



Maduración de los estándares para la producción de estructuras ultraporosas para el almacenamiento de hidrógeno de alta densidad

Recomendaciones Políticas



Funded by
the European Union

Tabla de Contenido

1. Introducción..... 3

2. Resumen ejecutivo 3

3. Logros del proyecto 4

4. Contribución a las prioridades de la UE 5

5. Principales desafíos para la implantación industrial..... 7

6. Evaluación revisada de la viabilidad de los objetivos DOE..... 9

7. Recomendaciones políticas..... 10

8. Impacto socioeconómico 14

9. Lecciones aprendidas 15

10. Conclusiones y mensajes clave..... 16

1. Introducción

El almacenamiento de hidrógeno es una prioridad estratégica para la Unión Europea. El Pacto Verde Europeo establece el objetivo vinculante de alcanzar la neutralidad climática en 2050, y el hidrógeno limpio ha sido identificado como una de las palancas tecnológicas indispensables para descarbonizar la industria pesada, el transporte de larga distancia y otros sectores de difícil electrificación.

El Plan REPowerEU, adoptado en mayo de 2022, aceleró esta agenda al fijar el objetivo de alcanzar 20 millones de toneladas de hidrógeno renovable en 2030 (10 producidas en la Unión y 10 importadas), con el fin de reducir simultáneamente la dependencia de combustibles fósiles importados y acelerar la transición energética limpia.

La Estrategia Europea del Hidrógeno, actualmente en proceso de revisión con una consulta pública prevista para el segundo trimestre de 2026, tiene como objetivo el desarrollo de una cadena de valor completa del hidrógeno: producción renovable, infraestructura de transporte y distribución, y aplicaciones finales en industria, transporte y edificación.

La Ley de Industria de Cero Emisiones Netas (Net-Zero Industry Act), en vigor desde junio de 2024, refuerza la capacidad manufacturera europea de tecnologías limpias, con el objetivo de que la fabricación doméstica alcance al menos el 40 % de las necesidades anuales de despliegue de la Unión en 2030. Los electrolizadores, las pilas de combustible y las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno figuran explícitamente entre las tecnologías estratégicas cubiertas por esta norma.

Por último, el Plan de Acción para la Economía Circular que la Comisión prevé sustituir por una Ley de Economía Circular de carácter vinculante durante 2026 promueve la valorización de residuos y la eficiencia en el uso de recursos, con el objetivo de duplicar la tasa de uso circular de materiales de la Unión hasta cerca del 24 % en 2030.

En este contexto, el proyecto Horizon Europe MAST3RBoost aporta evidencia técnica directamente relevante para estas cinco prioridades: ha desarrollado materiales ultraporosos sostenibles para el almacenamiento de hidrógeno a partir de residuos, ha aplicado inteligencia artificial y aprendizaje automático al descubrimiento de materiales, ha demostrado el escalado industrial de estos procesos, y ha diseñado, fabricado y validado un depósito ligero de hidrógeno mediante manufactura aditiva. Este documento traduce dichos resultados en recomendaciones de política pública dirigidas a la Comisión Europea y a los legisladores de la Unión.

2. Resumen ejecutivo

El proyecto Horizon Europe MAST3RBoost ha demostrado, que es posible producir materiales ultraporosos (carbones activados y estructuras metal-orgánicas, MOF) a partir de residuos agrícolas, agroalimentarios, urbanos y de minería, alcanzando capacidades de almacenamiento de hidrógeno de hasta el **9,8 % en peso** en condiciones criogénicas, junto con la fabricación de un depósito ligero mediante manufactura aditiva por arco eléctrico (WAAM) en aluminio.

Estos resultados sitúan al consorcio en una posición privilegiada para influir en el diseño de la próxima revisión de la Estrategia Europea del Hidrógeno. Sin embargo, una lectura rigurosa de los datos frente a los objetivos técnicos del DOE estadounidense muestra que las capacidades gravimétricas alcanzadas, aunque superiores al objetivo final del DOE (6,5 % en peso), se han logrado a -196 °C, muy por debajo del rango de temperatura operativa que exige el DOE (-40 °C a 60 °C), por lo que en un futuro será necesario ampliar su validación a estos rangos de temperatura y condiciones de operación.

Este documento traduce los avances técnicos del proyecto en recomendaciones políticas concretas, dirigidas a distintos niveles de decisión de la Unión Europea, y ofrece una evaluación revisada y realista de la viabilidad de los objetivos DOE para esta familia de materiales.

3. Logros del proyecto

Los resultados obtenidos durante el proyecto MAST3RBoost demuestran el potencial de las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno basadas en materiales ultraporosos para contribuir a los objetivos europeos de descarbonización, competitividad industrial y autonomía estratégica. Más allá de los avances científicos alcanzados, el proyecto ha generado conocimiento, metodologías y capacidades industriales que constituyen una base sólida para el desarrollo de futuras políticas públicas y actividades de normalización.

Las principales contribuciones del proyecto pueden agruparse en cuatro ámbitos complementarios.

