US están más cerca de la unión, por lo que reciben el mayor efecto de la interferencia.

8.3.4.2 Cocina de GN

Como resultado de esta prueba se obtiene un resultado visual del funcionamiento de los quemadores de la cocina de GN.



Figura 57. Quemadores en funcionamiento con diferentes mezclas de H2/GN.

Como se ve en las imágenes, no se aprecia modificación ni en forma y ni el color de la llama generada en el equipo.

Dentro del proyecto también se ha estudiado el tiempo que necesita 500 ml de agua para pasar de 30°C a 90°C (cerca de ebullición) con diferentes mezclas de H₂. El resultado es que el agua se calienta a la misma velocidad, independientemente del nivel de H₂.



Figura 58. Estudio de la velocidad de calentamiento del agua a diferentes mezclas GN/H₂.

Tabla 13. Resultados de la velocidad de calentamiento del agua con diferentes mezclas GN/H₂.

	T ^a inicial (°C)	T ^a final (°C)	t (s)
100 % GN	30	90	191
5 % H ₂	30	90	189
10 % H ₂	30	90	193
15 % H ₂	30	90	190
20 % H ₂	30	90	194

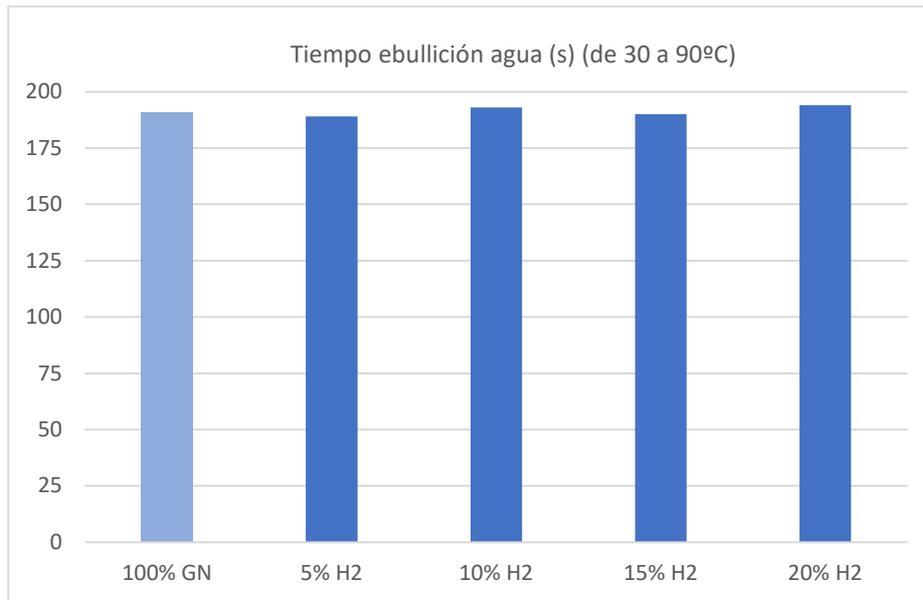


Figura 59. Tiempo de ebullición del agua con diferentes mezclas GN/H₂.

Se concluye que la cocina de GN puede operar con mezclas H₂ con GN hasta el 20 %vol. de H₂.

8.3.4.3 Caldera de GN

En la tabla siguiente se muestran los datos obtenidos en las diferentes pruebas de funcionamiento de la caldera:

Tabla 14. Resultados del funcionamiento de la caldera para diferentes mezclas de GN/H₂.

		%H ₂ (Anisol)	Sonda Humos						Consumo Combustible			Energía Útil		
			Tª Ambiente	Tª Humos	%O ₂	CO (ppm)	%CO ₂	NOx (ppm)	Q inicio	Q final	T. entre medidas	Caudal AC (l/min)	Tª Salida (°C)	Tª Entrada (°C)
1	100% GN	0,0%	18,4	31,1	4,09	24	9,6	30,0	69,8010	69,9680	8'15 "	16,2	32,6	22,4
2	100% GN	0,0%	18,0	31,0	4,11	24	9,6	30,0	70,0520	70,2135	8'00 "	16,2	32,4	22,4
3	5% H ₂	5,0%	18,0	30,9	4,39	19	9,4	25,0	70,6090	70,7725	8'00 "	16,2	32,3	22,4
4	5% H ₂	5,0%	18,1	30,9	4,40	19	9,4	25,0	70,8060	70,9710	8'00 "	16,2	32,2	22,3
5	10% H ₂	10,4%	18,1	31,0	4,71	15	9,3	20,0	71,1740	71,3420	8'00 "	16,2	32,1	22,4
6	10% H ₂	10,4%	18,3	30,9	4,73	15	9,3	20,0	71,4175	71,5925	8'15 "	16,2	32,1	22,4
7	15% H ₂	15,3%	18,2	31,0	5,02	13	9,1	16,0	71,9640	72,1370	8'00 "	16,2	32,0	22,4
8	15% H ₂	15,3%	18,2	31,1	5,02	13	9,1	16,0	72,2110	72,3845	8'00 "	16,2	32,0	22,5
9	20% H ₂	20,2%	18,0	30,4	5,27	11	9,0	14,0	72,8195	73,0040	8'15 "	16,2	31,9	22,5
10	20% H ₂	20,2%	18,3	30,3	5,35	11	8,9	14,0	73,0665	73,2510	8'15 "	16,2	32,0	22,6

La medición del consumo de combustible se realiza a una presión de 160 mbar(g), en un contador doméstico de membranas tipo G4.

La composición del GN utilizado en las pruebas se obtiene de la información publicada por Enagas (GTS):

Fecha	PCS diario	PCS mensual	PCS bimestral	PCI	Densidad relativa	N ₂	CO ₂
19-nov-23	11,504	11,553	11,61	10,358	0,5806	0,1631	0

A partir de estas mediciones, se obtienen los resultados de cada uno de los escenarios de estudio.

- **100 % GN / 0 % H₂**

La primera prueba de funcionamiento de la caldera se ha realizado usando como combustible 100 % GN. A partir de las 2 mediciones realizadas para esta composición de gases se obtienen los siguientes resultados:

El consumo de combustible ha sido:

Consumo Combustible				
m ³ /h	Nm ³ /h	% H ₂	PCS (kWh/Nm ³)	Energía (kW) PCI
1,213	1,317	0%	11,504	13,633

La energía útil producida en la caldera ha sido:

Energía Útil				
Caudal AC (l/min)	T ^a Salida (°C)	T ^a Entrada (°C)	Energía (kW)	Eficiencia (%)
16,2	32,5	22,4	11,415	83,7%

Los datos de los gases de combustión de la caldera han sido:

Sonda Humos					
T ^a Ambiente	T ^a Humos	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	NOx (ppm)
18,2	31,1	4,10	24	9,6	30,0

- **95 % GN / 5 % H₂**

La segunda prueba de funcionamiento de la caldera se ha usado como combustible 95 % GN y 5 % H₂. A partir de las 2 mediciones realizadas para esta composición de gases se obtienen los siguientes resultados:

El consumo de combustible ha sido:

Consumo Combustible				
m ³ /h	Nm ³ /h	% H ₂	PCS (kWh/Nm ³)	Energía (kW) PCI
1,232	1,338	5,0%	11,106	13,374

La energía útil producida en la caldera ha sido:

Energía Útil				
Caudal AC (l/min)	T ^a Salida (°C)	T ^a Entrada (°C)	Energía (kW)	Eficiencia (%)
16,2	32,25	22,35	11,189	83,7%

Los datos de los gases de combustión de la caldera han sido:

Sonda Humos					
T ^a Ambiente	T ^a Humos	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	NOx (ppm)
18,1	30,9	4,40	19	9,4	25,0

- **90 % GN / 10 % H₂**

Para la tercera prueba de funcionamiento de la caldera se ha usado como combustible 90 % GN y 10 % H₂. A partir de las 2 mediciones realizadas para esta composición de gases se obtienen los siguientes resultados:

El consumo de combustible ha sido:

Consumo Combustible				
m ³ /h	Nm ³ /h	% H ₂	PCS (kWh/Nm ³)	Energía (kW) PCI
1,266	1,375	10,4%	10,676	13,210

La energía útil producida en la caldera ha sido:

Energía Útil				
Caudal AC (l/min)	T ^a Salida (°C)	T ^a Entrada (°C)	Energía (kW)	Eficiencia (%)
16,2	32,10	22,40	10,963	83,0%

Los datos de los gases de combustión de la caldera han sido:

Sonda Humos					
T ^a Ambiente	T ^a Humos	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	NOx (ppm)
18,2	31,0	4,72	15	9,3	20,0

- **85 % GN / 15 % H₂**

Para la cuarta prueba de funcionamiento de la caldera se ha usado como combustible 85 % GN y 15 % H₂. A partir de las 2 mediciones realizadas para esta composición de gases se obtienen los siguientes resultados:

El consumo de combustible ha sido:

Consumo Combustible				
m ³ /h	Nm ³ /h	% H ₂	PCS (kWh/Nm ³)	Energía (kW) PCI
1,299	1,411	15,3%	10,287	13,059

La energía útil producida en la caldera ha sido:

Energía Útil				
Caudal AC (l/min)	T ^a Salida (°C)	T ^a Entrada (°C)	Energía (kW)	Eficiencia (%)
16,2	32,00	22,45	10,794	82,7%

Los datos de los gases de combustión de la caldera han sido:

Sonda Humos					
T ^a Ambiente	T ^a Humos	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	NOx (ppm)
18,2	31,1	5,02	13	9,1	16,0

- **80 % GN / 20 % H₂**

La última prueba de funcionamiento de la caldera se ha realizado usando como combustible 80 % GN y 20 % H₂. A partir de las 2 mediciones realizadas para esta composición de gases se obtienen los siguientes resultados:

El consumo de combustible ha sido:

Consumo Combustible				
m ³ /h	Nm ³ /h	% H ₂	PCS (kWh/Nm ³)	Energía (kW) PCI
1,342	1,447	20,2%	9,897	12,976

La energía útil producida en la caldera ha sido:

Energía Útil				
Caudal AC (l/min)	T ^a Salida (°C)	T ^a Entrada (°C)	Energía (kW)	Eficiencia (%)
16,2	31,95	22,55	10,624	81,9%

Los datos de los gases de combustión de la caldera han sido:

Sonda Humos					
T ^a Ambiente	T ^a Humos	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	NOx (ppm)
18,2	30,4	5,31	11	9,0	14,0

Respecto al consumo de combustible de la caldera, se aprecia que a mayor porcentaje de blending:

- El caudal de gas consumido aumenta, hasta un 10 % más de caudal para el 20 % de H₂.
- La energía primaria demandada por la caldera disminuye. Con un 20 % de H₂ la caldera demanda un 14 % menos de energía.

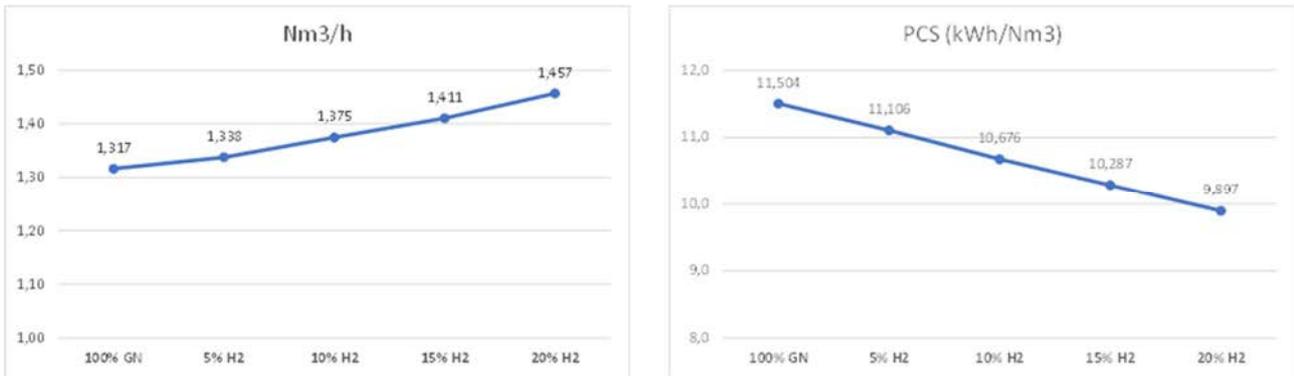


Figura 60. Caudal consumido y energía primaria demandada por la caldera con diferentes mezclas GN/H2.

El análisis de las pruebas realizadas indica que la eficiencia de la caldera se reduce con la mezcla de H₂ en el GN. La disminución de la eficiencia se aprecia para blendings superiores al 5 % H₂. Para un 20 % de H₂ en la mezcla, la disminución de la eficiencia de la caldera es de 1,8 %.

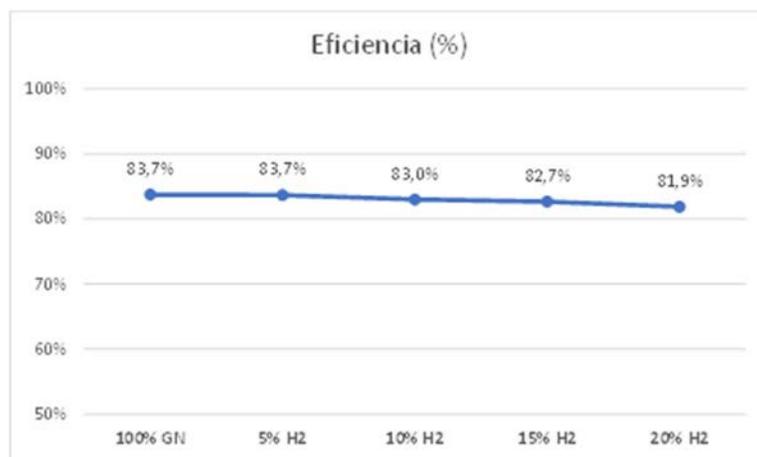


Figura 61. Eficiencia de la caldera con diferentes mezclas GN/H2.

Respecto a las emisiones de la caldera:

- Aumentan el contenido en O₂ de los humos.
- Se reducen las emisiones de CO₂.
- Se reduce la producción de inquemados (CO)
- Se reducen las emisiones de NOx.

