

29 de julio de 2026

Digitalización de la cadena de valor del hidrógeno

ELABORADO POR



Este informe se ha elaborado utilizando la información más precisa y accesible de la que disponían los autores. No obstante, ni los autores, ni sus organizaciones o empresas, ni el Observatorio de Tecnología del Hidrógeno asumen responsabilidad alguna por la exactitud de los datos presentados, ni aceptan responsabilidad alguna derivada del uso de la información contenida en este documento.

AUTORES

- Zigor Lizuain, Solutions Architect en Emerson
- David Cuesta Pardo, director de Transición Verde en NTT Data
- Patricia Prieto, directora de Nuevos Vectores Energéticos en INETUM
- Ainhoa Malanda Navía, Director Global Project Pursuit en Emerson
- Raúl Caballero Helguera, responsable- de cuentas de ventas en Emerson
- Ron Beck, Senior Solution Marketing Director en Emerson
- Manuel Ruiz Jiménez, director de Energía y Servicios Públicos de NTT Data
- Diogo Furtado Lopes, director de Redes de Energía y Servicios Públicos para la Península Ibérica y LatAmat en INETUM
- Álvaro García García, responsable de IT e Industria 4.0 en CIDAUT
- Iván Álvarez Escalante, especialista en Innovación Digital en Moeve
- Rafael Coronel Martínez, responsable de Desarrollo de Negocio en SLB
- Marc Esteve, Product Manager Digital Solutions en Endress+Hauser
- Óscar Arriero, responsable de Desarrollo de Negocio en Siemens Energy
- Andreas Huber, responsable de Desarrollo Empresarial, Modelización y Análisis en Siemens Energy
- Óscar García Gómez, coordinador de Soluciones Digitales, SA y TTE en Enagás
- Javier Serra Parajes, director de Gestión y Análisis de Mantenimiento de Enagás
- Adolfo Crespo Márquez, presidente de INGEMAN, Universidad de Sevilla
- Ángela María Solano, responsable de Productos de ingeniería de procesos en SLB
- Paolo F. Delbosco, director técnico de Ventas Digitales para Europa en SLB
- Isaías Martín, responsable de Desarrollo de Negocio en ABB
- José Alfonso Almansa, responsable de Hidrógeno en ABB
- Javier Delafuente, responsable de cuentas para el sector energético en ABB
- María del Pilar Berrocal Bermejo, directora comercial de Energía e Industria en INETUM
- Alberto Rico Sanguino, director de Datos y Análisis en NTT Data
- Jhon Jairo Medina Davis, director técnico de Ciberseguridad de ICS/OT en NTT Data
- Luis Guillén, director de Ciberseguridad de OT en NTT Data
- Andrea Romero Gutiérrez, directora técnica de Estrategia de Operaciones de NTT Data
- Raúl Cuadrado Ruan, responsable de Transición Ecológica en NTT Data
- Carlos Martínez Aguilera, coordinador de Innovación y Desarrollo Tecnológico de Enagás
- Irene Garcés Ortiz, técnica de Innovación y Desarrollo Tecnológico de Enagás

ÍNDICE

AUTORES	3
ÍNDICE.....	4
RESUMEN EJECUTIVO	9
BRECHAS EN EL DESPLIEGUE ESTRATÉGICO DEL HIDRÓGENO Y EL PAPEL DE LA DIGITALIZACIÓN.....	11
GUÍA DEL LECTOR.....	13
1. INTRODUCCIÓN: CONCEPTOS DIGITALES CLAVE	14
1.1 Siglas.....	14
1.2 Términos clave	19
2. ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS DIGITALES APLICABLES AL HIDRÓGENO.....	22
2.1. Ciberseguridad	22
2.2 Análisis de datos e inteligencia artificial	24
2.3 Sistemas de automatización y control	25
2.4 BIM y gestión de la información de ingeniería.....	26
2.5 Internet de las cosas y conectividad industrial	28
2.6 Tecnologías de gemelos digitales y simulación	29
2.7 Trazabilidad digital	31
2.8 SIG (Sistemas de Información Geográfica)	32
3. RETOS Y BARRERAS DIGITALES EN LA CADENA DE VALOR DEL HIDRÓGENO	34
3.1 Retos transversales (los que afectan a toda la cadena de valor)	34
3.2 Retos del segmento upstream	38
3.3 Retos del segmento midstream.....	39
3.4 Retos del segmento downstream.....	42
4. LECCIONES APRENDIDAS DE LOS SECTORES INDUSTRIALES MADUROS EN EL ÁMBITO DIGITAL	46
4.1 Integración y gobernanza de datos.....	46
4.2 Análisis de datos e inteligencia artificial	46
4.3 Gemelos digitales y simulación	46
4.4 Sistemas de automatización y control	47
4.5 Conectividad industrial e integración OT/IT.....	47
4.6 Mantenimiento predictivo y gestión de activos	47
4.7 Interoperabilidad y estandarización	48
4.8 Adopción organizativa y gobernanza digital.....	48
4.9 Escalabilidad y enfoque de implementación.....	48
5. APLICACIÓN DE SOLUCIONES DIGITALES A LO LARGO DE LA CADENA DE VALOR DEL HIDRÓGENO.....	50
5.1 Ciberseguridad	52
5.1.1 Ciberseguridad para las operaciones de la red troncal	52