◆ 3.1 Avances científicos y tecnológicos

MAST3RBoost ha desarrollado una nueva generación de materiales ultraporosos para el almacenamiento de hidrógeno, incluyendo carbones activados y estructuras metal-orgánicas (MOFs), obtenidos mediante procesos sostenibles a partir de residuos agrícolas, agroalimentarios, urbanos e industriales. Entre los resultados más destacados se encuentra el desarrollo de carbones activados con superficies específicas de hasta **3.300 m²/g** y capacidades de adsorción de hidrógeno de hasta **9,8 % en peso** bajo condiciones criogénicas, así como nuevos MOFs sintetizados a partir de corrientes residuales con propiedades optimizadas para aplicaciones de almacenamiento.

El proyecto también ha incorporado herramientas de inteligencia artificial y aprendizaje automático para acelerar el descubrimiento y la optimización de materiales, desarrollando bases de datos FAIR, modelos predictivos y herramientas de aprendizaje activo que permiten reducir significativamente el esfuerzo experimental necesario para identificar nuevos materiales prometedores.

◆ 3.2 Escalado industrial y demostración tecnológica

Uno de los principales logros de MAST3RBoost ha sido demostrar que los materiales desarrollados pueden trascender el ámbito del laboratorio. El proyecto consiguió demostrar la viabilidad del escalado de diferentes materiales ultraporosos desde el laboratorio hasta planta piloto, identificando al mismo tiempo los principales retos asociados a su futura implantación industrial.

Paralelamente, el proyecto diseñó y fabricó un depósito ligero de hidrógeno basado en tecnologías de fabricación aditiva WAAM, incorporando recubrimientos internos específicamente desarrollados para operar en condiciones criogénicas. El depósito fue sometido a diferentes ensayos estructurales

y de presión, proporcionando información relevante para su futura validación y cualificación tecnológica.

◆ 3.3 Sostenibilidad y economía circular

MAST3RBoost ha demostrado que los materiales avanzados para almacenamiento de hidrógeno pueden producirse a partir de recursos secundarios, reduciendo la dependencia de materias primas vírgenes y favoreciendo modelos industriales más sostenibles.

El aprovechamiento de residuos agrícolas, residuos agroalimentarios, envases de aluminio, botellas de PET y drenajes ácidos de minas como materias primas constituye una demostración práctica del potencial de la economía circular aplicada al desarrollo de tecnologías energéticas avanzadas.

Asimismo, el proyecto evaluó los impactos ambientales, económicos y de seguridad de las tecnologías desarrolladas mediante estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), Coste del Ciclo de Vida y evaluación de riesgos, proporcionando una base objetiva para futuras decisiones regulatorias e industriales.

◆ 3.4 Contribución a la competitividad europea

Los resultados obtenidos fortalecen la capacidad europea para desarrollar tecnologías propias de almacenamiento de hidrógeno, integrando investigación avanzada, inteligencia artificial, fabricación aditiva, materiales sostenibles y procesos industriales escalables.

La combinación de estos avances contribuye a reforzar la posición de Europa en sectores estratégicos relacionados con el hidrógeno limpio, favoreciendo la creación de nuevas capacidades industriales, el desarrollo de cadenas de suministro más resilientes y la reducción de la dependencia tecnológica de terceros países.

Área estratégica	Principales resultados obtenidos	Relevancia para las políticas europeas
Materiales avanzados	Desarrollo de carbones activados y MOFs de altas prestaciones	Refuerza el liderazgo europeo en tecnologías de almacenamiento de hidrógeno
Inteligencia Artificial	Bases de datos FAIR, modelos predictivos y aprendizaje activo	Impulsa la digitalización de la investigación y la aceleración de la innovación
Escalado industrial	Producción piloto y densificación de materiales	Reduce la brecha entre investigación e industria
Fabricación avanzada	Depósito ligero mediante WAAM y recubrimientos criogénicos	Favorece nuevas capacidades manufactureras europeas
Economía circular	Uso de residuos como materias primas	Apoya la transición hacia una industria baja en carbono y eficiente en recursos

4. Contribución a las prioridades de la UE

La política europea en materia de hidrógeno ha evolucionado significativamente en los últimos años, incorporando objetivos relacionados con la descarbonización de la industria, el fortalecimiento de la capacidad manufacturera europea, la economía circular y la digitalización de los procesos productivos. Los resultados obtenidos en MAST3RBoost aportan evidencias técnicas relevantes que respaldan la implementación de estas políticas y pueden servir de referencia para futuras iniciativas de investigación, innovación y despliegue industrial.

Este alineamiento demuestra que los avances alcanzados por MAST3RBoost trascienden el ámbito científico y tecnológico, proporcionando evidencias que pueden orientar futuras decisiones en materia de investigación, innovación, normalización y desarrollo industrial dentro de la Unión Europea. Las recomendaciones presentadas en este documento se fundamentan en dichas evidencias y en las lecciones aprendidas durante la ejecución del proyecto.