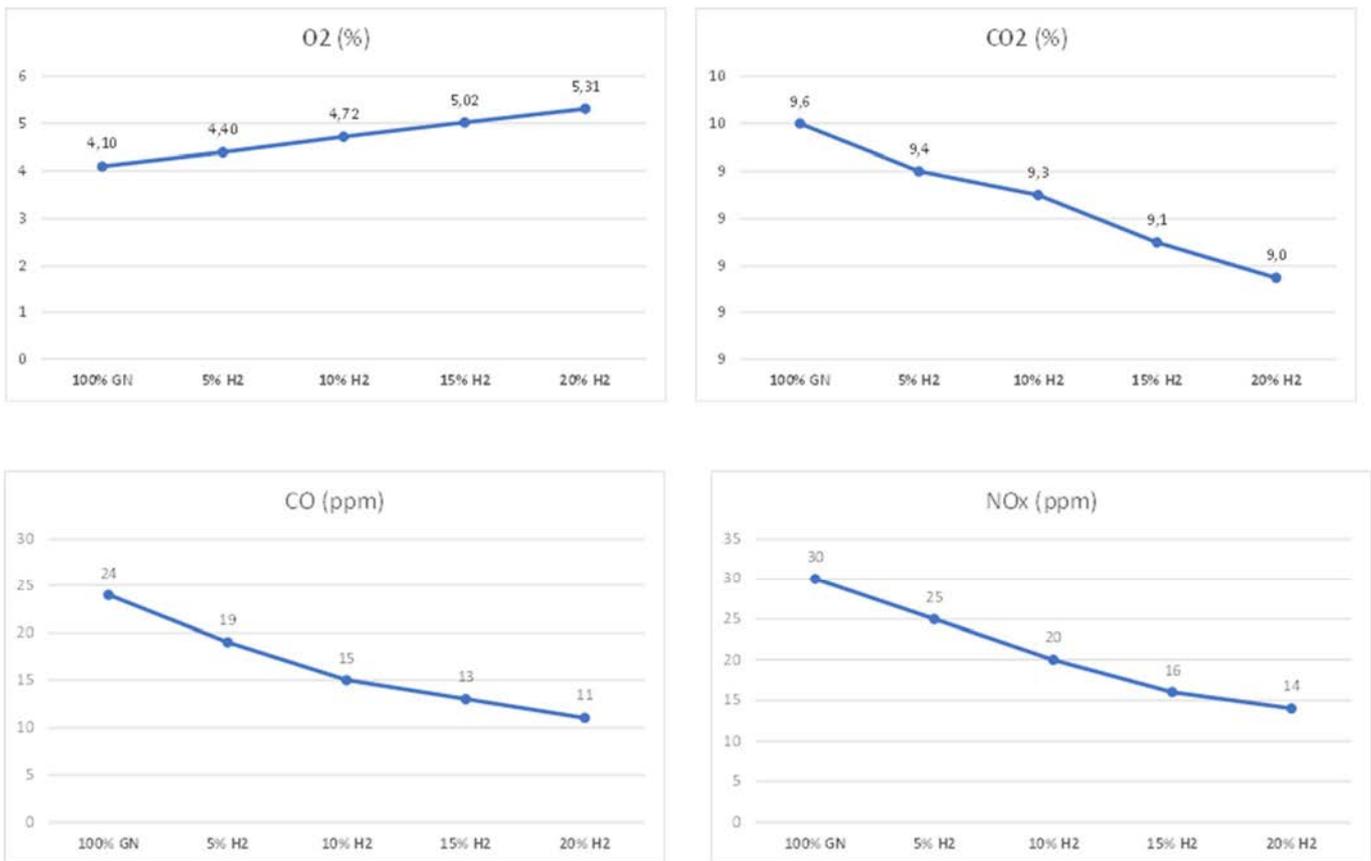


Figura 62. Medición de O₂, CO₂, CO y NO_x para diferentes mezclas de GN/H₂.

8.3.5 Ensayos de compatibilidad de materiales en autoclaves

8.3.5.1 CAMPAÑA 1, 2 y 3

Las campañas 1, 2 y 3 se realizaron previamente y están reportadas en los siguientes informes:

- E.1.1. Informe Caracterización Materiales Autoclave. Campaña#1
- E.1.2. Informe Caracterización Materiales Autoclave. Campaña#2
- E.1.3. Informe Caracterización Materiales Autoclave. Campaña#3

A continuación, se presenta de manera resumida los resultados obtenidos de las campañas 1, 2 y 3. Todos los materiales han sido expuestos a una atmósfera de 100 % H₂, a una presión de 16 bar durante 1000 horas.

A continuación, se muestran las Tablas con las referencias de los materiales y el tipo de ensayo realizado:

CAMPAÑA 1:

Ensayo	Normativa	Referencia								
		M1	M1X	M2	M3X	P1	P2	J1	J2	J3
Caracterización química	ASTM E415				•					
Análisis del contenido de H ₂	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							•	•	•
Compression set	ISO 815-1							•		•

CAMPAÑA 2:

Ensayo	Normativa	Referencia				
		P1-1	P3	J1-2	MEM1	MEM2
Ensayo de tracción poliméricos	ISO 527-2	•	•			•
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	•			•

En las siguientes Tablas se recogen los resultados de cada campaña:

CAMPAÑA 1:

Componente y material	Ref	Imagen	Resultado	
Tubería de acero Api 5l Grado B	M1		El material no ha sufrido fragilización por H ₂ 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 H ₂ .	✓
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 H ₂ .	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	MEM		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 H ₂ en las condiciones de exposición.	✓
Tubería de acero Api 5l Grado B X42 con soldadura	M4X		El material no ha sufrido fragilización por H ₂ en las condiciones de exposición.	✓
Tubería de fundición	M2-2		El material ha sufrido fragilización por H ₂ 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 H ₂ .	✓

8.3.5.2 CAMPAÑA 4

Los anillos o juntas de goma destinados a utilizarse en condiciones de H₂ a presión deben poseer una alta resistencia y una integridad de sellado para un funcionamiento óptimo. Se han seleccionado dos tipos de juntas de caucho de acrilonitrilo butadieno (NBR) para los ensayos debido a las siguientes razones: 1) Las juntas seleccionadas son comúnmente utilizadas en la red de distribución de GN, 2) en bibliografía se muestra que cuando el material opera a altas presiones de H₂ (superiores a 750 bares [12]) puede existir susceptibilidad a la absorción de gas, generando una expansión volumétrica y/o provocando ampollas, y cambio en las propiedades mecánicas, por lo tanto al envejecimiento prematuro. Debido a que en la red de distribución las presiones son mucho más bajas, del orden de 16 bares, y que no se ha podido encontrar literatura ni datos experimentales que revelen el comportamiento de estos materiales en estas condiciones, se consideró relevante la realización de ensayos a la presión de diseño de la red de distribución de gas.

Es por tanto el principal objetivo de esta campaña evaluar el efecto de la exposición continua durante 1000 horas a una atmósfera de 100% de H₂ a una presión de 16 bares en dos tipos de juntas poliméricas.

Materiales y Componentes

Se detalla a continuación los materiales y tipo de ensayos realizados para esta campaña.

1.1 Juntas NBR-1 (Referencia J1-3)

Descripción: JUNTA PLANA, Caucho de acrilonitrilo butadieno (NBR) con refuerzo metálico.

Tipo de junta: DN25 PN 10 40

Dimensiones: Diámetro exterior de 71 mm, espesor de 4 mm.

Referencia visual: Consulte la Figura 63 para una representación gráfica.



Figura 63. Juntas NBR-1 (Referencia J1-3).

1.2 Juntas NBR-2 (Referencia J5)

Descripción: JUNTA PLANA, Caucho de acrilonitrilo butadieno (NBR)

Tipo de junta: DN25-Atusa-NBR.

Dimensiones: Diámetro de 115 mm, espesor de 2 mm.

Referencia visual: Consulte la Figura 64 para una representación gráfica.



Figura 64. Juntas NBR-2 (Referencia J5).

Condiciones del ensayo

Condiciones de Exposición

Atmósfera: 100% H₂

Presión: 16 bar.

Duración de la exposición: 1000 horas.

Dispositivo de Compresión

En esta campaña experimental, se han sometido a prueba juntas comprimidas con el propósito de simular condiciones de funcionamiento más cercanas a las que se encontrarían en servicio. Con este fin, se ha desarrollado un dispositivo específico (véase la Figura 65) en el cual se ha posicionado la junta entre dos placas metálicas, aplicando un torque de 5 Nm (Newtons x metro) para lograr la compresión adecuada de la junta entre ambas placas.

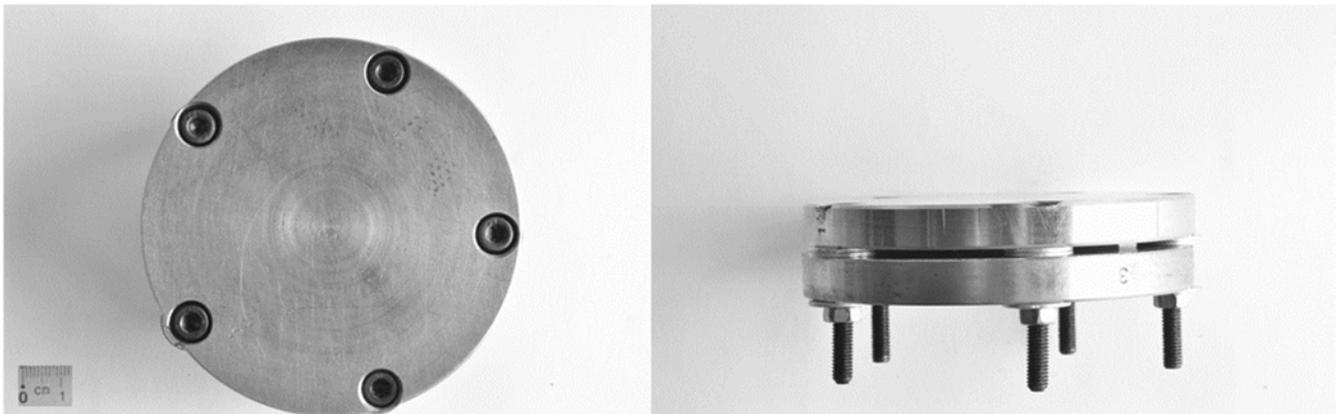


Figura 65. Dispositivo compresión juntas.

Resultados

Junta NBR-1

Condiciones de Ensayo (J1-3H2-COMP):

- Junta sometida a ensayo en el dispositivo de compresión.
- Exposición durante 1000 horas en una atmósfera de H₂ a 16 bar.

Inspección Visual

Una vez finalizado el periodo de exposición, las muestras se extrajeron del autoclave y se quitaron del dispositivo de compresión para poder realizar la inspección visual de las juntas en el momento de extraerlas del autoclave.

El objetivo es la detección de ampollamiento tras la exposición.

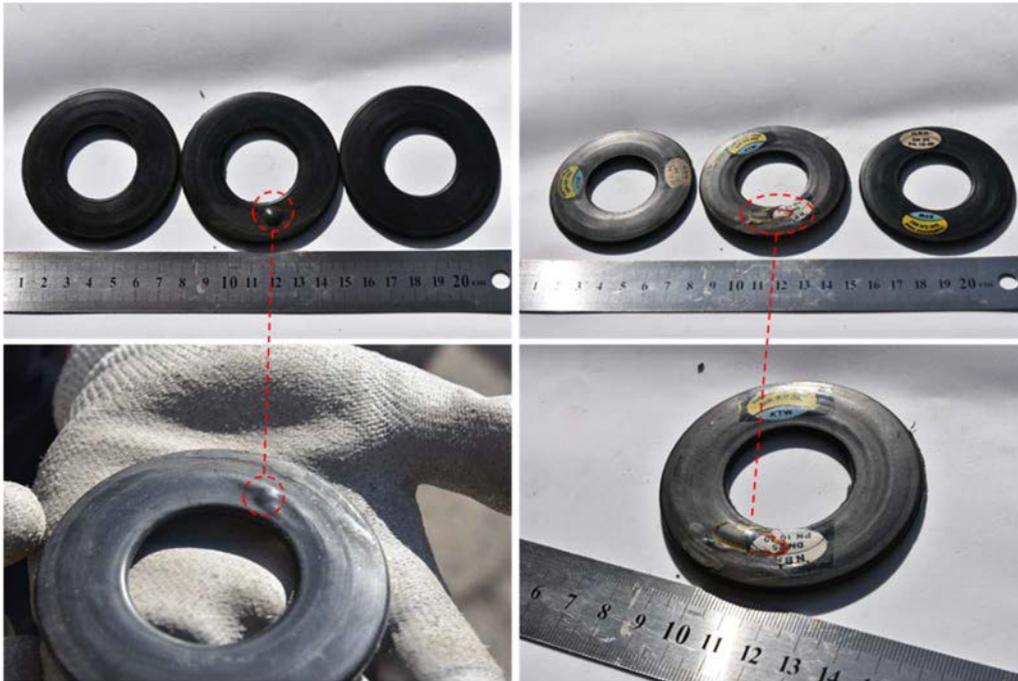


Figura 66. Muestras juntas J1-3H2-comp. Evidencia de ampollamiento en anverso y reverso de las juntas.

Análisis de Resultados Referencia J1-3H-COMP

En la Figura 66 se presentan imágenes de las juntas tras la exposición donde se indica con líneas rojas punteadas la existencia de ampollamiento en una de las tres juntas ensayadas. Puede verse que el ampollamiento se da en la zona cercana al radio media de la junta que es donde se encuentra la malla metálica de refuerzo.

Junta NBR-2

Condiciones de Ensayo

- J5-H2: Tras exposición 1000 horas atmósfera 100% de H₂ a 16 bar.
- J5-H2-COMP: Junta en dispositivo de compresión y tras exposición 1000 horas atmósfera 100 % de H₂ a 16 bar

Inspección Visual

Inspección de las juntas con y sin compresión.