5.1.2 GUARDIANE-Q.....	53
5.2 Análisis de datos e inteligencia artificial. Análisis económico	53
5.2.1 Optimización del complejo de amoníaco verde e hidrógeno	54
5.2.2 Optimización de la red de plantas de hidrógeno	54
5.2.3 Herramienta web AIHRE.....	55
5.3 Análisis de datos e inteligencia artificial. Gestión y optimización de operaciones	55
5.3.1 Solución dinámica integral para el amoníaco verde	56
5.3.2 DERMS para la flexibilidad en una red con un alto porcentaje de energías renovables	56
5.3.3 DERMS de transmisión para la descarbonización de la cartera de energías renovables	57
5.4 Análisis de datos e inteligencia artificial. Gestión de tuberías, integridad y detección de fugas	57
5.4.1 Detección de fugas en sistemas de recogida con escasa instrumentación.....	58
5.4.2 Minimización de las interrupciones operativas.....	59
5.4.3 Suministro energético estable y seguro en todo el país.....	59
5.5 Análisis de datos e inteligencia artificial. Integración de datos industriales	60
5.5.1 Estandarización y conexión de las operaciones.....	60
5.5.2 Agregar y centralizar millones de puntos de datos en tiempo real.....	61
5.5.3 Índice de estado de los activos para la gestión de activos basada en el estado	61
5.6 Análisis de datos e inteligencia artificial. Mantenimiento prescriptivo y predictivo	62
5.6.1 Mantenimiento prescriptivo de compresores de hidrógeno	62
5.7 Análisis de datos e inteligencia artificial. Análisis de procesos y optimización multivariante de la calidad	63
5.7.1 Conciliación de datos bajo demanda para una flota de plantas de hidrógeno	64
5.8 Sistemas de automatización y control	64
5.8.1 El mayor centro mundial de hidrógeno verde y almacenamiento de energía de larga duración	65
5.8.2 Proyecto piloto de hidrógeno verde en alta mar.....	66
5.8.3 Planta de producción de hidrógeno verde a gran escala	66
5.8.4 Coordinación de procesos entre múltiples fabricantes de equipos originales.....	67
5.9 BIM y gestión de la información de ingeniería.....	67
5.9.1 Entorno integrado BIM-SIG para la infraestructura de transporte de hidrógeno	68
5.10 Internet de las cosas y conectividad industrial.....	68
5.10.1 Tecnologías en la nube que permiten reducir los costes de inversión y permiten a los operadores centrarse en tareas críticas.....	69
5.11 Gemelo digital y simulación.....	69
5.11.1 Planta integrada de hidrógeno verde y amoníaco	70
5.11.2 Conciliación de datos de las plantas de hidrógeno en toda la flota	70
5.11.3 Hilo digital en la industria naval.....	71

6. CONCLUSIONES.....	74
6.1 Evaluación de la madurez de las capacidades digitales.....	74
6.2 Enfoque práctico recomendado para la adopción	75
6.3 Observación final.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Infografía sobre ciberseguridad para infraestructuras H ₂	23
Figura 2. Infografía sobre análisis de datos e inteligencia artificial para infraestructuras de hidrógeno.	25
Figura 3. Infografía sobre los sistemas de automatización y control para las infraestructuras de H ₂	26
Figura 4. BIM y gestión de la información de ingeniería para infraestructuras de H ₂	27
Figura 5. Internet de las cosas y conectividad industrial para infraestructuras de hidrógeno.	29
Figura 6. Tecnologías de gemelos digitales y simulación para infraestructuras de H ₂	30
Figura 7. Trazabilidad digital para infraestructuras de H ₂	31
Figura 8. SIG para infraestructuras de hidrógeno.....	33
Figura 9. Cadena de valor del hidrógeno.....	34
Figura 10. Mapa de retos digitales para la cadena de valor del hidrógeno.....	45
Figura 11. Lecciones clave de sectores con madurez digital y sus implicaciones para la digitalización del hidrógeno.....	49
Figura 12. Cartera de soluciones digitales y evaluación de la transferibilidad a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno.	73
Figura 13. Hoja de ruta recomendada para la adopción práctica de capacidades digitales a lo largo del ciclo de vida de los proyectos de hidrógeno.	77

Todas las figuras incluidas en este informe han sido elaboradas por los autores. Algunas figuras se han generado con la ayuda de herramientas de inteligencia artificial (IA).

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Siglas del informe</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 2. Términos clave del informe</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 3. Retos, capacidades digitales y mapa de madurez.....</i>	<i>50</i>

RESUMEN EJECUTIVO

Se prevé que el hidrógeno desempeñe un papel central en la descarbonización de sectores en los que resulta difícil reducir las emisiones, como la industria, el transporte, la aviación, las aplicaciones marítimas y los sistemas energéticos. **Sin embargo, para lograr un despliegue a gran escala se necesitarán las capacidades digitales necesarias para diseñar, operar, optimizar, proteger y certificar ecosistemas de hidrógeno cada vez más complejos.** La competitividad en términos de costes, el rendimiento operativo, la integridad de los activos, el cumplimiento normativo y la escalabilidad dependen cada vez más del uso eficaz de las tecnologías digitales a lo largo de todo el ciclo de vida de los activos.

Este documento, elaborado por el Observatorio de Tecnologías del Hidrógeno, y concretamente por sus miembros: **ABB, Cidaut, Emerson, Enagás, Endress+Hauser, Engreen, Inetum, Moeve, NTT Data, Siemens Energy y SLB**, analiza cómo las tecnologías digitales pueden apoyar el desarrollo y el funcionamiento de la cadena de valor del hidrógeno. **El objetivo del informe no es promover tecnologías concretas, sino proporcionar un marco práctico para comprender en qué ámbitos las capacidades digitales pueden abordar los retos reales del sector del hidrógeno**, e identificar las deficiencias que siguen presentes.

Una conclusión clave de este estudio es que el **sector del hidrógeno no necesita desarrollar un paradigma digital completamente nuevo**. El informe identifica un conjunto de capacidades digitales que ya están maduras y que se adoptan ampliamente en proyectos de hidrógeno en los ámbitos de la producción, el transporte, el almacenamiento y las aplicaciones posteriores. Estas capacidades incluyen la ciberseguridad, la analítica avanzada y la inteligencia artificial, los sistemas de automatización y control, la gestión de la información de ingeniería, la conectividad industrial, los gemelos digitales, la trazabilidad digital y los sistemas de información geográfica. Cuando se implementan como un ecosistema integrado, en lugar de como tecnologías aisladas, proporcionan la infraestructura digital necesaria para gestionar los complejos procesos de la cadena de valor del hidrógeno, entre los que se incluyen la conversión electroquímica, la compresión, el almacenamiento, el transporte, el control de calidad del producto, la interacción con las redes eléctricas y la coordinación con los centros de demanda industrial.