Prioridad estratégica de la UE	Contribución de MAST3RBoost	Valor añadido para la política pública
Pacto Verde Europeo	Desarrollo de materiales sostenibles para almacenamiento de hidrógeno obtenidos a partir de residuos y procesos de fabricación de menor impacto ambiental.	Favorece la descarbonización industrial y la transición hacia una economía climáticamente neutra.
REPowerEU	Desarrollo de soluciones innovadoras para el almacenamiento de hidrógeno que pueden contribuir al despliegue de una economía europea del hidrógeno.	Refuerza la seguridad energética y reduce la dependencia de combustibles fósiles importados.
Estrategia Europea del Hidrógeno	Desarrollo y validación de materiales avanzados y sistemas de almacenamiento basados en adsorción.	Amplía el abanico de tecnologías disponibles para futuras aplicaciones del hidrógeno.
Plan de Acción para la Economía Circular	Valorización de residuos agrícolas, agroalimentarios, industriales y mineros como materias primas para materiales funcionales.	Impulsa modelos productivos más circulares y eficientes en el uso de recursos.
Net-Zero Industry Act	Escalado industrial de materiales avanzados y fabricación de componentes mediante WAAM.	Refuerza la capacidad manufacturera europea en tecnologías estratégicas de cero emisiones.
Estrategia Europea para la Digitalización y la IA	Aplicación de inteligencia artificial, aprendizaje automático y bases de datos FAIR para acelerar el desarrollo de nuevos materiales.	Demuestra el potencial de la IA como herramienta para acelerar la innovación industrial.

◆ Principales implicaciones para el desarrollo de las políticas europeas

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que el desarrollo de tecnologías avanzadas de almacenamiento de hidrógeno requiere un enfoque integrado que combine investigación en materiales, herramientas digitales, fabricación avanzada, sostenibilidad y procesos de demostración tecnológica. La experiencia adquirida durante el proyecto evidencia que la transición desde la investigación hasta la aplicación industrial depende no solo de la excelencia científica, sino también de la disponibilidad de infraestructuras de ensayo, mecanismos de colaboración entre la investigación y la industria, y marcos regulatorios que favorezcan la incorporación de nuevas tecnologías al mercado.

Asimismo, el proyecto confirma el potencial de la economía circular como elemento facilitador de la transición energética. La utilización de residuos agrícolas, agroalimentarios, industriales y mineros como materias primas para la obtención de materiales funcionales demuestra que es posible desarrollar soluciones innovadoras reduciendo la dependencia de recursos vírgenes y promoviendo un uso más eficiente de los recursos disponibles.

Otro aspecto especialmente relevante es la incorporación de herramientas de inteligencia artificial y aprendizaje automático en el proceso de desarrollo de materiales. La creación de infraestructuras de datos, modelos predictivos y metodologías de aprendizaje activo demuestra el potencial de estas tecnologías para acelerar la innovación, optimizar los procesos experimentales y apoyar el desarrollo de materiales avanzados para aplicaciones energéticas.

Finalmente, la experiencia acumulada durante MAST3RBoost pone de relieve la importancia de continuar reforzando las actividades de demostración, validación y transferencia tecnológica. El desarrollo de soluciones complejas que integran nuevos materiales, procesos de fabricación avanzada y condiciones de operación exigentes requiere tiempos adecuados de validación, infraestructuras especializadas y una estrecha colaboración entre los distintos actores del ecosistema europeo de innovación.

En conjunto, los resultados del proyecto constituyen una base técnica y científica sólida que puede contribuir al diseño de futuras iniciativas europeas de investigación e innovación, actividades de normalización y políticas públicas orientadas a acelerar el desarrollo y la futura implantación de tecnologías de almacenamiento de hidrógeno más seguras, sostenibles y competitivas.

No obstante, la experiencia adquirida durante el desarrollo del proyecto también ha permitido identificar una serie de desafíos científicos, tecnológicos e industriales cuya resolución será fundamental para favorecer el despliegue de estas tecnologías a mayor escala. Estos aspectos se analizan en el apartado siguiente.

5. Principales desafíos para la implantación industrial

A pesar de los importantes avances alcanzados durante MAST3RBoost, la experiencia del consorcio ha permitido identificar una serie de barreras que continúan limitando el desarrollo y la implantación a gran escala de tecnologías avanzadas de almacenamiento de hidrógeno. La identificación de estos desafíos constituye uno de los principales resultados del proyecto, ya que proporciona evidencias útiles para orientar futuras políticas de investigación, innovación, normalización y desarrollo industrial.

Disponibilidad limitada de infraestructuras de ensayo criogénico y de alta presión

El desarrollo y validación de sistemas avanzados de almacenamiento de hidrógeno requiere infraestructuras capaces de operar en condiciones combinadas de alta presión y temperaturas criogénicas. La experiencia del proyecto puso de manifiesto la limitada disponibilidad de este tipo de instalaciones tanto dentro del consorcio como a nivel europeo, lo que condicionó la planificación de determinadas actividades experimentales y evidenció la necesidad de reforzar este tipo de capacidades de investigación en futuras iniciativas.

Asimismo, la validación de demostradores complejos que integran nuevos materiales, procesos de fabricación avanzada y sistemas de almacenamiento requiere tiempos de puesta en marcha, verificación y evaluación que, en ocasiones, pueden superar la duración prevista de un proyecto de investigación. La experiencia adquirida pone de manifiesto la conveniencia de contemplar mecanismos que permitan completar estas fases de validación cuando existan condicionantes asociados a la seguridad, la disponibilidad de infraestructuras o la integración final de los sistemas.

Escalado industrial y preservación del rendimiento de los materiales

El paso de gramos de laboratorio a cantidades de planta piloto introdujo variaciones inesperadas en el comportamiento del material y la preservación de la porosidad, requiriendo la optimización de los procesos de densificación y granulación.