Las juntas ensayadas no presentan ampollamiento en el momento de extracción de las muestras del autoclave tras estar en 1000 horas en exposición.



Figura 67. Muestras juntas J5-H2 (superior) y J5-H2-COMP (inferior).

Discusión resultados Campaña #4

Los resultados de la Campaña #4 revelan interesantes hallazgos sobre el procedimiento de ensayo y el comportamiento de diferentes tipos de juntas poliméricas en condiciones de presión de H₂. Uno de los aspectos más destacados es la aparición de ampollamiento en la superficie de las juntas, un fenómeno que se ha observado en juntas de referencia específicas, como J1-3H2-COMP. En

particular, se ha observado que la junta NBR con referencia J1, al igual que en campañas anteriores (#1 y #2) sin la aplicación de presión mecánica, presenta ampollamiento con presión mecánica. Sin embargo, la junta de NBR con referencia J5, expuesta a H₂ tanto con como sin compresión, no muestra signos de ampollamiento, indicando así la potencial aptitud de este tipo de juntas para operar en ambientes de H₂.

Este contraste en el comportamiento de las juntas NBR J1 y J5, ambas fabricadas con el mismo material (Nitrilo de caucho), es un aspecto intrigante y merece una atención especial. Uno de los posibles factores que podrían contribuir a esta diferencia de comportamiento podría estar relacionado con la presencia de una malla metálica en el interior de las juntas con referencia J1. La malla metálica podría influir en la interacción entre el H₂ y el material de la junta de manera que aumente la susceptibilidad al ampollamiento. Además, según indican algunos trabajos de la literatura [13], [14], el ampollamiento puede estar relacionado con la velocidad de descompresión del autoclave, lo que no estaría relacionado al efecto del H₂ en sí. Cuando la velocidad de descompresión es suficientemente rápida, no se le da tiempo al H₂ a salir del material y las moléculas de H₂ gas pueden quedar atrapadas en el interior del acero, lo que puede generar ampollas y grietas en la superficie y ampollar el caucho. Este fenómeno puede explicar por qué se observa ampollamiento cuando se libera la presión rápidamente. Este último aspecto requiere de mayor estudio para entender el origen y poder establecer de forma clara el efecto del ampollamiento.

Conclusiones Campaña #4

A partir de los resultados obtenidos, se extraen las siguientes conclusiones:

- La junta NBR con referencia J1 exhibe un comportamiento similar al observado en campañas anteriores (#1 y #2). Se identifica la presencia de ampollamiento en la superficie de las juntas después de 1000 horas de exposición a una atmósfera de 100 % H₂ a 16 bar y en condiciones de compresión.
- La junta NBR con referencia J5 no muestra signos de ampollamiento después de la exposición de 1000 horas en H₂, ya sea en condiciones de compresión o sin compresión.
- Dado que ambas juntas están fabricadas con el mismo material (Nitrilo de caucho), una de las hipótesis que se maneja es que la presencia de un refuerzo metálico en el interior de las juntas con referencia J1 podría estar relacionada con el ampollamiento observado. El H₂ atrapado en el refuerzo

metálico es liberado a una velocidad mayor que el atrapado en el polímero y por lo tanto termina acumulándose en el mismo polímero.

- Es importante determinar si el efecto de la descompresión del autoclave puede afectar la presencia de empollamiento. La literatura establece que el ampollamiento puede producirse tras la rápida descompresión del autoclave, por lo que, en futuras intervenciones, se debe asegurar que la descompresión sea lo más lenta posible para evitar la liberación brusca de gas y así minimizar el riesgo de generar empollamiento mediante este mecanismo.

Los resultados sugieren que el ampollamiento en las juntas de caucho bajo alta presión de H₂ está relacionado con varios factores, incluida la presencia de una malla metálica en el interior de la junta y la velocidad de descompresión. Estos hallazgos proporcionan información valiosa para comprender y prevenir el deterioro de las juntas de caucho en entornos de alta presión de H₂, lo que es esencial para garantizar la seguridad y la integridad de los sistemas que utilizan estos materiales. Sin embargo, se requieren investigaciones adicionales para profundizar en los mecanismos exactos detrás de este fenómeno y su relación con la presencia de refuerzos metálicos.

8.3.5.3 CAMPAÑA 5

El objetivo principal de este ensayo es evaluar el comportamiento mecánico de un tramo de tubería de fundición de hierro bajo diferentes condiciones de exposición al H₂. Específicamente, se busca determinar si la presión del H₂ afecta la fragilización del material y si este experimenta algún tipo de deterioro en sus propiedades mecánicas

Descripción del Material Ensayado:

Tipo de Material: Tubería de Fundición de Hierro.

Diámetro de la Tubería: 6 pulgadas.

Espesor de la Tubería: 6,5 mm.

Condiciones de Exposición:

Las probetas de la tubería de fundición se sometieron a la exposición en una atmósfera de H₂ al 100 % a una presión de 3 bar durante un período de 1000 horas. Esta exposición representa una situación crítica en la que se evalúa la posible fragilización del material debido a la presencia de H₂. Luego de la exposición, y con el objetivo que el H₂ se mantenga inmóvil durante el proceso de transporte hasta

el laboratorio, las probetas se sumergieron inmediatamente en nitrógeno líquido, y luego se templaron para a temperatura ambiente para la realización del ensayo SSRT. A continuación, se incluyen las referencias de las probetas según su exposición:

M2-2AR: Estado en la recepción.

M2-3H2: Después de exposición de 1000 horas en atmósfera 100 % de H₂ a 3 bar.

Parámetros Evaluados en el Ensayo:

Los ensayos de tracción se llevarán a cabo según norma EN ISO 6892-1 aplicando una velocidad de deformación inferior a 0.0003 s⁻¹ hasta rotura.

Tensión Última de Rotura (UTS): Se mide la máxima tensión que el material puede soportar antes de fracturarse bajo carga.

Limite elástico (YS): Se evalúa la tensión a la que el material comienza a deformarse plásticamente (desvío del comportamiento elástico lineal en la curva tension-deformacion)

Alargamiento a la Rotura (A): Se determina cuánto se alarga la probeta antes de fracturarse.

Reducción de la Sección Transversal (Z): Se mide la reducción de la sección transversal de la probeta en el punto de fractura.

Resultados del Ensayo:

En la tabla y el gráfico que se muestran a continuación se presenta los resultados obtenidos en los ensayos de propiedades mecánicas (UTS, YS, A y Z) para la tubería de fundición en los estados mencionados: recepción (M2-2AR) y después de la exposición de 1000 horas en atmósfera de H₂ a 3 bar (M2-3H2). Además de los resultados experimentales se incluye incluyen los resultados de cada probeta y también se presenta la media de estos resultados.

Tabla 15. Resultados ensayos experimentales en H₂ gas y en aire, probetas SSRT.

<i>Sample label</i>	<i>UTS (MPa)</i>	<i>YS (MPa)</i>	<i>A (%)</i>	<i>Z (%)</i>
M2-2AR-1	458	334	19,6	19
M2-3H2-1	516	398	15	15,6
M2-2AR-2	460	330	22,1	24,7
M2-3H2-2	515	397	17,3	19
M2-2AR-2	456	334	13,2	16,3
M2-3H2-2	515	396	18,8	19
M2-2AR-3	448	332	10,5	12,5
M2-3H2-3	513	394	13,2	14
M2-2AR-3				
M2-3H2-3	515	395	15,6	14,4
M2-2AR-4				
M2-3H2-4	515	397	22,6	19
M2-2AR-4				
M2-3H2-4	515	396	17,2	17,4
M2-2AR-Mean	456	333	16,4	18,1
M2-3H2-Mean	515	396	16,1	16,9
M2-2AR-SD	4,6	1,7	4,7	4,4
M2-3H2-SD	0,8	1,2	2,8	2,1
M2-2AR-CoV	1,0%	0,5%	28,7%	24,5%
M2-3H2-CoV	0,2%	0,3%	17,4%	12,2%

Como puede verse en los resultados presentados en la Tabla 15, los valores medios de tensión de rotura (UTS) y límite elástico aumentan luego de la exposición (13 % y 19,2 %, respectivamente) mientras que el alargamiento y la reducción de área, como se esperaba debido al efecto fragilizado del H₂, se reducen aunque en menor proporción (1,7 % y 6,8 %, respectivamente). Los valores de desviación estándar muestran además que la dispersión de los resultados es consistentemente menor en los resultados en ambientes de H₂ debido a que la muestra de ensayos es significativamente mayor, lo que puede verse también en la gráfica inferior de la Figura 68 mediante la comparación de los resultados del coeficiente de variación (CoV), lo que justifica el esfuerzo de haber realizado más ensayos en ambientes de H₂ y así mejorar la robustez de la caracterización. Es interesante mostrar que, dentro de los parámetros analizados, las variables que presentan mayor dispersión son los valores de alargamiento a la rotura (A) y reducción de área transversal (Z).

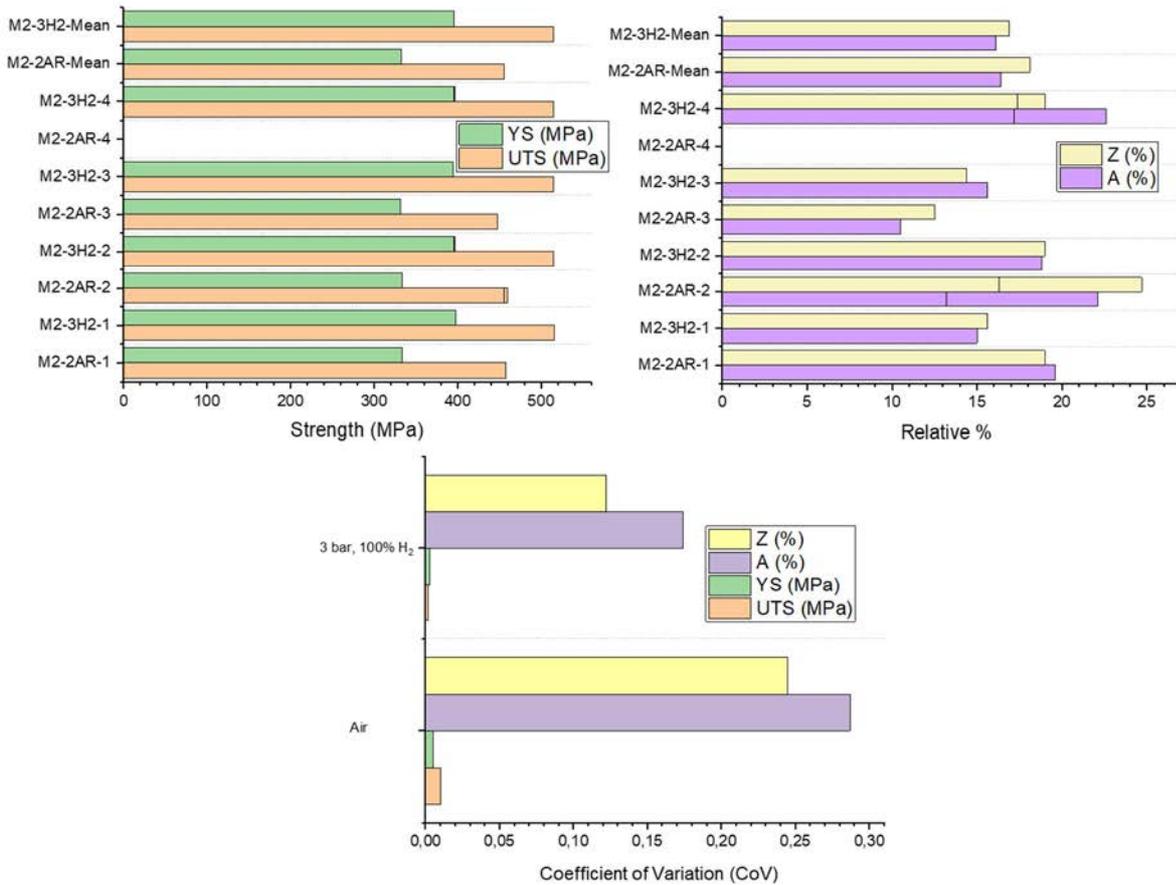


Figura 68. Comparativa de resultados experimentales de probetas en aire (AR) y probetas sometidas a 1000 h a 3 bares de presión de H₂ (H₂).

Para evaluar la fragilización por H₂, se evalúa la estricción relativa en ambos estados y se calcula el efecto de la fragilización mediante el cálculo de la reducción relativa del área transversal (RRA). Las variaciones estadísticas en las propiedades de tracción experimentales deben ser tomadas en cuenta si se quiere evaluar la robustez de las conclusiones basadas en cálculos basados en mediciones experimentales. Dependiendo del tipo de evaluación que se esté realizando, generalmente es necesario utilizar propiedades de límite inferior o propiedades medias. Para estar del lado de la seguridad, evaluaremos las propiedades mecánicas medias y las medias menos dos desviaciones estándar.

$RRA = Z^{H_2}/Z^{AR}=0,93$ (valores promedio)

$RRA = Z^{H_2}/Z^{AR}=1,38$ (valores promedio – 2DS)

donde Z^{H_2} y Z^{AR} son las reducciones del área transversal en H₂ y en el ensayo en aire, respectivamente. Según la norma ISO 16573 si el valor es mayor que 0.85, se considera que el

material no ha sufrido fragilización por H₂. De acuerdo con los resultados basados en valores promedios y en valores límites inferiores sugieren que el material no sufrió fragilización por H₂ en las condiciones de exposición específicas de la campaña. Esto sumado a que se considera que la cantidad de ensayos realizados son suficientes da confianza en asegurar que en estas condiciones la reducción de la ductilidad del material (fragilización) es limitada y la norma lo considera apto para el uso en H₂. Asumiendo una distribución normal de los resultados de Z para ambos ambientes, utilizando valores medios y de desviación estándar, se puede apreciar en la Figura 69 la variabilidad de los resultados para ambas distribuciones y la mejor caracterización de los resultados de Z para el ambiente en H₂ mediante el incremento del número de ensayos.