El análisis identificó múltiples proyectos de referencia específicos del hidrógeno en los que **estas tecnologías ya se están implementando, lo que demuestra que muchas de las capacidades digitales necesarias para respaldar la economía del hidrógeno no son conceptos futuros, sino soluciones industriales probadas**. Entre los ejemplos se incluyen instalaciones de producción de hidrógeno verde a gran escala, sistemas integrados de hidrógeno verde y amoníaco, proyectos de infraestructura de transporte de hidrógeno e iniciativas de optimización de redes de hidrógeno que ya están aportando beneficios operativos cuantificables.

Además, muchos de los casos de uso restantes proceden de sectores maduros, como el del petróleo y el gas, el GNL, los sistemas eléctricos, los gases industriales y las industrias de procesos, y abordan retos muy similares a los que se esperan en los ecosistemas del hidrógeno. **La combinación de referencias específicas del hidrógeno y de la experiencia industrial directamente transferible reduce significativamente el riesgo de adopción de la tecnología** y proporciona a los promotores de proyectos acceso a una amplia cartera de enfoques de implementación probados. En consecuencia, **la cuestión principal ya no es si estas tecnologías pueden aplicarse al hidrógeno, sino más bien cómo y cuándo deben integrarse en el desarrollo de los proyectos** para maximizar el valor a largo plazo.

Al mismo tiempo, **el hidrógeno ofrece una oportunidad única**. A diferencia de muchos sectores industriales maduros que deben adaptar las capacidades digitales a una infraestructura con décadas de antigüedad, **la mayoría de los proyectos de hidrógeno a gran escala se están diseñando actualmente como desarrollos totalmente nuevos**. Esto permite a los promotores de los proyectos sentar las bases digitales desde el principio, incorporando en el alcance inicial del proyecto arquitecturas de datos interoperables, plataformas de automatización, ciberseguridad integrada desde el diseño, gestión de la información de ingeniería y continuidad digital a lo largo del ciclo de vida. **Las decisiones tomadas durante las primeras fases de diseño influirán significativamente en la flexibilidad operativa futura, la escalabilidad, los costes de integración y el rendimiento de los activos.**

Un reto importante identificado a lo largo de este informe es que **las capacidades digitales suelen tratarse como mejoras opcionales del proyecto, en lugar de como facilitadores estratégicos del mismo**. En las condiciones actuales del mercado, muchos proyectos de hidrógeno se enfrentan a importantes restricciones de CAPEX, lo que genera presión para centrar las inversiones únicamente en los activos considerados esenciales para la puesta en marcha inicial. Como resultado, las capacidades digitales suelen reducirse, aplazarse o excluirse durante el desarrollo del proyecto. Si bien este enfoque puede reducir el gasto inicial, **la experiencia de los sectores maduros demuestra sistemáticamente que el coste de incorporar capacidades digitales a posteriori, tras la puesta en servicio, es sustancialmente mayor que el de integrarlas durante la fase de diseño.**

Y lo que es más importante, muchas capacidades digitales generan valor a lo largo de todo el ciclo de vida del activo, en lugar de limitarse a una única fase del proyecto. Los gemelos digitales, por ejemplo, pueden facilitar la evaluación técnico-económica durante la fase de Pre-FEED, la optimización del diseño durante la fase de FEED y la ingeniería de detalle, la puesta en marcha virtual durante la ejecución del proyecto, la optimización operativa y el mantenimiento predictivo durante el funcionamiento de la planta, así como futuras actividades de eliminación de cuellos de botella, ampliación o modernización. Se puede lograr una reutilización similar a lo largo del ciclo de vida mediante la gestión de la información de ingeniería, las plataformas de datos industriales, las arquitecturas de ciberseguridad y los marcos de trazabilidad digital.

La digitalización **debe respaldar y facilitar una perspectiva que abarque todo el ciclo de vida**, tanto de los activos existentes como de las nuevas infraestructuras, garantizando un análisis más preciso, un mejor rendimiento medioambiental y una menor huella de carbono.

Por consiguiente, **la digitalización no debe evaluarse únicamente como un coste inicial del proyecto, sino como una inversión a largo plazo cuyos beneficios se acumulan a lo largo del ciclo de vida del activo**. Varios casos de uso presentados en este informe ilustran cómo **las tecnologías digitales pueden influir en el dimensionamiento de los activos, la optimización de la producción, la planificación del mantenimiento, la flexibilidad operativa, el cumplimiento normativo y el rendimiento a lo largo del ciclo de vida, generando un valor que va mucho más allá de sus costes iniciales de implementación.**

El informe también muestra que **el riesgo asociado a la adopción de tecnología es, en general, menor de lo que a menudo se percibe**. Muchas de las capacidades evaluadas ya cuentan con el respaldo de implementaciones industriales contrastadas y una experiencia operativa documentada. Su madurez reduce la incertidumbre de la implementación, al tiempo que permite a las organizaciones beneficiarse de arquitecturas y metodologías consolidadas, así como de las lecciones aprendidas. **Por lo tanto, el reto para los proyectos de hidrógeno no es la disponibilidad de la tecnología, sino seleccionar las capacidades adecuadas, integrarlas de forma eficaz y adoptar estrategias de despliegue que se ajusten a los objetivos del proyecto y a los presupuestos disponibles.**

BRECHAS ESTRATÉGICAS EN EL DESPLIEGUE DEL HIDRÓGENO Y EL PAPEL DE LA DIGITALIZACIÓN

La evaluación realizada en este informe pone de relieve una serie de brechas estratégicas que van más allá del despliegue tecnológico e influyen directamente en la escalabilidad, la competitividad y la financiabilidad a largo plazo de los proyectos de hidrógeno. Si bien estas brechas representan posibles obstáculos para la industrialización, también identifican áreas en las que una inversión temprana en capacidades digitales puede generar un valor significativo.