Necesidad de conjuntos de datos más amplios para los modelos de IA

La aplicación de herramientas de inteligencia artificial y aprendizaje automático al descubrimiento de nuevos materiales ha demostrado un elevado potencial para acelerar la investigación en almacenamiento de hidrógeno. Sin embargo, la capacidad predictiva de estos modelos depende directamente del volumen, la calidad y la diversidad de los datos disponibles para su entrenamiento.

Durante MAST3RBoost se generó una base de datos de materiales ultraporosos caracterizados que permitió desarrollar modelos predictivos y apoyar la selección de formulaciones prometedoras. No obstante, la ampliación de estos conjuntos de datos y su integración con información procedente de otros proyectos europeos permitiría mejorar significativamente la robustez y capacidad de generalización de estas herramientas.

La disponibilidad de bases de datos abiertas, interoperables y armonizadas a escala europea contribuiría significativamente a mejorar el rendimiento de los modelos predictivos, favorecer la reutilización del conocimiento generado con financiación pública y acelerar el desarrollo de nuevos materiales para aplicaciones energéticas.

Se requiere validación adicional en condiciones reales de operación

Aunque el proyecto ha permitido avanzar significativamente en el desarrollo de materiales ultraporosos, componentes y soluciones integradas para el almacenamiento de hidrógeno, será necesario continuar validando estas tecnologías en condiciones operativas representativas de sus aplicaciones finales.

Los resultados obtenidos en MAST3RBoost demuestran un elevado potencial de los materiales desarrollados, alcanzándose capacidades de almacenamiento de hidrógeno de hasta **9,8 % en peso** para los carbones ultraporosos en condiciones criogénicas (**100 bar y -196 °C**). No obstante, la mayor parte de los resultados experimentales se han obtenido bajo estas condiciones de ensayo, por lo que será necesario ampliar su validación a rangos de temperatura y condiciones de operación más próximas a las aplicaciones reales del transporte, la industria y el almacenamiento estacionario.

Asimismo, la experiencia adquirida durante el desarrollo del demostrador puso de manifiesto la complejidad asociada a la integración y validación de sistemas que combinan nuevos materiales, procesos avanzados de fabricación y condiciones de operación exigentes. La disponibilidad de infraestructuras especializadas, los requisitos de seguridad y los tiempos necesarios para completar las actividades de puesta en marcha y validación pueden superar, en determinadas circunstancias, la duración prevista de un proyecto de investigación e innovación.

En este contexto, resulta recomendable que los futuros programas europeos de I+D+i contemplen mecanismos que permitan prolongar las actividades de demostración y validación tecnológica cuando sea necesario, facilitando así una transición más eficaz entre la investigación, la demostración y el posterior despliegue industrial de estas tecnologías.

Las actividades de normalización deberían iniciarse de forma paralela al desarrollo tecnológico más allá del proyecto

La experiencia adquirida durante MAST3RBoost pone de manifiesto la importancia de iniciar las actividades de normalización de forma paralela al desarrollo tecnológico. La incorporación de nuevas soluciones de almacenamiento de hidrógeno basadas en materiales avanzados, fabricación aditiva y recubrimientos funcionales requiere que los procesos de cualificación y normalización evolucionen al mismo ritmo que el desarrollo de la tecnología.

En particular, el desarrollo de depósitos fabricados mediante tecnologías de manufactura aditiva (WAAM), junto con la aplicación de recubrimientos internos específicos para condiciones criogénicas, evidencia la necesidad de continuar generando datos experimentales que contribuyan a la actualización de los estándares aplicables a equipos a presión, sistemas de almacenamiento de hidrógeno y transporte de mercancías peligrosas.

Favorecer una colaboración temprana entre proyectos de investigación, industria, organismos de normalización y autoridades reguladoras permitirá reducir los tiempos necesarios para la futura cualificación y adopción de estas tecnologías, facilitando su incorporación al mercado en condiciones de seguridad y fiabilidad.

6. Evaluación revisada de la viabilidad de los objetivos DOE

El Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) establece objetivos técnicos de referencia mundial para sistemas de almacenamiento de hidrógeno embarcado en vehículos ligeros. Es importante subrayar que estos objetivos se refieren al sistema completo (depósito, material, válvulas, aislamiento, componentes auxiliares), no solo al material, por lo que la capacidad del material debe ser sensiblemente superior a la del sistema.

Parámetro	Objetivo DOE 2025 (sistema)	Objetivo DOE final (sistema)	Resultado MAST3RBoost (material)	Condiciones de ensayo
Capacidad gravimétrica	5,5 % en peso	≈ 6,5 % en peso	Hasta 9,8 % en peso (carbones ultraporosos)	100 bar, -196 °C
Capacidad volumétrica	40 g H ₂ /L	≈ 50 g H ₂ /L	No reportada a nivel de sistema completo	—
Rango de temperatura operativa	-40 °C a 60 °C	-40 °C a 60 °C	-196 °C (temperatura de ensayo)	Muy por debajo del rango DOE
Presión	< 10 MPa (100 bar)	< 10 MPa (100 bar)	100 bar (material); depósito sometido a ensayos de presión, incluyendo ensayo de rotura a 360 bar	Ensayos realizados sobre material y componentes

Los materiales desarrollados en MAST3RBoost, en particular los carbones ultraporosos, con hasta el 9,8 % en peso de captación de hidrógeno, superan, a nivel de material, el objetivo final del DOE. No obstante, este resultado se obtiene a -196°C , muy por debajo del rango operativo de -40°C a 60°C exigido por el DOE para vehículos ligeros. Los MOFs del consorcio, con capacidades de hasta el 1,44 % en peso a -196°C y 1 bar, quedan aún más lejos de los objetivos, tanto por temperatura como por presión.