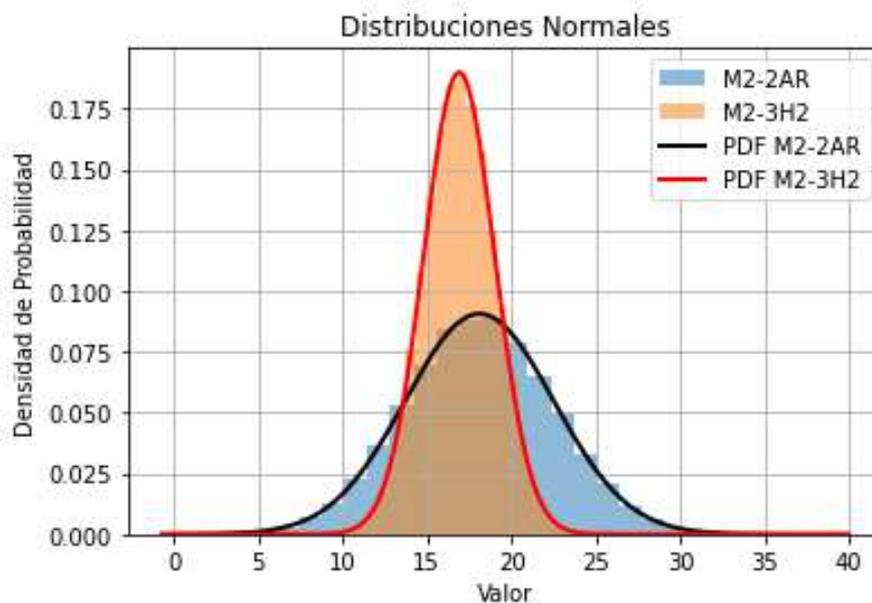


Figura 69. Comparativa de las distribuciones normales de Z basándose en resultados experimentales de probetas en aire (ZAR) y de probetas sometidas a 1000 h a 3 bares de presión de H₂ (ZH₂).

Conclusiones de la Campaña#5:

Basándonos en los resultados experimentales, se concluye que la tubería de fundición utilizada en el estudio ha experimentado fragilización por H₂ limitada después de 1000 horas de exposición a una atmósfera de H₂ a 3 bar y que según las recomendaciones establecidas por la norma ISO es compatible para operar en H₂ en las condiciones estudiadas. Debido a resultados previos que mostraron fragilización a 16 bar, se sugiere una evaluación más profunda de los resultados obtenidos. Se menciona que los resultados de la Campaña #3 fueron heterogéneos, y se plantea la posibilidad de que la fragilización observada anteriormente se debiera a defectos puntuales en algunas probetas.

8.3.5.4 CAMPAÑA 6

El objetivo principal de esta campaña es estudiar el comportamiento de componentes de la estación de regulación y medida (ERM) tras haber estado en exposición continua en autoclave a 100% de H₂ y a una presión de 16 bares. Los componentes (filtros, juntas) expuestos se muestran en la figura 70.



Figura 70. Estado de los componentes del ERM antes de realizar el ensayo.

Condiciones del ensayo

En primer lugar, los materiales como juntas o filtros del ERM a estudiar se expusieron durante 2880 horas en un autoclave a 100 % H₂ y 16 bares de presión. Tras esa exposición se inspeccionaron y se montaron en el ERM del Loop para testear su funcionamiento real con una muestra 20 % H₂ / 80 % GN durante 3000 horas. Finalizadas las 3000 horas se desmontaron dichos componentes del ERM y se inspeccionaron para ver su estado.

Condiciones de Exposición en autoclave

Atmósfera: 100 % H₂

Presión: 16 bar.

Duración de la exposición: 2880 horas.

Condiciones de exposición en estación de regulación y medida (ERM)

Atmósfera: 20% H₂ y 80 % GN

Presión: 4 / 16 bar.

Duración de la exposición: 3000 horas.

Resultados

- Exposición en autoclave

Inspección Visual

Una vez finalizado el periodo de exposición a 16 bares, 100 % H₂ durante 2880 horas, las muestras se extraen del autoclave para poder realizar la inspección visual de los componentes (Figura 71).



Figura 71. Estado de los componentes del ERM tras estar 2880 horas a 100% de H₂ en autoclave.

En las Figuras 72 se presentan imágenes en detalle de los componentes tras la exposición en atmosfera de H₂.



Figura 72. Estado de los componentes del ERM tras estar 2880 horas a 100% de H₂ en autoclave.

Los componentes ensayados no presentan a simple vista algún tipo de ampollamiento o agrietamiento en el momento de la extracción de las muestras del autoclave.

- Exposición en estación de regulación y medida (ERM)

Inspección Visual

Una vez finalizado el periodo de exposición en la estación de regulación y medida (ERM) a 20 % de H₂ y 80 % GN, las muestras se extraen para poder realizar la inspección visual de los componentes (Figura 73).



Figura 73. Estado de los componentes del ERM tras estar 3000 horas a 20% de H2 y 80 % de GN en el ERM.

Discusión/Conclusiones resultados Campaña #6

Los resultados de la inspección visual de los componentes de la estación de regulación y medida (ERM) ensayados en la Campaña #6 revelan que no se han producido cambios apreciables (agrietamiento o ampollamiento) luego de la exposición lo que permite confirmar que estos componentes no sufrirán deterioro que influya en el buen funcionamiento del ERM en las condiciones de operación.

8.3.5.5 CAMPAÑA 7

Introducción:

La Campaña 4 de ensayos, que involucró la exposición continua de juntas de caucho a una atmósfera de 100 % de H₂ a una presión de 16 bares, mostro la presencia de degradación en las juntas de NBR ensayadas. Uno de los hallazgos más destacados fue la aparición de ampollamiento en la superficie de las juntas, un fenómeno que presenta interrogantes sobre la integridad y la seguridad de los materiales poliméricos utilizados en condiciones similares a las ensayadas.

Durante la Campaña 7 se evaluó el comportamiento de las juntas poliméricas en una atmósfera compuesta por un 20 % de H₂ y un 80 % de metano. Esto se debe a la relevancia práctica de simular un ambiente que represente con mayor precisión las condiciones reales a las que se pretende exponer a estos materiales en la red de distribución.

En esta sección, presentamos los resultados de la Campaña 7, que incluyen observaciones detalladas sobre el comportamiento de dos tipos de juntas de caucho bajo las condiciones de exposición mencionadas anteriormente. Además, discutimos las posibles acciones a futuro, basadas en los hallazgos y las lecciones aprendidas de las Campañas 4 y 7. Estas acciones se centran en la comprensión más profunda de los mecanismos detrás del ampollamiento, la influencia de factores como la presencia de mallas metálicas y la velocidad de descompresión, y la búsqueda de soluciones para mitigar el deterioro de las juntas en entornos de alta presión de H₂ y metano.

Juntas NBR-1

Referencia J1:

Junta DN25 PN 10 40. NBR, Diámetro exterior: 71 mm. Espesor: 4 mm.

Referencia J6:

Junta DN50 PN 10 40. NBR, Diámetro exterior: 112 mm. Espesor: 4 mm.

Condiciones de Ensayo (J1-4H2-COMP): Junta sometida a ensayo en el dispositivo de compresión y expuesta durante 1000 horas en una atmósfera de 20 % de H₂ y 80 % de metano a 16 bar. Se realizó una inspección visual previa a la presurización de las muestras para identificar la posible presencia de defectos de fabricación en las juntas. No se detectaron defectos en la muestra antes del ensayo.

Condiciones de Ensayo (J6-H2): Junta expuesta durante 1000 horas en una atmósfera de 20 % de H₂ y 80 % de metano a 16 bar (sin compresión). Se realizó una inspección visual previa a la presurización de las muestras para identificar la posible presencia de defectos de fabricación en las juntas. No se detectaron defectos en la muestra antes del ensayo.

Análisis de juntas J1-4H2-COMP mediante inspección visual

El objetivo es detectar posibles defectos debido a la presencia de gas, como ampollamiento, y establecer comparaciones con los defectos observados anteriormente. Se ha realizado una inspección visual inmediata tras la apertura del autoclave y una luego de 24 h. Como se muestra en la Figura 74a), inmediatamente después de abrir el autoclave se volvió a detectar ampollamiento en la zona cercana a la malla metálica, en donde se ven dos pequeñas burbujas. Las figuras 74b) y 74c) muestran una ampollamiento de mayor tamaño en dicha área luego de haber sido inspeccionadas 24 h después de quitarlas del autoclave. Esto se corresponde con los resultados experimentales reportados por Yamabe y Nishimura [15], en los que después de la descompresión, se formaron ampollas de tamaño micrométrico que aumentaron de tamaño con el paso del tiempo.

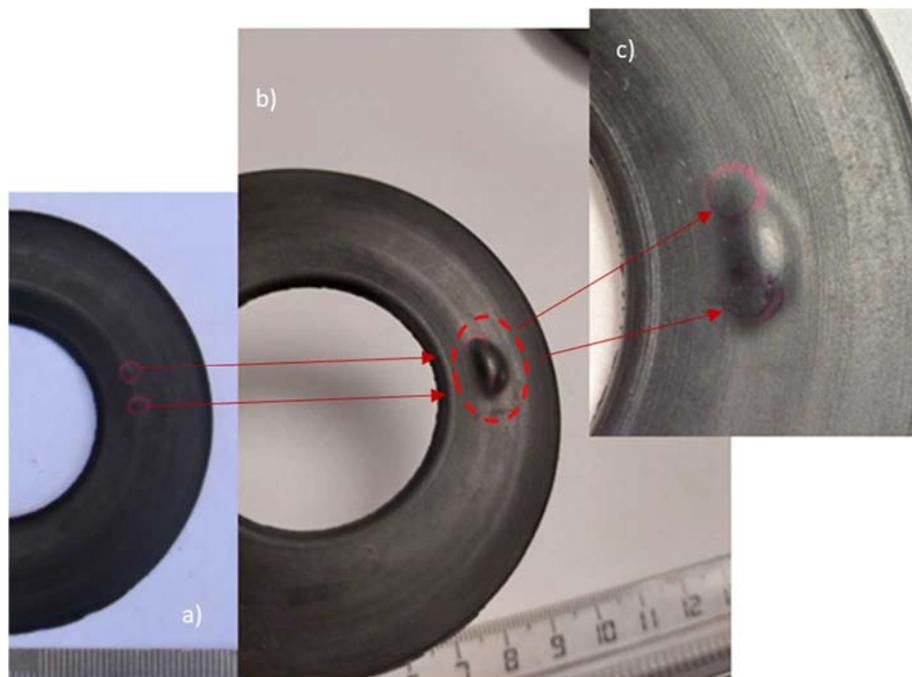


Figura 74. Evidencia de ampollamiento de la junta J1-4H2-COMP.a) Inspección inmediata b) Inspeccion a las 24hs c) Zoom de la ampolla en b).

Al exponer el NBR a H₂, las moléculas de H₂ supersaturadas se agrupan principalmente en defectos de la estructura del polímero o en la malla metálica. Luego de la descompresión, el H₂ se ve forzado a salir al exterior por la ausencia de la presión que lo mantenía dentro del material. Las burbujas se

generan principalmente debido a la mayor de velocidad de difusión del gas en el polímero que en el acero. Las ampollas son áreas de concentración de tensiones que puede generar grietas y por lo tanto la integridad de la junta.

De forma similar, en la Figura 75 se presentan imágenes de las juntas después de la exposición, donde se indican con líneas rojas punteadas la existencia de ampollamiento, esta vez con una sola gran ampolla detectada luego de inspeccionarse la junta inmediatamente (Fig. 75 a y b). La Figura 75a) muestra que la ampolla desaparece con el tiempo, donde solo se ve la marca realizada en el momento de destacar el ampollamiento in-situ durante la inspeccion inmediatamente después de la extracción de las juntas del autoclave.



Figura 75. Evidencia de ampollamiento de la junta J1-3H2-COMP-2.a) Inspección inmediata b) Inspección inmediata (perspectiva) c) Inspeccion a las 24h sin signos de ampollamiento.

Análisis de juntas J6-1H2 mediante inspección visual

La Figura 76 muestra la presencia de una grieta en el borde interno inferior de la junta. Esto se condice con las observaciones realizadas por varios investigadores [13], [15] sobre la presencia de grietas en juntas NBR debido a la presencia de gas H₂ a presión. La cause de este agrietamiento puede estar relacionada a la presencia de defectos internos en la estructura polimérica o la presencia

de concentradores de tensiones que elevan el nivel de absorción de H₂ localmente (el H₂ es atraído por tensiones multiaxiales o hidrostáticas). En este caso esta segunda opción es la más probable.



Figura 76. Evidencia de agrietamiento en la junta J6-1H2- Inspección inmediata.

Junta NBR-2

Condiciones de Ensayo:

J5-2H2: Después de exposición de 1000 horas en una atmósfera de 20 % de H₂ y 80 % de metano a 16 bar.

J5-2H2-COMP: Junta en dispositivo de compresión y después de exposición de 1000 horas en una atmósfera de 20 % de H₂ y 80 % de metano a 16 bar.

Inspección Visual

Las juntas ensayadas no presentan a simple vista ampollamiento en el momento de la extracción de las muestras del autoclave. Luego de una inspección visual a las de 24 h de extraerse del autoclave tampoco se evidencian signos de ampollamiento.

Conclusiones Campaña 7

En la Campaña 4 de ensayos, se observó la degradación de juntas de caucho NBR expuestas a una atmósfera de 100 % de H₂ a 16 bares, con la aparición de ampollamiento en la superficie de las juntas. Estos hallazgos cuestionan la integridad y seguridad de los materiales poliméricos en condiciones similares a las ensayadas.

La Campaña 7 se enfocó en evaluar el comportamiento de las juntas de caucho en una atmósfera compuesta por un 20 % de H₂ y un 80 % de metano, más representativa de las condiciones reales de exposición en la red de distribución de gases.