Las bases digitales aún no siguen el ritmo del desarrollo de las infraestructuras

Muchos proyectos de hidrógeno avanzan más rápidamente en el desarrollo de la infraestructura física que en la implementación de las arquitecturas digitales que los respaldan. A medida que los proyectos crecen en escala, los entornos de datos fragmentados, los sistemas OT (Operational Technology) e IT (Information Technology) aislados, y la limitada interoperabilidad entre las partes interesadas pueden convertirse en barreras estructurales para el crecimiento. Establecer desde el principio entornos de datos comunes, arquitecturas interoperables y una gestión de la información a lo largo del ciclo de vida permite la optimización, la integración y la expansión futuras, al tiempo que se evitan costosas modificaciones posteriores en el ciclo de vida de los activos.

Conclusión clave: Las bases digitales deben recibir la misma importancia estratégica que las tuberías, los electrolizadores o los activos de almacenamiento, ya que permiten la escalabilidad futura de todo el ecosistema.

La digitalización mejora la viabilidad económica del proyecto, acelerando la obtención de valor

La digitalización también desempeña un papel directo en la mejora del caso de negocio de los proyectos de hidrógeno a lo largo de todo el ciclo de vida del activo. La integración temprana de capacidades digitales puede respaldar una evaluación técnico-económica más sólida, optimizar el dimensionamiento de los activos, reducir los riesgos de ingeniería y puesta en marcha, mejorar la eficiencia operativa, permitir el mantenimiento predictivo, reforzar el cumplimiento normativo y facilitar la futura expansión o reconversión. Estos beneficios se acumulan a lo largo de las fases del proyecto, mejorando la rentabilidad del ciclo de vida y reduciendo la incertidumbre para los promotores, operadores e inversores.

Conclusión clave: La digitalización debe evaluarse no solo como un coste de implementación, sino como una palanca de valor estratégico que mejora la financiabilidad y la competitividad a largo plazo de los proyectos de hidrógeno.

El sector debe acelerar la creación de conocimientos operativos

El hidrógeno se valora cada vez más no solo por la molécula en sí, sino también por sus atributos certificados, entre los que se incluyen el origen, la intensidad de carbono y el cumplimiento de los marcos de sostenibilidad. Esto transforma la trazabilidad de una mera actividad de cumplimiento normativo a una capacidad comercial.

Las plataformas de trazabilidad digital, los pasaportes digitales de productos y las arquitecturas de datos integradas proporcionan la base necesaria para respaldar los futuros sistemas de certificación, los requisitos de acceso al mercado y la confianza de los clientes.

Conclusión clave: Los futuros mercados del hidrógeno recompensarán cada vez más a las organizaciones que puedan demostrar la procedencia, la sostenibilidad y el cumplimiento normativo de sus productos a través de información digital fiable.

La gobernanza determina si la digitalización genera valor empresarial

El informe demuestra que la tecnología por sí sola no garantiza el éxito. Muchas iniciativas digitales no logran los resultados esperados porque la titularidad, las responsabilidades y los mecanismos de adopción no están claramente definidos.

Los sectores con madurez digital han demostrado sistemáticamente que una transformación exitosa requiere que la gobernanza digital se integre junto con la ingeniería, las operaciones y la gestión empresarial. Las organizaciones que establecen modelos de gobernanza desde el principio tienen más probabilidades de convertir las capacidades tecnológicas en resultados empresariales cuantificables.

Conclusión clave: La transformación digital es, en última instancia, un reto organizativo respaldado por la tecnología, no un proyecto tecnológico respaldado por la organización.

El hidrógeno tiene una oportunidad única para evitar las limitaciones heredadas de los sectores maduros

Muchas industrias maduras están realizando importantes inversiones para modernizar activos obsoletos e integrar capacidades digitales en infraestructuras que nunca se diseñaron para el funcionamiento digital. Los proyectos de hidrógeno cuentan con una ventaja única, ya que la mayoría de los activos aún se encuentran en fase de diseño y construcción.

Esto brinda la oportunidad de establecer la ciberseguridad desde el diseño, trazabilidad digital a lo largo del ciclo de vida, arquitecturas interoperables, sistemas de gestión de la información de ingeniería y entornos de gemelos digitales desde las primeras fases de desarrollo.

Conclusión clave: El hidrógeno puede convertirse en una de las primeras industrias energéticas concebidas como nativas digitales, en lugar de sufrir una transformación digital décadas después de su implantación.

Perspectiva estratégica

En conjunto, estas carencias sugieren que la competitividad futura de los proyectos de hidrógeno dependerá no solo del acceso a las energías renovables, la selección de tecnología o el despliegue de infraestructuras, sino también de la capacidad para establecer bases digitales escalables capaces de respaldar el diseño, la ingeniería, las operaciones, la certificación, la optimización y la futura expansión. Es probable que las organizaciones que aborden estas carencias de forma proactiva se beneficien de unos costes de ciclo de vida más bajos, una mayor flexibilidad operativa, un menor riesgo de implementación y una mayor capacidad de escalado a medida que maduren los mercados del hidrógeno.

Conclusión clave: Es esencial garantizar que las organizaciones de toda la cadena de valor del hidrógeno sean conscientes de que la digitalización es un factor clave para la competitividad futura del sector.