Una evaluación equilibrada debe distinguir dos conclusiones. La primera, a nivel de material, proporciona evidencia de que los materiales desarrollados pueden alcanzar capacidades gravimétricas superiores del DOE mediante criosorción en carbones ultraporosos derivados de residuos. La segunda: a nivel de aplicación, el objetivo del DOE fue diseñado para vehículos ligeros con almacenamiento a temperatura ambiente o cercana; los materiales desarrollados y evaluados durante el proyecto encajan mejor en una categoría distinta: el almacenamiento criogénico o híbrido crio-comprimido, más adecuado para aplicaciones de transporte pesado, marítimo, ferroviario o almacenamiento estacionario industrial, donde ya existe o se está desplegando infraestructura criogénica.

Por tanto, los objetivos del DOE, tal y como están formulados actualmente, deben interpretarse con cautela cuando se comparan con tecnologías de almacenamiento basadas en criosorción. Si bien constituyen una referencia internacional ampliamente aceptada para la evaluación de sistemas de almacenamiento de hidrógeno, fueron definidos para aplicaciones y condiciones de operación diferentes a las consideradas en MAST3RBoost. Por lo tanto, la comparación entre ambos enfoques debería incorporar explícitamente variables como el rango de temperatura operativa, evitando utilizar los objetivos del DOE como único criterio para evaluar el potencial de esta familia de materiales.

En consecuencia, la evaluación de tecnologías emergentes de almacenamiento de hidrógeno debería considerar no solo el rendimiento alcanzado a nivel de material, sino también las condiciones de operación, el grado de madurez tecnológica y la aplicación final prevista. Adoptar este enfoque permitirá realizar evaluaciones más equilibradas de soluciones innovadoras, facilitando la incorporación de nuevas tecnologías al marco europeo de investigación, innovación y desarrollo industrial.

7. Recomendaciones políticas

Cada recomendación se estructura en cuatro apartados — antecedentes, evidencia aportada por MAST3RBoost, impacto político esperado y actores destinatarios — con el fin de facilitar su valoración e integración en los procesos legislativos y de programación en curso.

R1. Reconocer la criosorción como una vía de almacenamiento diferenciada

Antecedentes: La evolución del marco político europeo en materia de hidrógeno, impulsada por la Estrategia Europea del Hidrógeno, el plan REPowerEU y el desarrollo de nueva legislación sobre mercados e infraestructuras de hidrógeno, ofrece una oportunidad para ampliar el reconocimiento de tecnologías emergentes de almacenamiento que complementen las soluciones convencionales basadas en hidrógeno comprimido y licuado. En este contexto, resulta necesario

desarrollar criterios de evaluación adaptados a las características y condiciones de operación de estas nuevas tecnologías.

Evidencia de MAST3RBoost: Los resultados obtenidos durante MAST3RBoost muestran que los materiales ultraporosos desarrollados alcanzan capacidades gravimétricas de almacenamiento de hidrógeno de hasta **9,8 % en peso** bajo condiciones criogénicas (**100 bar y -196 °C**). Estos resultados evidencian el potencial de las tecnologías basadas en criosorción para determinadas aplicaciones, aunque también ponen de manifiesto que su evaluación debe realizarse considerando sus condiciones específicas de operación y su diferente nivel de madurez tecnológica respecto a otras soluciones de almacenamiento.

Impacto político esperado: El reconocimiento de la criosorción como una tecnología diferenciada permitirá disponer de criterios de evaluación más adecuados para este tipo de soluciones, favorecerá el desarrollo de hojas de ruta tecnológicas específicas y contribuirá a diversificar el ecosistema europeo de almacenamiento de hidrógeno, impulsando la innovación y reduciendo el riesgo asociado a tecnologías emergentes.

R2. Reforzar el apoyo a la demostración y validación de tecnologías a escala piloto e industrial

Antecedentes: La transición de los resultados de laboratorio hacia aplicaciones industriales continúa siendo uno de los principales retos para las tecnologías emergentes de almacenamiento de hidrógeno. Diversas iniciativas europeas han identificado la denominada "*valley of death*" entre la investigación y el mercado como una de las principales barreras para la adopción de nuevas soluciones tecnológicas, especialmente cuando requieren infraestructuras especializadas, procesos de validación complejos y elevados niveles de inversión.

Evidencia de MAST3RBoost: El proyecto ha demostrado la viabilidad del escalado de materiales ultraporosos desde el laboratorio hasta planta piloto, incluyendo la producción de carbones activados y MOFs mediante procesos de mayor capacidad. Asimismo, la experiencia adquirida durante el desarrollo e integración del demostrador puso de manifiesto que la validación de sistemas complejos requiere tiempos, infraestructuras especializadas y procedimientos de seguridad que, en ocasiones, pueden superar la duración prevista de un proyecto de investigación e innovación. Estas experiencias evidencian la necesidad de reforzar las fases de demostración y validación tecnológica para facilitar la transferencia efectiva de los resultados hacia aplicaciones industriales.