Las conclusiones de la Campaña 7 incluyen:

- Ampollamiento en Juntas NBR-1: Se observó ampollamiento en las juntas J1-4H2-COMP inmediatamente después de la exposición a la mezcla de gases, cerca de la malla metálica. Estas ampollas aumentaron de tamaño en el transcurso del tiempo, lo que es coherente con resultados experimentales previos.
- Comportamiento del H₂ en el NBR: El H₂ se concentra en defectos de la estructura del polímero o en la malla metálica. Tras la descompresión, el H₂ se libera debido a su mayor velocidad de difusión en el polímero en comparación con el acero. Según bibliografía, esto podría ser el origen del ampollamiento, por lo que un estudio más detallado de este mecanismo es de interés. En todo caso, las ampollas generadas representan áreas de concentración de tensiones, lo que puede llevar a la formación de grietas y afectar la integridad de las juntas.
- Grietas en Juntas NBR-1: Se detectó una grieta en el borde interno inferior de la junta J6-1H2, lo que concuerda con observaciones previas sobre la presencia de grietas en juntas NBR debido a la presión de H₂. Esta grieta podría estar relacionada con defectos internos en la estructura polimérica o la presencia de concentradores de tensiones locales.
- Juntas NBR-2: Las juntas J5-2H2 y J5-2H2-COMP no mostraron ampollamiento a simple vista ni después de 24 horas de inspección visual.

En base a estos hallazgos, puede indicarse que las juntas sin refuerzo metálico parecen mantener su integridad durante la operación con H₂ gas y con mezclas hasta 20 % de H₂. Las acciones futuras deben centrarse en una comprensión más profunda de los mecanismos detrás del ampollamiento, la influencia de factores como la presencia de mallas metálicas y la velocidad de descompresión, y la búsqueda de soluciones para mitigar el deterioro de las juntas en entornos de alta presión de H₂ y metano e distribución de gases.

9 RESULTADOS DE CASOS DE ESTUDIO INDUSTRIALES

Para los dos casos de estudio seleccionados: horno de solubilización de tratamiento térmico de aluminio y caldera auxiliar pirotubular de vapor, se han realizado simulaciones con metano puro y mezclas de H₂ al 10 %, 20 %, 30 % y 100 % de vol de H₂. Se ha considerado interesante incluir el estudio teórico del H₂ para ver diferencias significativas respecto al metano.

Asimismo, se han comparado los resultados teóricos para cada equipo y para cada uno de los diferentes combustibles, teniendo como referencia el metano. Por último, se han analizado el impacto de las mezclas de H₂ tanto en el proceso industrial como en las cargas a calentar y en los componentes del equipo.

El análisis se ha realizado comparando las siguientes variables:

- Caudales volumétricos y máxicos 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).

De forma general se puede considerar que los resultados obtenidos en las simulaciones son de alta calidad, dada la información previa que se disponía, permitiendo llevar a cabo, las simulaciones detalladas, por un lado, y una comparación exhaustiva de los modelos frente a los resultados de funcionamiento, 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 características parecidas realizadas en otros países europeos y de los que se dispone de bibliografía.

9.1 HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO

A continuación, se adjuntan dos esquemas con los elementos contemplados en la simulación del horno de solubilización de tratamiento térmico. El quemador de mayor consumo del horno es de 245 kW en base a PCS y la aireación es del 24 %.

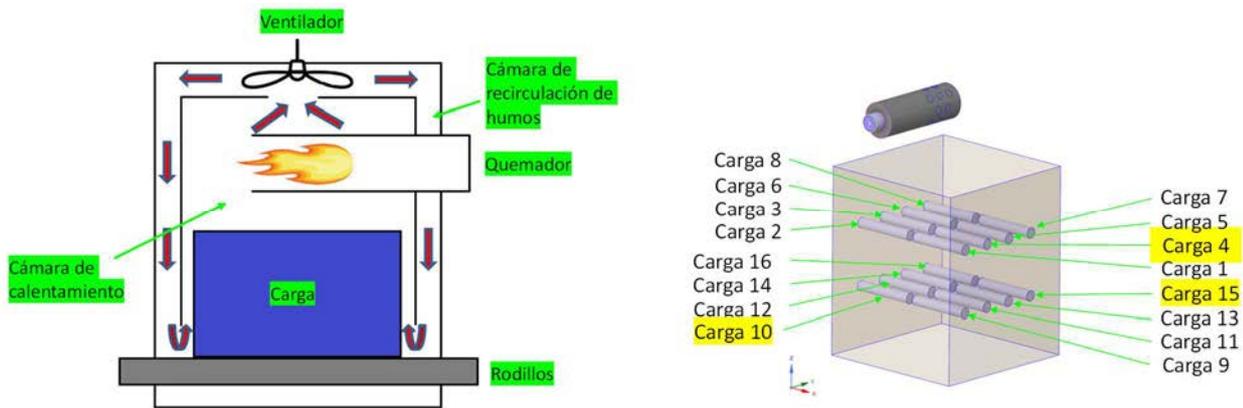


Figura 77. Izda) Esquema del horno de solubilización de tratamiento térmico. Dcha) Posicionamiento de las cargas de aluminio respecto al quemador.

Los aspectos más relevantes del estudio son los siguientes.

1) Necesidad de ajustar los caudales de los combustibles a la potencia requerida del proceso (245kW_PCS) para que no se vea afectado el proceso.

Si no se ajusta el caudal volumétrico de gas combustible al requerido por la mezcla de H₂ e H₂ puro, la potencia del quemador se reduciría en un 6,8 % para la mezcla del 10 % vol de H₂, un 13,6 % al 20 % vol de H₂ y un 20,4 % para la mezcla del 3 % vol, afectando de esta forma al proceso en su totalidad.

Tabla 16. Impacto del contenido de H2 en el combustible sobre los caudales volumétricos y másicos de combustible, aire y humos.

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 [kg/s]	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
Relación 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 de aire de metano puro [%]	0,00%	-0,76%	-1,63%	-2,65%	-21,97%
Relación del caudal volumétrico de humos respecto al caudal de humos de metano puro	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96

- 2) **Es posible usar el quemador con mezclas de H₂ hasta el 30 % vol de H₂ manteniendo la válvula de gas, ventilador e inyectores del quemador.**
- 3) **Necesidad de actuar en el control de aireación del quemador** de forma que se aumente la aireación de combustión para las diferentes mezclas de H₂. Si se quiere mantener la regulación del aire y el gas natural, no hay que superar el 10 % vol de H₂ en la mezcla.

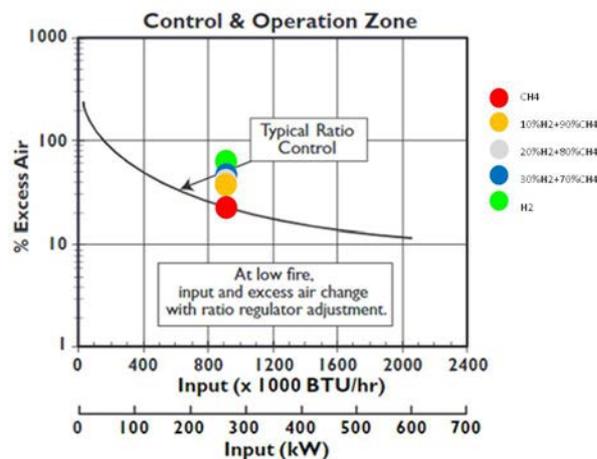


Figura 78. Curva aire-gas del quemador del horno.

- 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 **degradación de componentes (quemador, aislantes) debido a alta temperatura, el impacto sería bajo**, ya que la temperatura se mantiene estable con los diferentes niveles de mezcla.

Tabla 17. Impacto del contenido de H₂ 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

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
Tmedia 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 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 10)
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

- 6) Con relación a la **temperatura de la llama y la distribución de velocidades** se tiene que:
- En la parte inicial del quemador (cono más interno) las temperaturas son menores al aumentar el porcentaje de H₂.
 - La llama se enfría cuando el contenido de H₂ es mayor ya que el caudal volumétrico aumenta.
 - Las velocidades del gas y aire para el metano son del orden de 5 m/s y 30 m/s respectivamente y son muy parecidas a las correspondientes al blending del 30 %.

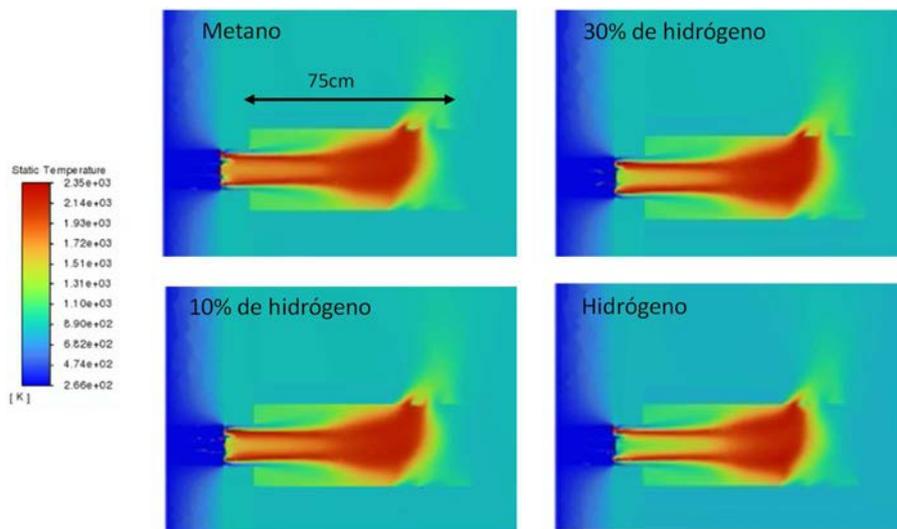


Figura 79. Impacto del contenido de H₂ en el combustible sobre la distribución de T de la llama.

- 7) En cuanto a la **eficiencia térmica del proceso**, el **impacto de usar mezclas de H₂ 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.

Por otra parte:

- Hay una dispersión de temperaturas de las cargas, del orden de 60°C, muy parecida independientemente del combustible utilizado.
- La carga 4, ubicada en la parte superior del cestón es la que menos se calienta (511°C-516°C) y la carga 15, situada en la parte inferior del horno, es la de mayor temperatura (571°C-574°C) para todo tipo de combustible.
- Baja dispersión de temperaturas: se da inclusive con caudales de recirculación menores para mezclas de H₂ e H₂ puro.

- 8) En cuanto a la **calidad del aluminio** por el mayor contenido de agua en los humos, una mezcla al 10 % de H₂ tendría un impacto bajo en la carga en cuanto al contenido de H₂O (2,45 % más de agua). No obstante, habría que analizar el impacto en el contexto de otro estudio como afectaría este extra de vapor de agua a la calidad del producto final.

9) 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 %.

Tabla 18. Aireación ideal para los diferentes combustibles.

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
lambda	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24
lambda ideal	1,24	1,28	1,33	1,37	1,76

- Las **emisiones de NO_x** con un exceso de aire del 24 % con la mezcla del 10 % vol de H₂ se verían aumentadas en un 11,76 % respecto al metano puro y con la mezcla al 20 % vol de H₂ se aumentarían en un 58,82 %. Si se aumentase la aireación se enfriaría más la llama por la dilución con aire y se reducirían los NO_x. No obstante, podría darse el incumplimiento de la Directiva actual 2015/2193/ EU (250 mg/Nm³) para H₂ puro. Si se cumple dicha directiva para el blending del 30 %.
- Al aumentar el contenido de H₂ en el combustible, aumenta el contenido de vapor de agua** en los humos, multiplicándose casi por 2 con H₂ puro respecto al metano puro y en un 8,72 % más para la mezcla del 30 % de H₂ respecto al metano puro.

Habría que hacer un estudio específico para ver cómo le afecta a la calidad del aluminio.

10) **Otras consideraciones:**

- Analizar experimentalmente el comportamiento del quemador y de los sistemas de dosificación de aire-gas y control por separado independizándolo del proceso del horno.
- Iniciar las pruebas con mezclas de H₂ no superiores al 10 % vol de H₂ donde se ha visto un comportamiento muy similar al del metano.
- Constatar la durabilidad de los componentes y la inexistencia de fugas de la mezcla combustible en juntas y conexiones.

9.2 CALDERA AUXILIAR DE VAPOR

En primer lugar, hay que destacar que se trata de una caldera de vapor auxiliar de tipo pirotubular de tres pasos y con dos quemadores de gas natural. Cada quemador tiene su hogar y haces de tubo correspondientes. Comparten cámaras de inversión, aislantes y salida de humos. La caldera opera con gas natural a una potencia de 12 MW en base a PCI y un exceso de aire del 21 %.

Los elementos contemplados para las modelizaciones son el quemador, el hogar, 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.

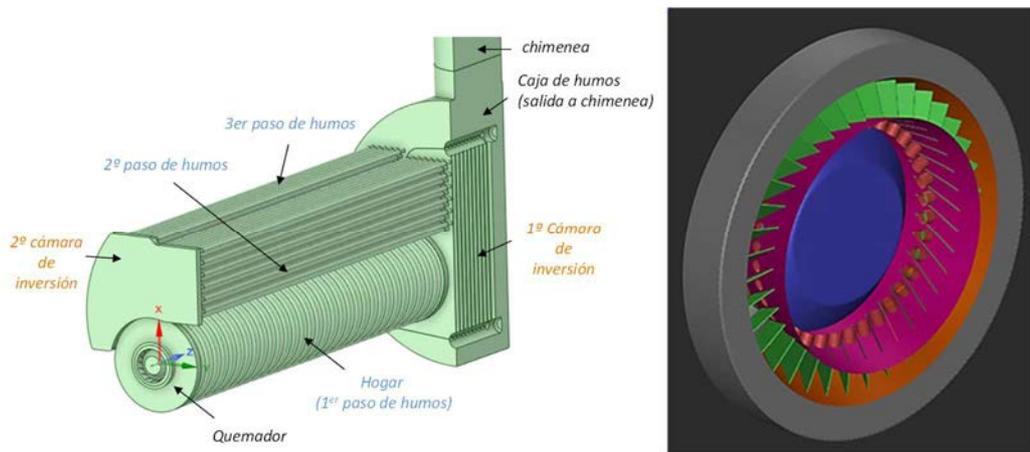


Figura 80. Izda) Componentes de la simulación. El aislante no está dibujado. Dcha) Vista del quemador.

Se recogen, a continuación, algunos aspectos relevantes del estudio realizado y las principales conclusiones de este.