GUÍA DEL LECTOR

El presente informe tiene por objeto ayudar a los promotores de proyectos, operadores de infraestructuras, inversores, proveedores de tecnología, reguladores y usuarios industriales de hidrógeno a comprender cómo las tecnologías digitales pueden contribuir al desarrollo de la cadena de valor del hidrógeno. Sigue un flujo de trabajo progresivo que pasa de las tecnologías a los retos, a las lecciones aprendidas y, finalmente, a ejemplos prácticos de implementación.

El informe se ha estructurado para responder a cuatro preguntas clave:

1. **¿Qué tecnologías digitales son relevantes para los proyectos de hidrógeno?**
2. **¿Qué retos ayudan a abordar?**
3. **¿Qué lecciones se pueden extraer de los sectores con mayor madurez digital?**
4. **¿Cómo se han aplicado estas tecnologías en la práctica y en qué medida son transferibles al hidrógeno?**

Para responder a estas preguntas, el informe se estructura de la siguiente manera:

Capítulo 2 – Estado actual de las tecnologías digitales aplicables al hidrógeno

Este capítulo ofrece una visión general de las principales capacidades digitales relevantes para la infraestructura del hidrógeno. El objetivo es establecer una visión común de las tecnologías disponibles y su papel dentro del ecosistema del hidrógeno.

Capítulo 3 – Retos y barreras digitales en la cadena de valor del hidrógeno

Este capítulo identifica los principales retos que afectan a la digitalización a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno. Distingue entre retos transversales que afectan a todas las partes interesadas y retos específicos de los segmentos de upstream, midstream y downstream. El objetivo es definir los problemas operativos, técnicos y empresariales que requieren soluciones digitales.

Capítulo 4 – Lecciones aprendidas de sectores industriales con madurez digital

Este capítulo repasa las experiencias de sectores que ya han experimentado una transformación digital significativa. En lugar de centrarse en las características tecnológicas, recoge las lecciones de implementación, los factores de éxito y los errores comunes que deben evitarse al desplegar soluciones digitales a gran escala.

Capítulo 5 – Aplicación de soluciones digitales a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno

Este capítulo relaciona los retos y las tecnologías a través de casos de uso representativos y ejemplos industriales. Muestra cómo determinadas capacidades digitales pueden abordar los retos identificados en las secciones anteriores y evalúa su transferibilidad y madurez en el ámbito de las aplicaciones del hidrógeno. El capítulo establece un puente práctico entre el concepto y la implementación.

Capítulo 6 – Conclusiones y enfoque práctico de adopción

El capítulo final consolida las conclusiones en una evaluación de madurez, identifica las lagunas que aún persisten y presenta una hoja de ruta práctica para la adopción. Ofrece orientación sobre cómo las organizaciones pueden desarrollar progresivamente sus capacidades digitales, equilibrando al mismo tiempo la ambición tecnológica, los riesgos de los proyectos y las limitaciones de inversión.

1 INTRODUCCIÓN: CONCEPTOS DIGITALES CLAVE

El objetivo de este capítulo es establecer un vocabulario común para lectores de distintos ámbitos. Ofrece explicaciones concisas de las principales siglas, tecnologías, metodologías y términos específicos del sector utilizados a lo largo de este informe.

1.1 Acrónimos

Tabla1 . Acrónimos del informe

Acrónimo / Término	Nombre completo	Explicación para este informe
ACE	Error de control de área	Métrica de equilibrio del sistema eléctrico utilizada por los operadores de transporte para medir las desviaciones entre los intercambios programados y los reales, así como el comportamiento de la frecuencia.
aFRR	Reserva de restauración automática de frecuencia	Servicio auxiliar que requiere una respuesta automática de potencia activa para restablecer la frecuencia de la red; relevante cuando los electrolizadores participan en los mercados de equilibrio.
AHI	Índice de estado de los activos	Indicador compuesto que combina información sobre mantenimiento, inspección, funcionamiento y seguimiento del estado para evaluar el estado de los equipos y priorizar las intervenciones.
IA	Inteligencia artificial	Métodos computacionales utilizados para identificar patrones, predecir comportamientos, recomendar acciones y apoyar la toma de decisiones en los ámbitos del diseño, las operaciones, el mantenimiento y la optimización.
API	Interfaz de programación de aplicaciones	Interfaz utilizada para intercambiar datos entre sistemas de software; resulta relevante cuando las plataformas de trazabilidad conectan la generación renovable, los mercados, el funcionamiento de los electrolizadores y los sistemas comerciales.
BESS	Sistema de almacenamiento de energía en baterías	Activo de almacenamiento en baterías que puede coordinarse con energías renovables, cargas controlables y activos de producción de hidrógeno en contextos de gestión energética o de sistemas de gestión de recursos distribuidos (DERMS).
BIM	Building Information Modeling	Enfoque estructurado de modelización digital y gestión de la información que integra datos de ingeniería, tanto gráficos como no gráficos, a lo largo de las fases de diseño, construcción y explotación.
BPCS	Sistema básico de control de procesos	Capa central de automatización que controla el funcionamiento normal de los procesos; resulta relevante cuando se integra con los sistemas de seguridad en las plantas de producción de hidrógeno.
CAPEX	Gastos de capital	Inversión inicial necesaria para desarrollar o implementar el alcance físico y digital del proyecto. El informe destaca la presión del CAPEX como una de las razones por las que el alcance digital podría aplazarse.
CBM	Mantenimiento basado en el estado	Mantenimiento que se lleva a cabo en función del estado real de los equipos, en lugar de según intervalos fijos.
CCGT	Turbina de gas de ciclo combinado	Central eléctrica que utiliza ciclos de turbina de gas y de vapor; se menciona en relación con el uso de hidrógeno verde almacenado en una central eléctrica híbrida.
CCS	Captura y almacenamiento de carbono	Cadena tecnológica utilizada para capturar y almacenar las emisiones de carbono; se menciona en el contexto de la optimización de la red de hidrógeno azul y los escenarios de costes relacionados.