Impacto político esperado: El fortalecimiento de las actividades de demostración y validación reducirá el riesgo tecnológico asociado a la adopción de nuevas soluciones de almacenamiento de hidrógeno, acelerará la transferencia de resultados desde la investigación hacia la industria y favorecerá una incorporación más rápida de tecnologías innovadoras al mercado europeo.

R3. Reforzar las infraestructuras europeas para el ensayo y validación de tecnologías avanzadas de almacenamiento de hidrógeno

Antecedentes: La disponibilidad de infraestructuras especializadas constituye un elemento esencial para acelerar el desarrollo y la validación de tecnologías avanzadas de almacenamiento de hidrógeno. Sin embargo, la limitada capacidad existente en Europa para realizar ensayos que

combinen condiciones criogénicas, alta presión y evaluación de sistemas integrados continúa representando una barrera para la cualificación y certificación de nuevas soluciones tecnológicas.

Evidencia de MAST3RBoost: La experiencia adquirida durante el proyecto puso de manifiesto que la disponibilidad limitada de infraestructuras capaces de realizar ensayos bajo condiciones combinadas de alta presión y temperaturas criogénicas condicionó la planificación de determinadas actividades de validación y caracterización. Asimismo, la integración y puesta en marcha del demostrador evidenció la complejidad de validar tecnologías emergentes que requieren infraestructuras altamente especializadas y procedimientos específicos de seguridad.

Impacto político esperado: El fortalecimiento de las infraestructuras europeas de ensayo permitirá acelerar la cualificación y certificación de nuevas tecnologías de almacenamiento de hidrógeno, reducir los tiempos necesarios para su validación, favorecer la colaboración entre centros de investigación e industria y reforzar la autonomía tecnológica de Europa en un ámbito estratégico para la transición energética.

Estas infraestructuras también facilitarían la generación de datos experimentales armonizados, contribuyendo al desarrollo de futuras actividades de normalización y al establecimiento de metodologías comunes para la evaluación de tecnologías emergentes de almacenamiento de hidrógeno.

R4. Impulsar el uso de la inteligencia artificial (Machine Learning) para acelerar el desarrollo de materiales avanzados

Antecedentes: La Estrategia Europea para la Digitalización, la Estrategia Europea de Datos y el Reglamento de Inteligencia Artificial reconocen el potencial de la inteligencia artificial para acelerar la investigación, la innovación y la competitividad industrial. En el ámbito de los materiales avanzados, la disponibilidad de datos de alta calidad y el desarrollo de modelos predictivos constituyen elementos clave para reducir los tiempos y costes asociados al descubrimiento y optimización de nuevos materiales.

Evidencia de MAST3RBoost: Durante el proyecto se desarrolló una base de datos de materiales ultraporosos caracterizados y se aplicaron técnicas de **Machine Learning (ML)** y **Active Learning** para apoyar la selección y optimización de materiales destinados al almacenamiento de hidrógeno. La experiencia obtenida puso de manifiesto el potencial de estas herramientas para acelerar el proceso de investigación, así como la necesidad de disponer de conjuntos de datos más amplios, diversos e interoperables que permitan mejorar la capacidad predictiva de los modelos desarrollados.

Impacto político esperado: El fortalecimiento de las infraestructuras de datos y la aplicación de técnicas de Machine Learning permitirán acelerar el descubrimiento de nuevos materiales, optimizar los procesos experimentales y reducir los tiempos y costes asociados al desarrollo de tecnologías avanzadas para el almacenamiento de hidrógeno. Asimismo, favorecerán la reutilización del conocimiento generado en proyectos europeos y contribuirán a reforzar la competitividad científica e industrial de Europa.

R5. Integrar las actividades de normalización desde las primeras fases del desarrollo tecnológico

Antecedentes: El desarrollo de tecnologías emergentes para el almacenamiento de hidrógeno avanza a un ritmo superior al de los procesos de normalización y certificación. En particular, las soluciones basadas en materiales avanzados y fabricación aditiva requieren la evolución de los marcos normativos existentes para facilitar su futura cualificación, homologación e incorporación al mercado.

Evidencia de MAST3RBoost: Durante el proyecto se diseñó y fabricó un depósito ligero mediante tecnología **Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)**, complementado con recubrimientos internos específicamente desarrollados para aplicaciones criogénicas. Asimismo, se llevaron a cabo diferentes ensayos estructurales, no destructivos y de presión que permitieron generar información técnica de alto valor sobre el comportamiento de este tipo de componentes.

La experiencia adquirida durante el proyecto puso de manifiesto la importancia de continuar ampliando la base experimental disponible y de reforzar las actividades de validación y cualificación tecnológica para facilitar la futura incorporación de estas soluciones a los procesos europeos de normalización.

Impacto político esperado: La integración temprana de las actividades de normalización permitirá reducir los tiempos necesarios para la cualificación y certificación de nuevas tecnologías, facilitar su transferencia al mercado y reforzar la competitividad de la industria europea en el desarrollo de soluciones avanzadas de almacenamiento de hidrógeno.