1) Necesidad de ajustar los caudales de los combustibles a la potencia requerida de 6MW para que no se vea afectado el proceso.

Si no se ajusta el caudal volumétrico de gas combustible al requerido por la mezcla de H₂ e H₂ puro, la potencia de cada quemador se reduciría en un 7 % para la mezcla del 10 % vol de H₂, un 14 % al 20 % vol de H₂, un 21 % para la mezcla del 30 % vol y hasta en un 70 % para el H₂ puro afectando de esta forma al proceso en su totalidad.

Tabla 19. Impacto del contenido de H₂ en el combustible sobre la potencia del proceso manteniendo el mismo caudal volumétrico de combustible que para metano.

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	5580	5160	4738	1800
lambda	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21
Caudal volumétrico combustible [m ³ /h]	635	635	635	635	635
Diferencia relativa respecto a la potencia objetivo de metano puro [%]	0%	-7%	-14%	-21%	-70%

- 2) **Para mantener la potencia sobre PCI de 6 MW de cada quemador, los caudales volumétricos de combustible deben aumentarse:** 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.

No se disponen de datos técnicos de las electroválvulas de gas de los quemadores. No obstante, considerando que la caldera tiene una potencia nominal de 18 MW (cada quemador podría dar hasta 9 MW_{PCI}), tendría una capacidad de suministro de 952 m³/h de metano. Esto es; 1,5 veces más caudal que el correspondiente a los 6 MW. Así, se podría considerar que, a efectos de caudal, **con mezclas de H₂ hasta el 30 % podría utilizarse la válvula actual de gas de los quemadores.**

- 3) **Necesidad de actuar en el control de aireación del quemador** de forma que se aumente la aireación de combustión para las diferentes mezclas de H₂. 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.

Tabla 20. Exceso de aire ideal para metano, las diferentes mezclas de H₂ e H₂ puro.

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
lambda ideal	1,21	1,25	1,29	1,34	1,71

La dosificación de aire se lleva a cabo mediante dos ventiladores incorporados a cada quemador. La única información técnica que se dispone sobre los ventiladores es el caudal máximo de 12.600 m³/h a 3000 rpm y que el caudal de aire se regula mediante unas clapetas accionadas por un servomotor, colocadas en la aspiración del ventilador.

Si se quiere mantener la regulación del aire y el gas natural, no superar el 10 vol % de H₂ en la mezcla. Si se aumenta al 20 % vol H₂, habría que modificar la proporción combustible/aire, actualmente llevada a cabo con un regulador de presión.

4) En cuanto al **diseño del quemador**:

- **Los inyectores u orificios del quemador deberán aumentar de diámetro para H₂ 100 %, para reducir la velocidad de salida de combustible, pero se podrían mantener los mismos inyectores hasta un 30 % vol de H₂.**

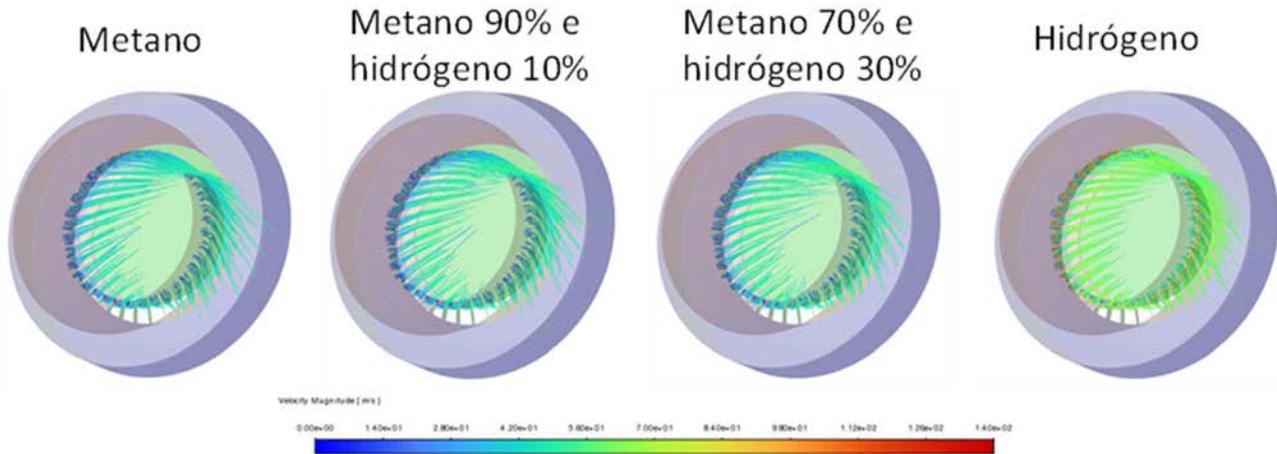


Figura 81. Patrón de velocidad para los diferentes combustibles.

- **Los álabes de aire no requieren modificación.**

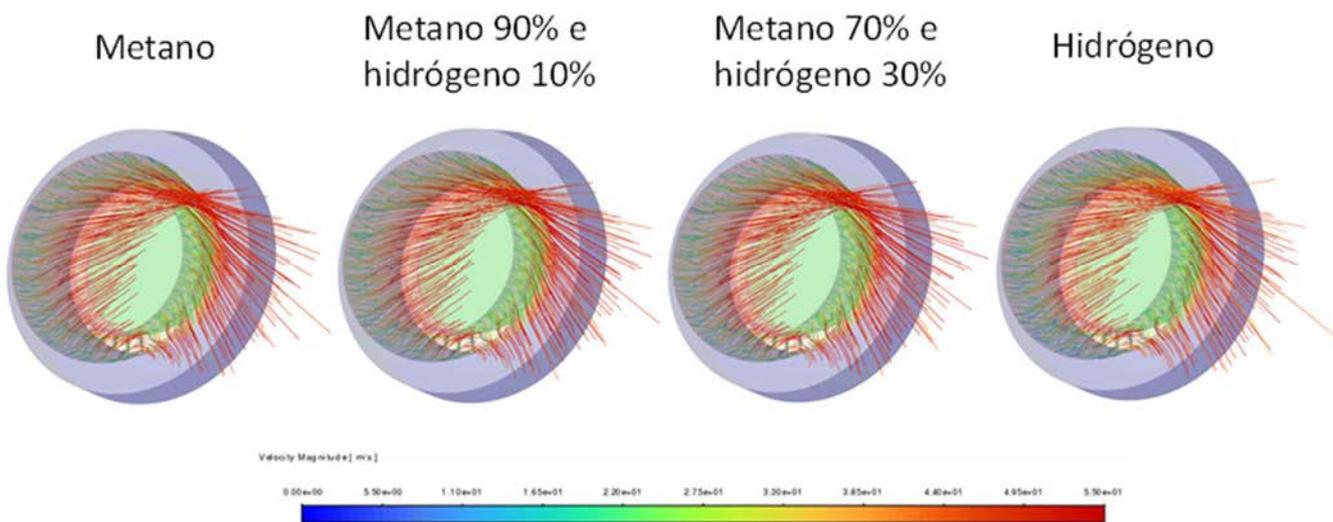


Figura 82. Patrón de velocidad del aire para los diferentes combustibles.

- **El material del quemador no necesariamente debe cambiar** ya que suelen ser de acero inoxidable. Este tipo de acero es adecuado para altas presiones y temperaturas, aunque puede que se necesite aumentar el espesor de este para tasas altas de H₂.

- 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.

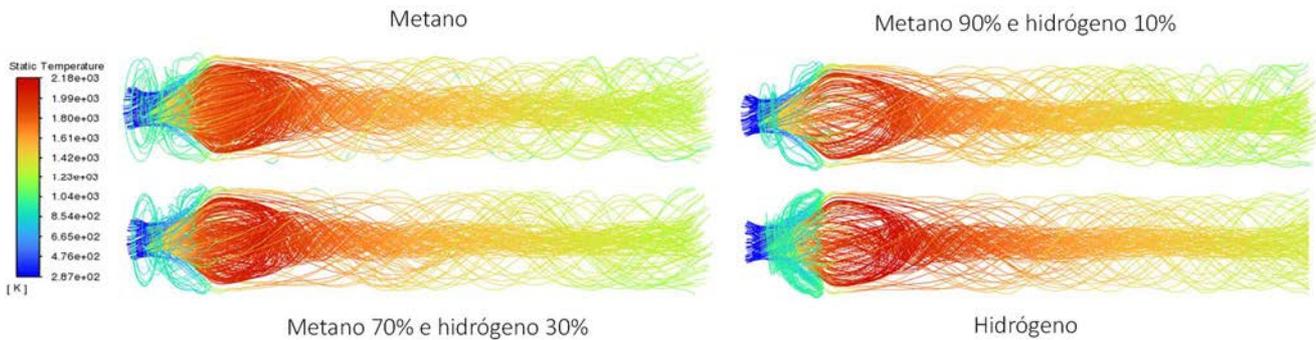


Figura 83. Pathlines de temperaturas de los humos en el hogar para los diferentes combustibles.

- 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 100 m/s, velocidades medias de 42-52 m/s y velocidad de mezcla en el interior del hogar entre 10 y 20 m/s.

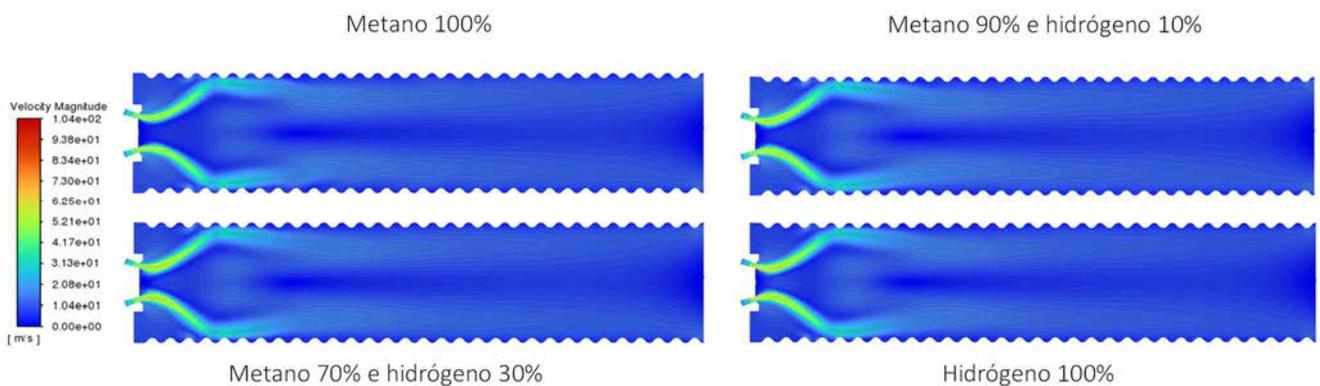


Figura 84. Contornos de velocidad de los humos en el hogar para metano, mezclas al 10 y 30 % vol de H₂ y para H₂ puro.

- 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 de H₂ y porque se requiere mayor aire de combustión que el 21 % de exceso de aire. Los valores de CO máximos en la llama de 7 ppm, son valores despreciables.

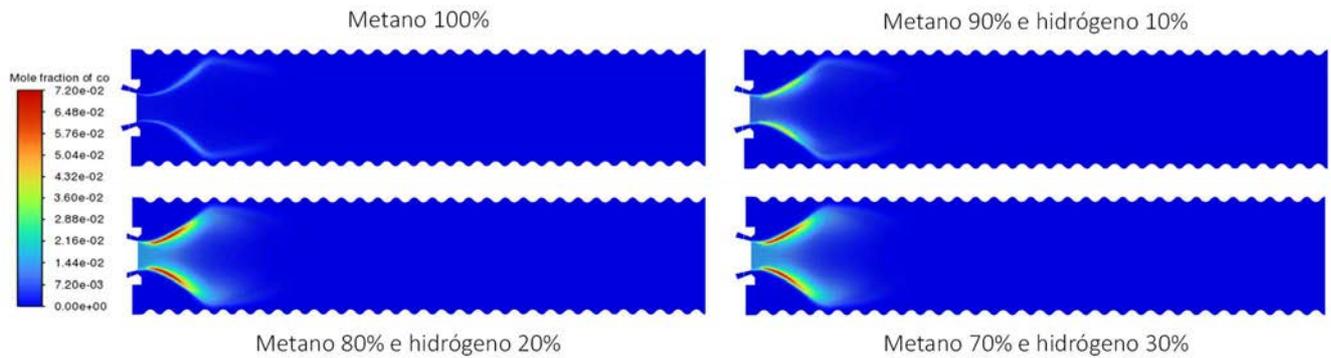


Figura 85. Contornos de CO de los humos en el hogar para metano, mezclas al 10 y 30 % vol de H₂ y para H₂ puro.

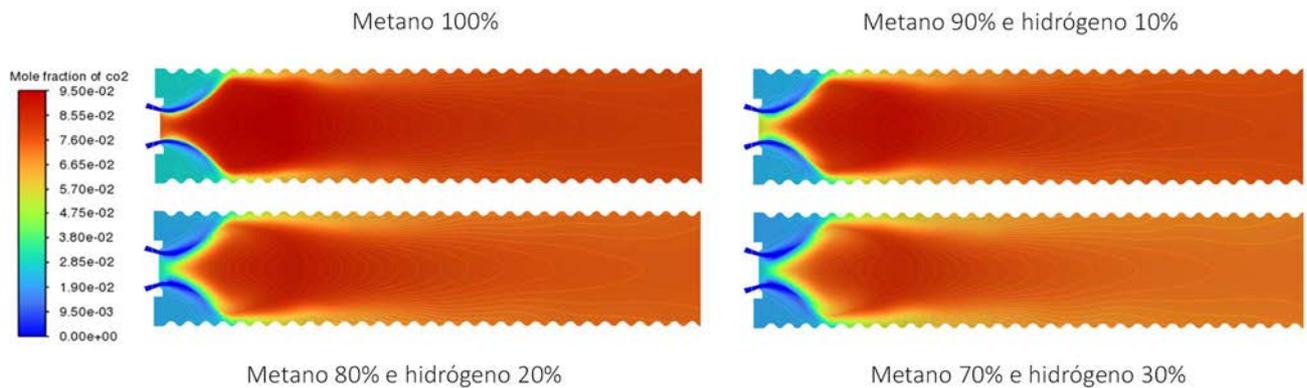


Figura 86. Contorno de CO₂ de los humos en el hogar para metano, mezclas al 10, 20 y 30 % vol de H₂.