Acrónimo / Término	Nombre completo	Explicación para este informe
CDE	Entorno de datos común	Entorno controlado de gestión de la información en el que los participantes en el proyecto colaboran utilizando datos coherentes y regulados.
CertifHy	Sistema de certificación CertifHy	Esquema europeo de certificación voluntario reconocido como marco para certificar el origen y las características de sostenibilidad del hidrógeno renovable y con bajas emisiones de carbono.
CO₂	Dióxido de carbono	Gas de efecto invernadero utilizado como indicador clave de emisiones en las evaluaciones de descarbonización y sostenibilidad del hidrógeno.
DC	Corriente continua	Concepto de arquitectura eléctrica; la integración de un bus de DC de media tensión se identifica como un reto previo para los sistemas de generación renovable, almacenamiento y electrolizadores.
DER	Recurso energético distribuido	Activo de generación distribuida, almacenamiento o carga controlable que participa en la red o en sistemas de gestión energética.
DERM	Gestión de recursos energéticos distribuidos	Abreviatura utilizada en el informe para referirse a la capacidad de gestión de recursos energéticos distribuidos. En la práctica, para referirse a la plataforma se suele utilizar la forma plural o sistémica «DERMS».
DERMS	Sistema de gestión de recursos energéticos distribuidos	Plataforma digital utilizada para coordinar recursos energéticos distribuidos, tales como energías renovables, baterías, recarga de vehículos eléctricos, cargas controlables y, mediante adaptación, la flexibilidad de los electrolizadores y el almacenamiento de hidrógeno.
DCS	Sistema de control distribuido	Arquitectura de sistema de control utilizada para supervisar y controlar procesos industriales; resulta relevante cuando la coordinación de procesos integra múltiples sistemas de fabricantes de equipos originales (OEM).
EIM	Mercado de desequilibrios energéticos	Mecanismo de mercado al que se hace referencia en los casos de uso de DERMS para optimizar el despacho y la participación en el área de equilibrio.
EMS	Sistema de gestión energética	Sistema digital utilizado para optimizar la producción, el consumo y el almacenamiento de energía, así como la participación en el mercado y los servicios de apoyo a la red.
EMT	Transitorio electromagnético	Ámbito de modelización eléctrica de alta fidelidad utilizado para validar esquemas de protección, controles e interacciones dinámicas de la red.
ERP	Planificación de recursos empresariales	Sistemas de software empresarial utilizados para gestionar procesos y datos de negocio. Se considera una fuente de información empresarial integrada con las plataformas de datos de tecnología operativa (OT) e industriales.
ETCC	Extraer – Transformar – Contextualizar – Colaborar	Enfoque de gestión de datos propuesto en el informe como base para la integración de datos, la gobernanza y la digitalización a lo largo de toda la cadena de valor del hidrógeno.
FID	Decisión final de inversión	Momento decisivo en el que un proyecto pasa de la fase de desarrollo a la de ejecución; el análisis económico digital puede reducir la incertidumbre antes de la FID.
FCR	Reserva de contención de frecuencia	Servicio auxiliar que contribuye a la estabilización de la frecuencia; relevante para la participación de los electrolizadores en los mercados de equilibrio de la red y de flexibilidad.
FEED	Diseño de ingeniería inicial	Fase de ingeniería en la que se definen el alcance técnico del proyecto, las bases de diseño, la estimación de costes y la preparación para la ejecución antes del diseño detallado o la aprobación definitiva.

Acrónimo / Término	Nombre completo	Explicación para este informe
FuelEU	Reglamento FuelEU Maritime	Marco normativo europeo que promueve el uso de combustibles renovables y con bajas emisiones de carbono en el transporte marítimo.
Brecha / GAP	No se ha documentado ningún caso de uso representativo	Categoría de transferibilidad utilizada en el informe cuando no se ha documentado ningún caso de uso representativo, ni directo ni indirecto.
GeoAI	Inteligencia artificial geoespacial	Combinación de técnicas de SIG e inteligencia artificial utilizadas para analizar datos geoespaciales, identificar patrones y apoyar la toma de decisiones.
SIG	Sistema de Información Geográfica	Sistema de información espacial que integra datos con referencia geográfica para facilitar la selección de emplazamientos, el trazado de rutas, la gestión de riesgos y la toma de decisiones operativas.
GO	Garantía de origen	Instrumento utilizado para revelar el origen de la energía suministrada a los consumidores; en el caso del hidrógeno, puede proporcionar datos como la tecnología, la fuente, la ubicación y el periodo de producción.
GtCO₂	Gigatoneladas de dióxido de carbono	Unidad de masa utilizada para las emisiones de dióxido de carbono; el informe cita las emisiones anuales a escala de la demanda mundial de hidrógeno.
H₂	Hidrógeno	Símbolo químico utilizado a lo largo de todo el informe para referirse al hidrógeno como molécula, vector energético, producto y materia prima industrial.
HVAC	Calefacción, ventilación y aire acondicionado	Carga de los edificios integrada en los casos de uso del DERMS como parte de una flexibilidad y optimización más amplias de la demanda.
ICSS	Sistema Integrado de Control y Seguridad	Plataforma integrada que combina funciones de control y seguridad para supervisar la producción y el almacenamiento de hidrógeno, la parada de emergencia y la protección contra incendios y fugas de gas.
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional	Organismo internacional de normalización al que se hace referencia en normas de ciberseguridad industrial y seguridad funcional, como la IEC 62443 y la IEC 61511.
IEC 62443	Norma de seguridad para sistemas de automatización y control industrial	Marco normativo de referencia para una gestión sólida de la ciberseguridad en entornos OT industriales.
IEC 61511	Norma de seguridad funcional para sistemas instrumentados de seguridad	Norma de referencia para los requisitos de seguridad en el procesamiento, almacenamiento, compresión y manipulación del hidrógeno.
IIoT	Internet de las cosas industrial	Tecnologías de conectividad industrial utilizadas para recopilar datos operativos de dispositivos de campo y facilitar la supervisión, el análisis y la gestión de riesgos en todas las instalaciones relacionadas con el hidrógeno.
IoT	Internet de las cosas	Red de dispositivos y sensores conectados. En el informe, el término «IoT» se utiliza principalmente en el contexto de la conectividad industrial para la monitorización del hidrógeno y la visibilidad operativa.
ISA-95	Estándar de integración de	Concepto de arquitectura de referencia utilizado para describir la integración de la automatización por capas, desde la instrumentación de campo hasta los sistemas empresariales.