R6. Impulsar el uso de materias primas circulares para el desarrollo de materiales avanzados de almacenamiento de hidrógeno

Antecedentes: La Unión Europea está impulsando un modelo industrial más sostenible y resiliente mediante iniciativas como el Plan de Acción para la Economía Circular, el Reglamento sobre Materias Primas Fundamentales (Critical Raw Materials Act) y el Net-Zero Industry Act, con el objetivo de reducir la dependencia de materias primas vírgenes e importadas, fortalecer la autonomía estratégica y fomentar el aprovechamiento de recursos secundarios en sectores industriales clave.

Evidencia de MAST3RBoost: Los resultados obtenidos en MAST3RBoost demuestran la viabilidad de producir materiales avanzados para el almacenamiento de hidrógeno a partir de una amplia variedad de corrientes residuales, incluyendo residuos agrícolas (como cáscaras de pistacho y serrín de eucalipto), residuos agroalimentarios, envases de aluminio, botellas de PET y drenajes ácidos de mina. Estos materiales alcanzaron prestaciones competitivas para aplicaciones de almacenamiento de hidrógeno, demostrando que la valorización de residuos puede contribuir simultáneamente a la economía circular y al desarrollo de tecnologías energéticas avanzadas.

Impacto político esperado: El impulso al uso de materias primas circulares contribuirá a reducir la dependencia europea de recursos vírgenes e importados, reforzar la autonomía estratégica en materiales avanzados, disminuir el impacto ambiental asociado a la producción de materiales funcionales y acelerar la transición hacia una economía más circular, competitiva y climáticamente neutra.

R7. Impulsar espacios europeos de datos abiertos para materiales avanzados

Antecedentes: La disponibilidad de datos abiertos, interoperables y reutilizables constituye uno de los pilares de la política europea de investigación e innovación. Sin embargo, gran parte de la información generada por proyectos financiados con fondos públicos continúa dispersa entre diferentes consorcios, limitando la reutilización del conocimiento y reduciendo el potencial de herramientas digitales como el Machine Learning para acelerar el desarrollo de nuevos materiales.

Evidencia de MAST3RBoost: Durante el proyecto se generaron conjuntos de datos de alto valor relacionados con materiales ultraporosos para almacenamiento de hidrógeno y con el comportamiento de componentes fabricados mediante tecnologías avanzadas de fabricación aditiva (WAAM). Estos datos permitieron desarrollar modelos de Machine Learning para apoyar la selección y optimización de materiales, poniendo de manifiesto el potencial de la gestión estructurada de datos para acelerar la investigación y mejorar la capacidad predictiva de estas herramientas.

Impacto político esperado: La creación de espacios europeos de datos interoperables favorecerá la reutilización del conocimiento generado en proyectos de investigación, acelerará el desarrollo de nuevos materiales mediante técnicas de Machine Learning, reducirá la duplicación de esfuerzos experimentales y reforzará la competitividad científica e industrial de Europa en el ámbito de los materiales avanzados y las tecnologías del hidrógeno.

8. Impacto socioeconómico

Más allá de los avances científicos y tecnológicos alcanzados, MAST3RBoost aporta beneficios con un claro potencial económico, industrial, ambiental y social. La integración de materiales avanzados, principios de economía circular, procesos de fabricación innovadores y herramientas digitales constituye un ejemplo del tipo de innovación necesaria para fortalecer la competitividad europea y acelerar la transición hacia un sistema energético más sostenible y resiliente.

- **Valorización de residuos:** MAST3RBoost ha demostrado la viabilidad de transformar residuos agrícolas, agroalimentarios, industriales y mineros en materias primas de alto valor añadido para la producción de materiales avanzados destinados al almacenamiento de hidrógeno. Este enfoque favorece la reducción de residuos, incrementa el valor económico de corrientes infrautilizadas y contribuye a la implantación de modelos industriales más circulares y eficientes en el uso de los recursos.
- **Reducción de la dependencia de materias primas vírgenes:** La utilización de recursos secundarios como precursores para la obtención de materiales funcionales permite disminuir la dependencia de materias primas vírgenes e importadas, reforzando la resiliencia de las cadenas europeas de suministro y reduciendo la exposición de la industria a la volatilidad de los mercados internacionales de materias primas.
- **Aumento de la competitividad industrial:** El proyecto ha demostrado la viabilidad del escalado de diferentes materiales ultraporosos desde el laboratorio hasta planta piloto, generando conocimiento y capacidades industriales que pueden contribuir al desarrollo de nuevas cadenas de valor europeas en el ámbito del almacenamiento de hidrógeno. Estos avances favorecen la transferencia de tecnología, reducen el riesgo asociado a la adopción de soluciones innovadoras y fortalecen la posición competitiva de la industria europea.