5) En cuanto al **control del quemador:**

- Cada ciclo de calentamiento se inicia con un pre-barrido de la caldera a caudal máximo (clapetas totalmente abiertas) durante 43,33 s. **Sería recomendable, aumentar el tiempo de pre-barrido de la caldera para eliminar posibles bolsas de H₂.**
- **Por cuestiones de seguridad, sería conveniente también reducir el tiempo máximo de detección de llama** (con metano, 3 s) para que el corte del paso de gas se hiciera más rápido.
- El detector de llama es una fotocélula de UV. **Habría que analizar su sensibilidad al contenido de H₂, aunque hasta el 10 % vol H₂ no debería de haber mayor problema** porque apenas cambia la forma de la llama.

6) **En cuanto a la eficiencia térmica del proceso, el impacto de usar mezclas de H₂ es hasta positivo**, aumentando la eficiencia térmica con H₂ puro y con valores de eficiencia superiores al 92 % con mezclas de H₂. Por destacar, para todas las mezclas combustibles, el tercer paso de humos transfiere poco calor al agua.

Tabla 21. Impacto del contenido de H2 en el combustible sobre la transferencia de calor a la carga (agua) en diferentes zonas de la caldera y sobre la eficiencia.

Zona \ Combustible	TRANSFERENCIA DE CALOR HUMOS-AGUA [kW]			
	Metano 90% e hidrógeno 10%	Metano 80% e hidrógeno 20%	Metano 70% e hidrógeno 30%	Hidrógeno 100%
Hogar o primer paso de humos	2843	2850	2837	2994
Primera cámara de inversión	247	253	248	250
Segundo paso de humos	2108	2101	2093	2061
Segunda cámara de inversión	17	17	17	16
Tercer paso de humos	319	317	315	295
Caja de humos	4	4	4	3
Pérdidas	462	458	486	381
Total	6000	6000	6000	6000
	EFICIENCIA [%]			
	92,3%	92,4%	91,9%	93,7%

7) En cuanto a las emisiones:

- Los valores de CO son despreciables para todas las mezclas de H₂.
- Las emisiones de NO_x con un exceso de aire del 21 % con la mezcla del 10 % vol de H₂ aumentan en un 22,77 % respecto al metano puro y con la mezcla al 20 % vol de H₂ aumentan en un 95,07 %.
- Respecto a los NO_x, habría cumplimiento de la directiva actual 2015/2193/EU hasta el 30 % vol de H₂. No obstante, sería recomendable para reducir dichas emisiones, para tasas de H₂ superiores al 20 % vol, adaptar el equipo para una recirculación de humos, diluir la mezcla o realizar una combustión por etapas etc.
- No cumpliría la directiva para el H₂ puro. Valor superior de NO_x a 250 mg/m³ (instalaciones existentes) y 200 mg/m³ (instalaciones nuevas).
- Contenido de vapor de agua: hasta el 8,70 % más al 30 % vol de H₂.
- Los productos de combustión pueden generar lluvia ácida cuando la humedad se combina con los óxidos de nitrógeno. Los humos ácidos en un calentamiento indirecto no afectan a la calidad de la carga, pero si puede tener efectos corrosivos en zonas donde condensen los mismos. Los humos tienen una temperatura de salida de 210 °C, por lo que cabe esperar que la corrosión se de en la chimenea o en codos de los tubos.

Tabla 22. Impacto del contenido de H₂ en el combustible sobre las emisiones de los humos.

%vol H ₂	0	10	20	30	100
Combustible:	Metano	Mezcla hidrogenada con 10% de H ₂	Mezcla hidrogenada con 20% de H ₂	Mezcla hidrogenada con 30% de H ₂	Hidrógeno
CO [ppm]	1,99E-04	4,00E-04	4,97E-04	5,82E-04	0
NOx [ppm]	19,4	23,9	37,9	73,4	321,3
CO ₂ [%]	7,92	7,69	7,41	7,1	0,03
O ₂ [%]	3,53	3,49	3,5	3,46	3,35
H ₂ O [%]	15,86	16,24	16,67	17,24	29,1
CO_corr [ppm]	2,39E-04	4,80E-04	5,97E-04	6,97E-04	0
NOx_corr [ppm]	23,32	28,63	45,49	87,90	382,47
NOx_corr [mg/m ³]	28,61	35,13	55,82	107,85	469,29
Diferencia relativa respecto a los NOx de CH ₄ [%]	0,00%	22,77%	95,07%	276,93%	1540,14%
Diferencia relativa respecto al H ₂ O de CH ₄ [%]	0,00%	2,40%	5,11%	8,70%	83,48%

- 8) **Al ser un calentamiento indirecto, no hay impacto sobre la carga térmica.** Los equipos de calentamiento directo (hornos) son más difíciles de reconvertir a H₂ debido al impacto en la carga, mientras que los equipos de calentamiento indirecto, como las calderas, son más sencillos de reconvertir.
- 9) En cuanto a la **degradación de los componentes de la caldera con mezclas de H₂ e H₂ puro debido a alta temperatura:**
- Las temperaturas máximas con H₂ en el **hogar** son superiores respecto a las del metano puro y, además, al aumentar el contenido de H₂, la zona de mayor T en la llama se amplía. **Hasta un 20 % vol de H₂, el impacto por degradación del hogar y en puntos de soldadura, sería bajo.** Al aumentar la proporción de H₂, el impacto en el hogar sería más alto.
 - **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. **El impacto sería bajo.**
 - **Anillo cerámico refractario:** las temperaturas medias son inferiores al aumentar el contenido de H₂. **El impacto sería bajo.**
 - **Álabes:** las temperaturas máximas y medias son muy parecidas para todos los combustibles. **El impacto sería bajo en el quemador.**
 - **Cámara de inversión:** Los humos llegan más calientes al aumentar el contenido de H₂. **Hasta el 30 % vol, el impacto por sobre temperatura no sería significativo.**

- **2º y 3er paso de humos:** los valores de T son muy parecidos para todos los combustibles siendo ligeramente superiores para el H₂ 100 % vol. **El impacto en los tubos sería bajo.**
- **Chimenea: impacto bajo por temperatura (210 °C).** Más problemático el impacto por los humos ácidos.

Tabla 23. 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 CH4

Variable\Combustible:	Metano	Mezcla hidrogenada con 10% de H2	Mezcla hidrogenada con 20% de H2	Mezcla hidrogenada con 30% de H2	Hidrógeno
Tmáx 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
Tmedia humos. Diferencia relativa respecto al metano [%]	0,0%	0,5%	1,2%	1,2%	7,7%
Tmáx_Disco cerámico del quemador [°C]	1068	1059	1039	1034	1174
Tmed_Disco cerámico del quemador [°C]	1032	1028	1010	1005	1010
Tmed_Disco cerámico. Diferencia relativa al metano [%]	0,0%	-0,4%	-2,1%	-2,6%	-2,1%
Tmáx_Anillo cerámico [°C]	950	926	920	919	950
Tmed_Anillo cerámico [°C]:	803	775	770	763	807
Tmed_Anillo cerámico Diferencia relativa al metano [%]	0,0%	-3,5%	-4,1%	-5,0%	0,5%
Tmáx_Álabes [°C]	182	181	180	178	199
Tmed_Álabes [°C]	38	38	37	37	39
Tmed_Álabes. Diferencia relativa al metano [%]	0,0%	0,0%	-2,6%	-2,6%	2,6%

10) Impacto por los productos de combustión

- **El revestimiento refractario** interior sufre **decoloración**, atribuido a la generación de cloruros en los productos de combustión. Se ha demostrado que ocurren reacciones entre el gas reductor (H₂) y óxidos estables como la sílica, la alúmina y la circonita que componen el material del revestimiento refractario cerámico. Esta reacción produce sub-óxidos gaseosos y vapor de agua que pueden afectar a la carga y las superficies interiores del horno. Estos productos de combustión aceleran la corrosión de los materiales refractarios y reducen su resistencia.
- **Oxidación en zonas donde los humos condensen** (chimenea)

11) Otras consideraciones:

- Analizar experimentalmente el comportamiento del quemador y de los sistemas de dosificación de aire-gas y control por separado independizándolo del proceso de la caldera.

- Conveniente comprobar el tarado de los presostatos de seguridad de aire y gas.
- Iniciar las pruebas con mezclas de H₂ no superiores al 10 % vol de H₂.
- Constatar la compatibilidad y durabilidad de los componentes con el H₂ y,
- La inexistencia de fugas de la mezcla combustible en juntas y conexiones. La molécula del H₂ es de menor tamaño con respecto a la de metano, por lo que su filtración a través de juntas y paredes es mayor. Estimaciones sobre la permeación de una mezcla de H₂ sugieren que la mayor parte de las fugas de gas ocurren a través de la pared, en vez de las juntas, debido a la mayor superficie en contacto con el gas.

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 de H₂. 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 por lo 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).

Tabla 24. Comparativa del exceso de aire de combustión en las temperaturas de la llama y quemador de la caldera.

Combustible:	Llama [°C]:	Disco cerámico del quemador [°C]:	Anillo cerámico [°C]:	Alabes [°C]:
Metano	1732	1068	950	182
Mezcla hidrogenada con 10% de H2	1739	1059	926	181
Mezcla hidrogenada con 20% de H2	1776	1039	920	180
Mezcla hidrogenada con 30% de H2 (lambda=1.21)	1818	1034	919	178
Mezcla hidrogenada con 30% de H2 (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.

Tabla 25. Comparativa del exceso de aire de combustión en las temperaturas del hogar y al final del intercambiador de la caldera.

Combustible:	Humos al final del hogar [°C]	Humos al final del intercambiador [°C]
Metano	979	213
Mezcla hidrogenada con 10% de H ₂	984	
Mezcla hidrogenada con 20% de H ₂	991	
Mezcla hidrogenada con 30% de H ₂ (lambda=1.21)	991	
Mezcla hidrogenada con 30% de H ₂ (lambda=1.34)	982	
Hidrógeno	1054	

- 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 de H₂, mejora el proceso con el aumento de aireación.

Tabla 26. Comparativa del exceso de aire de combustión en la eficiencia de la caldera.

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 CO, de CO₂ (se completa mejor la combustión), del vapor de agua y disminuyen casi en un 50 % las emisiones de NOx.

Tabla 27. Comparativa del exceso de aire de combustión en las emisiones de la caldera.

Combustible:	CO [ppm]:	CO ₂ [%]:	NOx [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

10 CONCLUSIONES

10.1 RED DE DISTRIBUCIÓN DE GN

De acuerdo con el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos en el demostrador de la red de distribución de GN H2Loop se concluye:

- La introducción de una mezcla de constituida por 30 % de H₂ y 70 % de GN presenta una respuesta adecuada en cuanto al comportamiento de los materiales y elementos estudiados.
- Los resultados de las evaluaciones realizadas (detección de fugas, ensayo de válvulas, etc.) en el H2Loop con 30 % de H₂ en la mezcla de gas presentan un comportamiento/respuesta similar a los obtenidos empleando 100 % de GN.
- Los resultados obtenidos de la prueba de válvulas indican que no hay diferencias de comportamiento notables en las válvulas al emplear diferentes mezclas GN/H₂ en comparación con el GN. Estos resultados refuerzan la misión de poder introducir hasta un 30 % de H₂ en la red de GN sin comprometer la funcionalidad y seguridad de la infraestructura actual.
- Los materiales ensayados a 100 % de H₂ en el autoclave mantuvieron su integridad durante la duración de los ensayos, excepto las juntas de NBR con refuerzo metálico en las que se observó ampollamiento y agrietamiento. Lo mismo ocurrió durante el ensayo con 20 % H₂/ 80 % GN para estas juntas.

10.2 INSTALACIÓN DE USUARIO

Se ha evaluado el funcionamiento de los equipamientos existentes en una instalación de usuario para las mezclas de H₂ del 5, 10, 15 y 20 %, 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, 10, 15 y 20 % de H₂ en la mezcla.
- Tanto la caldera, como la cocina funcionan correctamente con los indicados porcentajes, no presentándose incidencias de ningún tipo.

- No se observa ningún problema de medición relacionado con las diferentes % de composición del gas GN/H₂, hasta un 15 % H₂. La mayoría de las imprecisiones se observaron a bajo caudal dentro de los límites legales.
- Los resultados son satisfactorios teniendo en cuenta que a bajos caudales el flujo, ya de por sí inestable, se ve aún más afectado por las interferencias y la contribución del compresor; además de que incluso en condiciones normales los contadores pierden precisión a bajos caudales.
- Como demostramos, las interferencias entre los dos caudales, aunque sean muy pequeñas, influyen en los resultados.

10.3 CASOS DE USO INDUSTRIAL

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 H₂.

Los dos casos de estudio analizados muestran que es viable utilizar mezclas de hasta el 30 % de H₂ en estos equipos.

- Para mantener la producción de vapor es necesario ajustar los caudales de los combustibles y su aireación para las diferentes mezclas de GN e H₂.
- Hasta el 30 % de H₂ no es necesario modificar los quemadores.
- La eficiencia térmica de la caldera apenas se ve impactada con mezclas de H₂ 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 de H₂. 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.