Acrónimo / Término	Nombre completo	Explicación para este informe
	sistemas de control empresarial	
ISCC	Certificación Internacional de Sostenibilidad y Carbono	Sistema de certificación voluntario reconocido por la Comisión Europea para demostrar el cumplimiento de los requisitos de sostenibilidad de los combustibles renovables, incluidas las RFNBO
ISO	Organización Internacional de Normalización	Organismo internacional de normalización al que se hace referencia en la información técnica y en las normas de calidad del hidrógeno como combustible.
ISO 14687	Norma de calidad del hidrógeno como combustible	Norma que define las características mínimas de calidad del hidrógeno como combustible para diversas aplicaciones.
ISO 19650	Norma de gestión de la información mediante BIM	Marco de gobernanza que respalda la gestión de la información, la normalización y las prácticas de colaboración BIM.
TI	Tecnología de la información	Capa de sistemas empresariales y de información. En el informe, las TI se tratan a menudo junto con las TO en lo que respecta a la integración, la ciberseguridad y la gobernanza de datos.
Kt	Kilotoneladas	Unidad equivalente a mil toneladas, utilizada en las cifras de capacidad de producción de hidrógeno, amoníaco y metanol.
LCOH	Coste nivelado del hidrógeno	Métrica económica utilizada para evaluar el coste de producción del hidrógeno a lo largo del ciclo de vida del activo, incluyendo el efecto de la utilización, los costes de la energía eléctrica, el CAPEX y el rendimiento operativo.
GNL	Gas natural licuado	Sector industrial consolidado que sirve de referencia para las prácticas digitales transferibles, entre las que se incluyen la gestión de activos y las operaciones de infraestructura.
ML	Aprendizaje automático	Técnica de IA utilizada para identificar patrones a partir de datos; se aplica en contextos de detección de fugas, mantenimiento predictivo y análisis operativo.
mFRR	Reserva manual de restablecimiento de frecuencia	Servicio auxiliar relacionado con el equilibrio del sistema eléctrico en el que pueden participar cargas controlables, como los electrolizadores.
Mt	Millones de toneladas	Unidad de masa utilizada en las estimaciones de la demanda de hidrógeno.
MW	Megavatios	Unidad de potencia utilizada para las cifras de capacidad de activos renovables, electrolizadores, almacenamiento e industriales.
GN	Gas natural	Combustible y sistema de infraestructura utilizados como referencia o en el contexto de la mezcla para las operaciones de los gasoductos de hidrógeno.
NIS2	Directiva sobre seguridad de las redes y la información (NIS2)	Directiva de la UE sobre ciberseguridad que se cita para reforzar la necesidad de una gobernanza sólida en materia de ciberseguridad para las infraestructuras críticas.
OEM	Fabricante de equipos originales	Proveedor de equipos. El informe destaca que la integración de múltiples fabricantes de equipos originales (OEM) supone un reto recurrente para los proyectos de hidrógeno.
O&M	Operación y mantenimiento	Fase del ciclo de vida en la que los activos se ponen en funcionamiento, se supervisan, se mantienen y se optimizan.

Acrónimo / Término	Nombre completo	Explicación para este informe
OPC UA	Arquitectura Unificada de Comunicaciones de Plataforma Abierta	Estándar abierto de comunicación industrial que permite la interoperabilidad entre múltiples proveedores, dispositivos y sistemas.
OPEX	Gastos de explotación	Coste operativo recurrente. El informe señala que considerar la digitalización como OPEX puede poner en riesgo la adopción de la tecnología digital.
OT	Tecnología operativa	Sistemas industriales utilizados para supervisar y controlar procesos físicos, activos y equipos de campo.
PEM	Membrana de intercambio de protones	Tecnología de electrolizadores mencionada en un caso práctico de una planta de producción de hidrógeno verde.
PLC	Controlador lógico programable	Controlador industrial utilizado para automatizar equipos y subsistemas; se menciona en relación con la supervisión e integración del conjunto de electrolizadores.
PPA	Acuerdo de compra de energía	Acuerdo comercial para el suministro de electricidad; relevante para la trazabilidad del RFNBO, ya que el abastecimiento de electricidad renovable debe estar vinculado a la producción de hidrógeno.
Pre-FEED	Diseño de ingeniería preliminar	Fase inicial de definición del proyecto que se utiliza para evaluar las opciones, la viabilidad, las bases digitales, los aspectos técnico-económicos y la arquitectura antes del FEED.
PV	Fotovoltaica	Generación solar fotovoltaica; a la que se hace referencia en casos de uso de producción, almacenamiento y repostaje de hidrógeno de múltiples fabricantes de equipos originales (OEM).
RED III	Directiva sobre energías renovables III	Marco normativo de la UE al que se hace referencia en relación con el hidrógeno renovable, el cumplimiento de la RFNBO, el acceso al mercado y los requisitos de sostenibilidad.
REDcert	Sistema de certificación REDcert	Sistema de certificación voluntario reconocido para demostrar el cumplimiento de los requisitos de sostenibilidad de las energías renovables y de los marcos de certificación de la RFNBO.
RFNBO	Combustible renovable de origen no biológico	Categoría normativa de la UE para el hidrógeno renovable y los combustibles derivados; su cumplimiento requiere pruebas auditables sobre el origen de la electricidad renovable, la adicionalidad y la correlación temporal y geográfica.
ROI	Rentabilidad de la inversión	Métrica utilizada para evaluar si las inversiones digitales generan un valor cuantificable en relación con su coste.
RTU	Unidad terminal remota	Dispositivo de control y supervisión a distancia utilizado en infraestructuras distribuidas, como oleoductos, redes de servicios públicos y activos remotos.
SCADA	Control de supervisión y adquisición de datos	Sistema de supervisión para la monitorización, el control y la adquisición de datos de activos distribuidos; fundamental para la visibilidad operativa de oleoductos, servicios públicos e instalaciones de hidrógeno.
SIL	Nivel de Integridad de Seguridad	Nivel de rendimiento en la reducción de riesgos para las funciones de seguridad, referenciado a través de sistemas de seguridad SIL3 en plantas de producción de hidrógeno.
SIS	Sistema instrumentado de seguridad	Sistema de seguridad independiente que ejecuta funciones de protección, como la parada de emergencia, cuando se producen condiciones peligrosas.