- **Apoyo a la autonomía estratégica:** El desarrollo de tecnologías de almacenamiento basadas en recursos, conocimiento y capacidades industriales europeas contribuye a reforzar la autonomía estratégica de la Unión en un sector clave para la transición energética. La disponibilidad de soluciones propias reduce la dependencia de proveedores externos y favorece la creación de cadenas de suministro más resilientes y diversificadas.
- **Contribución a los ecosistemas regionales de innovación:** La colaboración entre entidades de investigación, industria y centros tecnológicos ha contribuido a fortalecer las capacidades de innovación en diferentes regiones europeas, promoviendo la generación de conocimiento especializado y favoreciendo la creación de empleo altamente cualificado en ámbitos como los materiales avanzados, la fabricación aditiva, la digitalización y la valorización de residuos.
- **Contribución a la transición energética:** Las tecnologías desarrolladas en MAST3RBoost contribuyen a ampliar el abanico de soluciones disponibles para el almacenamiento de hidrógeno, apoyando el despliegue de sistemas energéticos más flexibles y sostenibles. Aunque será necesario continuar avanzando en su validación y madurez tecnológica, los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para futuras aplicaciones industriales y para el desarrollo de nuevas políticas europeas orientadas al hidrógeno limpio.

En conjunto, los resultados de MAST3RBoost ponen de manifiesto que la inversión en investigación e innovación en materiales avanzados para el almacenamiento de hidrógeno genera beneficios que van más allá del ámbito científico, contribuyendo al desarrollo económico, la competitividad industrial, la sostenibilidad ambiental y la autonomía estratégica de la Unión Europea. Estos impactos refuerzan la necesidad de continuar apoyando iniciativas de investigación colaborativa que faciliten la transición desde la generación de conocimiento hasta su aplicación industrial.

9. Lecciones aprendidas

- **Escalado:** la transición de gramos de laboratorio a kilogramos de planta piloto introduce variaciones no anticipadas en la porosidad y el comportamiento del material; anticipar ciclos iterativos de optimización de la densificación y la granulación resulta esencial para no comprometer el calendario del proyecto.
- **Inteligencia artificial:** el valor de los modelos de aprendizaje automático depende directamente del volumen y la calidad de los datos de caracterización disponibles; conjuntos de datos de 50 materiales, aunque útiles, son insuficientes para explotar todo el potencial predictivo de estas herramientas.
- **Infraestructura de ensayo:** la falta de instalaciones europeas capaces de combinar alta presión y atmósfera criogénica de hidrógeno obligó a adaptar los planes de ensayo sobre la marcha, evidenciando una carencia estructural que trasciende a este proyecto concreto.
- **Recubrimientos:** un cambio de diseño del depósito, de una estructura en dos mitades a una pieza monolítica, obligó a reformular por completo la estrategia de recubrimiento interno; lejos de ser un contratiempo, este pivote condujo al desarrollo de un procedimiento («out-of-the-bath») más avanzado y con mayor potencial de transferencia a otros sectores industriales.

- **Validación industrial:** los fallos iniciales de estanqueidad y de soldadura TIG en el depósito demostrador, resueltos mediante el rediseño de las juntas y de determinadas secciones del intercambiador de calor, subrayan la importancia de reservar margen de calendario para ciclos de rediseño en la validación de componentes fabricados de forma aditiva.

10. Conclusiones y mensajes clave

1. MAST3RBoost demuestra el potencial de los materiales avanzados obtenidos a partir de corrientes residuales para aplicaciones de almacenamiento de hidrógeno, evidenciando que la economía circular puede contribuir al desarrollo de soluciones energéticas de alto valor añadido y reducir la dependencia de materias primas vírgenes.
2. Los materiales desarrollados alcanzaron capacidades gravimétricas superiores a los objetivos de referencia del DOE cuando fueron evaluados bajo condiciones criogénicas; su encaje natural es el transporte pesado, marítimo, ferroviario y el almacenamiento industrial estacionario, no necesariamente el vehículo ligero a temperatura ambiente.
3. El desarrollo del depósito demostrador mediante tecnología WAAM y los ensayos estructurales y de presión realizados durante el proyecto han generado conocimiento técnico relevante para futuras actividades de cualificación, validación y normalización de tecnologías avanzadas de almacenamiento de hidrógeno.
4. La experiencia adquirida durante MAST3RBoost ha permitido identificar ámbitos prioritarios de actuación, entre ellos el fortalecimiento de las infraestructuras de ensayo, el desarrollo de espacios europeos de datos para Machine Learning y el impulso de actividades de normalización, que podrían abordarse mediante instrumentos europeos ya existentes como Horizon Europe, la Clean Hydrogen Partnership y los organismos europeos de normalización (CEN/CENELEC).
5. El siguiente paso para acelerar la implantación de estas tecnologías pasa por reforzar las actividades de demostración, validación, normalización y despliegue industrial, mediante instrumentos de financiación, marcos regulatorios adecuados y una colaboración continua entre investigación, industria y administraciones públicas.

En conjunto, MAST3RBoost proporciona a la Comisión Europea una base técnica y científica sólida sobre una vía de almacenamiento de hidrógeno alternativa y complementaria a las soluciones actualmente contempladas en el marco político y regulatorio europeo.

La experiencia adquirida durante el proyecto pone de manifiesto que estas tecnologías presentan un elevado potencial para contribuir a los objetivos europeos de transición energética y competitividad industrial. No obstante, su futura implantación a gran escala requerirá continuar avanzando en actividades de demostración, validación tecnológica, normalización y desarrollo de infraestructuras que faciliten su transferencia hacia aplicaciones industriales.

Las recomendaciones recogidas en este documento ofrecen una hoja de ruta para apoyar ese proceso, reforzando el papel de la investigación y la innovación europeas en el desarrollo de soluciones de almacenamiento de hidrógeno más sostenibles, seguras y competitivas.