11 REFERENCIAS

- [1] A. Hormaza Mejia, J. Brouwer, and M. Mac Kinnon, "Hydrogen leaks at the same rate as natural gas in typical low-pressure gas infrastructure," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 15, pp. 8810–8826, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.159.
- [2] M. B. Djukic, V. S. Zeravcic, G. Bakic, A. Sedmak, and B. Rajcic, "Hydrogen Embrittlement of Low Carbon Structural Steel," *Procedia Materials Science*, vol. 3, pp. 1167–1172, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.06.190.
- [3] J. Shang *et al.*, "Enhanced hydrogen embrittlement of low-carbon steel to natural gas/hydrogen mixtures," *Scr Mater*, vol. 189, pp. 67–71, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.scriptamat.2020.08.011.
- [4] A. Trautmann, G. Mori, M. Oberndorfer, S. Bauer, C. Holzer, and C. Dittmann, "Hydrogen Uptake and Embrittlement of Carbon Steels in Various Environments," *Materials*, vol. 13, no. 16, p. 3604, Aug. 2020, doi: 10.3390/ma13163604.
- [5] N. O. Shaposhnikov, A. S. Tsvetkov, D. A. Strekalovskaya, A. Nikolaeva, and N. A. Devyaterikova, "Physical Modeling of Steel Resistance to Hydrogen Embrittlement," *Key Eng Mater*, vol. 943, pp. 91–96, Mar. 2023, doi: 10.4028/p-g4pg69.
- [6] M.-H. Klopffer, P. Berne, and É. Espuche, "Development of Innovating Materials for Distributing Mixtures of Hydrogen and Natural Gas. Study of the Barrier Properties and Durability of Polymer Pipes," *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles*, vol. 70, no. 2, pp. 305–315, Jul. 2015, doi: 10.2516/ogst/2014008.
- [7] D. Zheng *et al.*, "Molecular dynamics investigations into the hydrogen permeation mechanism of polyethylene pipeline material," *J Mol Liq*, vol. 368, p. 120773, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.molliq.2022.120773.
- [8] S. Robinson, "Hydrogen compatibility of structural materials for energy storage and transmission applications. Semiannual report for period through October 1, 1976," Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), Dec. 1976. doi: 10.2172/7125660.
- [9] Klopffer M.H. and Flaconnèche B., "Transport Properties of Gases in Polymers," *Oil & Gas Science and Technology*, vol. 56, no. 3, pp. 223–244, 2001.
- [10] G. J. Van Amerongen, "The Permeability of Different Rubbers to Gases and Its Relation to Diffusivity and Solubility," *J Appl Phys*, vol. 17, no. 11, pp. 972–985, Apr. 2004, doi: 10.1063/1.1707667.
- [11] D. W. Brubaker and K. Kammermeyer, "Flow of Gases through Plastic Membranes," *Ind Eng Chem*, vol. 45, pp. 1148–1152, 1953, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:94252736>

- [12] H. Fujiwara, “Analysis of acrylonitrile butadiene rubber (NBR) expanded with penetrated hydrogen due to high pressure hydrogen exposure,” 2016.
- [13] S. K. Jeon, O. H. Kwon, N. H. Tak, N. K. Chung, U. B. Baek, and S. H. Nahm, “Relationships between properties and rapid gas decompression (RGD) resistance of various filled nitrile butadiene rubber vulcanizates under high-pressure hydrogen,” *Mater Today Commun*, vol. 30, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.mtcomm.2021.103038.
- [14] S. K. Jeon, J. K. Jung, N. K. Chung, U. B. Baek, and S. H. Nahm, “Investigation of Physical and Mechanical Characteristics of Rubber Materials Exposed to High-Pressure Hydrogen,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 11, Jun. 2022, doi: 10.3390/polym14112233.
- [15] J. Yamabe and S. Nishimura, “Influence of fillers on hydrogen penetration properties and blister fracture of rubber composites for O-ring exposed to high-pressure hydrogen gas,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 1977–1989, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.11.105.

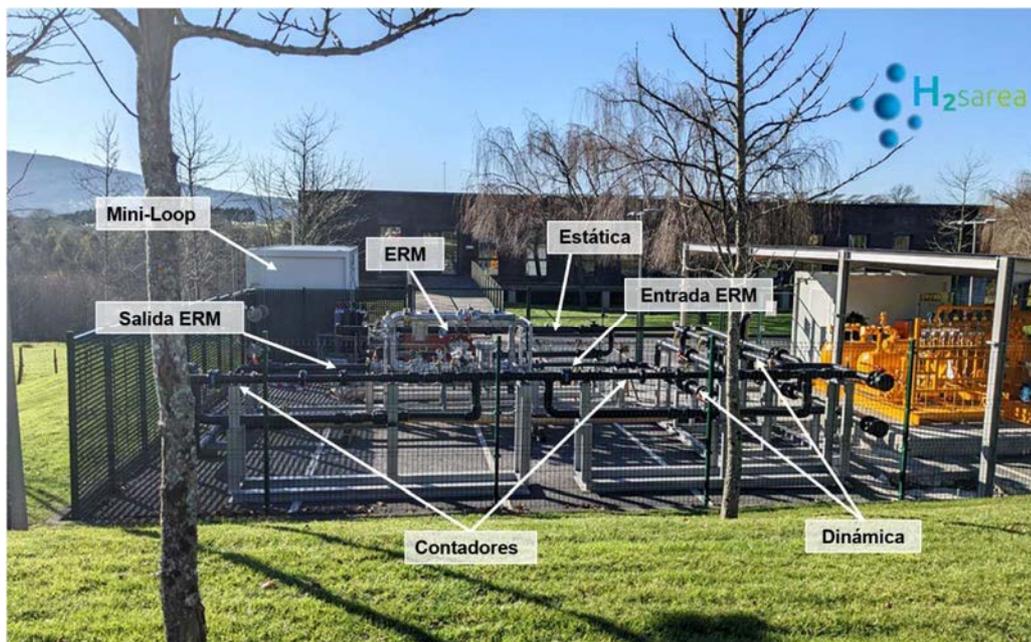
12 ANEXOS

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 inicio	Fecha 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 7	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	x		
	API-5L gr-x45	Tubería	x		
	API-5L gr-x60	Tubería	x		
	API-5L gr-x70	Tubería	x		
	Acero (*)	Tubería		x	x
	Acero bicromatado (*)	Llave edificio		x	x
Fundición	Fundición dúctil (*)	Tubería	x		
	Fundición gris (*)	Tubería	x		
Aceros inoxidables	1.4408 (AISI 316)	Llave mariposa		x	
	1.4021 (AISI 420)	Llave mariposa		x	
	Acero inoxidable (*)	Llave edificio, Tubería		x	x
	Acero corrugado (*)	Tubería			x
	AISI 316	Llave de bola		x	
	AISI 410	Llave de bola		x	
	AISI 304	Extremo tubería			x
1.4305 (AISI 303)	Conexiones, llave mariposa		x	x	
No férreos					
Aluminio	Aluminio (*)	Llave mariposa		x	
Zinc	Zamak (*)	Llave	x	x	
Aleaciones Cobre	Cobre (*)	Tubería		x	x
	Bronce (*)	Llave mariposa		x	
	Latón (*)	Llave edificio, toma Peterson		x	x
	Latón CW614N o CW617N	Transiciones		x	x
	Latón recubierto níquel (*)	Tubería		x	x
NO METÁLICOS					
Polietileno SRD11		Tubería	x		
Polietileno SDR17		Tubería	x		
Polietileno		Tubería, llave		x	
PTFE (Teflón)		Llave de bola, llave edificio, toma Peterson		x	x
Flexilite		Llave de bola		x	
PTFE+C+Grafito		Llave de bola		x	
EPDM (caucho de etileno)		Llave mariposa, elastómero, O-RING		x	
NBR (nitrilo)		Llave edificio		x	x
Elastómero		Transiciones, tubería, toma Peterson		x	
Cartón		Juntas		x	
Multicapa		Tubería			x

* Sin especificaciones de aleación

Uno de los aspectos que se considera, dentro del estudio de compatibilidad de materiales, de mayor interés es el de las “uniones”. Estos puntos de la red, teóricamente, son las zonas más susceptibles de sufrir fugas y, según el tipo de unión, de sufrir fenómenos de fragilización por H₂.

En la red de distribución de GN existen diversas configuraciones de uniones, tanto de materiales similares como disimilares:

- Uniones por soldadura: (PE/PE, Cu/Cu, Acero/Acero, Inox/Inox, Cu/acero/Inox).
- Uniones mecánicas desmontables: (enlaces mediante junta plana, uniones metal/metal, uniones por bridas, PE-metal).
- Uniones mecánicas no desmontables: uniones roscadas, uniones tubos multicapa, tubos cobre/Inox, PE/metal.

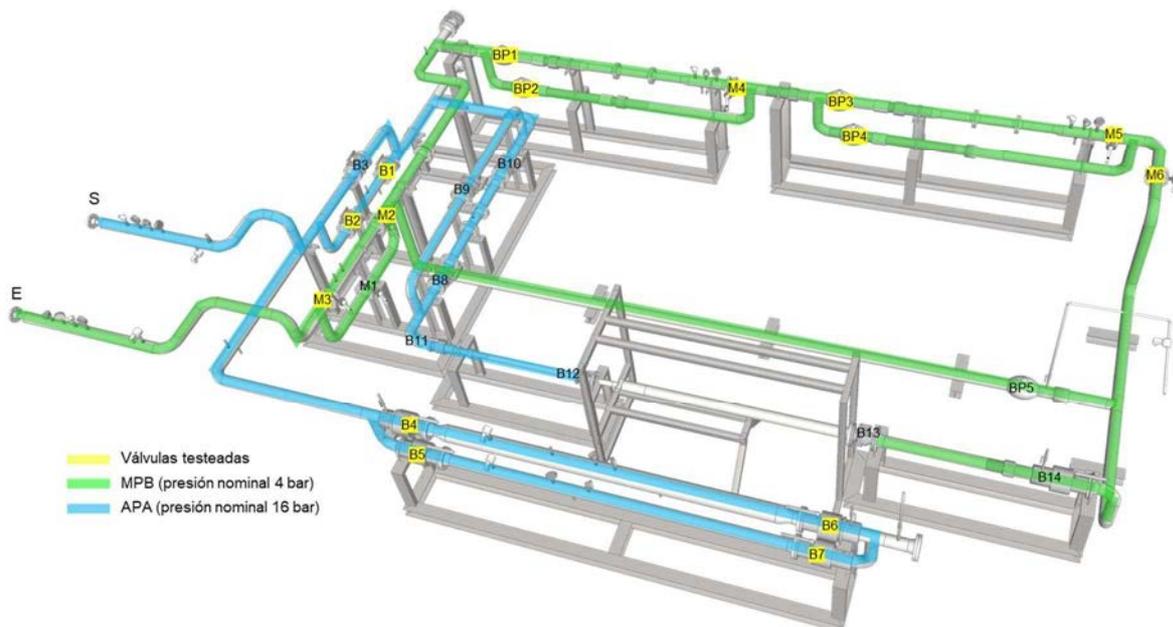
ANEXO 3 – PRUEBA DE VÁLVULAS

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	6"	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



ANEXO 4 – Contadores

Principales características técnicas de los contadores sometidos a prueba.

• ULTRASONIC G-METER ES4EVO NBIOT SIMH TECHNICAL DATA		
Unified class	G4	
Maximum flow rate Q_{max}	6	m ³ /h
Minimum flow rate Q_{min}	0,04	m ³ /h
Flow rate Q_t	0,6	m ³ /h
Measuring system	Static Ultrasonic	
Maximum permitted MID error	$\pm 3.5\%$	$Q_{min} \leq Q < 0,1 Q_{max}$
	$\pm 2\%$	$0,1 Q_{max} \leq Q \leq Q_{max}$
Accuracy class	1,5	
Mechanical environment	M2	
Electromagnetic environment	E1	
Maximum operating pressure P_{max}	0,5	bar
Operating temperature t_m	-25°C...+55°C °C	
Base temperature t_b	15 °C	
Specific temperature t_{sp}	20 °C	
Storage temperature	-25...+70 °C	
Humidity	5...95 %	
Maximum totalisable volume	9999999,9999 m ³	
Minimum reading value	0,0001 m ³	
Storage	Dry and Sheltered Location	
Place of installation	Outdoor	
Protection rating	IP66	
Optical interface	ZVEI	
Standard attachments	G 1" ¼ ISO 228-1	
Gas Family	Suitable for gases of 2 nd family group H, according to the UNI EN 437 classification	
Seals for threaded connections (available as an option)	NBR rubber compliant with UNI EN 682	
Communication replaceable battery	Lithium Thyonil Chloride size D - Nominal voltage = 3,6 V - Capacity = 17 A/h	
Metrological not replaceable battery (protected by seals)	Lithium Thyonil Chloride size C - Nominal voltage = 3,6 V - Capacity = 7.7 A/h	
NBIoT features		
Frequency	Band B20	
Max power	700mW	
Protocol	DLMS	

• MEMBRANE G-METER EF4EVO NBIOT SIMH TECHNICAL DATA		
Unified class	G4	
Maximum flow rate Q_{max}	6	m ³ /h
Minimum flow rate Q_{min}	0,04	m ³ /h
Flow rate Q_t	0,6	m ³ /h
Cyclical nominal volume	1,2	dm ³
Maximum permitted MID error	$\pm 3.5\%$	$Q_{min} \leq Q < 0,1 Q_{max}$
	$\pm 2\%$	$0,1 Q_{max} \leq Q \leq Q_{max}$
Accuracy class	1,5	
Mechanical environment	M2	
Electromagnetic environment	E1	
Maximum operating pressure P_{max}	0,5	bar
Operating temperature t_m	-25°C...+55°C °C	
Base temperature t_b	15 °C	
Specific temperature t_{sp}	20 °C	
Storage temperature	-25...+70 °C	
Humidity	5...95 %	
Maximum totalisable volume	9999999,9999 m ³	
Minimum reading value	0,0001 m ³	
Storage	Dry and Sheltered Location	
Place of installation	Outdoor	
Protection rating	IP66	
Optical interface	ZVEI	
Standard attachments	G 1" ¼ ISO 228-1	
Gas Family	Suitable for gases of 2 nd family group H, according to the UNI EN 437 classification	
Seals for threaded connections (available as an option)	NBR rubber compliant with UNI EN 682	
Battery replaceable	Lithium Thyonil Chloride size D Nominal voltage = 3,6 V Capacity = 17 A/h	
Battery not replaceable and protect by seals	Lithium Thyonil Chloride size C - Nominal voltage = 3,6 V - Capacity = 7.7 A/h	
NBIoT features		
Frequency	Band B20	
Max power	700mW	
Protocol	DLMS	