Acrónimo / Término	Nombre completo	Explicación para este informe
SLB	SLB	Etiqueta del colaborador o de la empresa que aparece a lo largo de todo el documento; se mantiene como referencia organizativa, no como acrónimo técnico.
SMR	Reformador de metano con vapor	Unidad de producción de hidrógeno a la que se hace referencia en las instalaciones de hidrógeno azul y en la optimización de las plantas de hidrógeno para toda la flota.
STATCOM	Compensador síncrono estático	Dispositivo de electrónica de potencia utilizado para el control de tensión en los puntos de conexión de alta tensión y el apoyo al sistema de transmisión.
VPP	Central eléctrica virtual	Conjunto coordinado de recursos distribuidos que operan como un activo energético agregado que participa en el mercado.

1.2 Términos clave

Tabla2. Términos clave del informe

Término	Contexto en este informe
Control avanzado de procesos	Metodología de control avanzada que optimiza los procesos industriales mediante la gestión simultánea de múltiples variables y restricciones para mejorar la eficiencia, la estabilidad y el rendimiento operativo.
Integridad de los activos	Capacidad para garantizar que los activos físicos funcionen de forma segura, fiable y de acuerdo con sus requisitos de diseño a lo largo de todo su ciclo de vida. Un objetivo recurrente de los sistemas de monitorización digital y de mantenimiento predictivo.
«Book-and-Claim»	Modelo de cadena de custodia en el que los atributos medioambientales se separan del producto físico y se comercializan a través de certificados.
Cadena de custodia	Método utilizado para vincular los atributos de producción certificados con el consumo final a lo largo de los traslados físicos o comerciales.
Contextualización	Proceso de enriquecimiento de los datos brutos con significado técnico, operativo y empresarial para que puedan interpretarse correctamente.
Sistema ciberfísico	Entorno integrado en el que los sistemas digitales interactúan directamente con los activos y procesos industriales físicos.
Ciberseguridad desde el diseño	Enfoque en el que los requisitos de ciberseguridad se incorporan durante la fase de diseño del proyecto, en lugar de añadirse tras la puesta en marcha.
Análisis de datos	Recopilación, integración, validación y análisis de datos para generar información operativa, económica o de ingeniería.
Estructura de datos	Arquitectura de datos integrada que conecta y contextualiza la información procedente de los sistemas OT e IT como base para el análisis, la inteligencia artificial, los gemelos digitales y la trazabilidad.
Gobernanza de datos	Marco organizativo que define la propiedad, la calidad, la seguridad, las normas y las responsabilidades en materia de datos para garantizar una información fiable y utilizable.
Lago de datos	Repositorio centralizado utilizado para almacenar grandes volúmenes de datos estructurados y no estructurados procedentes de múltiples fuentes operativas y empresariales.
Calidad de los datos	Grado en que la información es completa, precisa, coherente y fiable para la toma de decisiones operativas y empresariales.

Término	Contexto en este informe
Defensa en profundidad	Estrategia de ciberseguridad por capas que utiliza múltiples medidas de protección independientes para proteger los sistemas críticos.
Pasaporte digital del producto	Registro digital estructurado que recoge atributos certificados del producto, tales como origen, periodo de producción, intensidad de carbono, sistema de certificación y transferencias de custodia.
Base digital	Conjunto de arquitecturas digitales, modelos de información, mecanismos de gobernanza y capacidades de conectividad que permiten el desarrollo de futuras aplicaciones digitales y la escalabilidad.
Hilo digital	Flujo continuo de información que vincula la ingeniería, la construcción, la puesta en servicio, las operaciones, el mantenimiento y las modificaciones futuras a lo largo de todo el ciclo de vida del activo.
Trazabilidad digital	Seguimiento y verificación digitales de los flujos y atributos del hidrógeno, incluyendo el origen, las emisiones, el cumplimiento normativo y la cadena de custodia.
Gemelo digital	Representación digital de un activo, proceso o sistema físico que combina modelos y datos operativos para respaldar la toma de decisiones a lo largo de todo el ciclo de vida.
Downstream	Fase de la cadena de valor que engloba: distribución, repostaje, aplicaciones de uso final, consumo industrial, movilidad, aviación, usos marítimos y combustibles derivados.
Arquitectura basada en eventos	Arquitectura digital en la que los sistemas intercambian información y activan acciones en función de eventos operativos o empresariales que se producen en tiempo real.
Optimización a nivel de flota	Uso de análisis y apoyo a la toma de decisiones en múltiples activos o instalaciones similares, en lugar de en una sola planta.
Desarrollo desde cero	Proyecto desarrollado desde cero, en lugar de adaptarse a una infraestructura ya existente; el informe presenta el hidrógeno como una oportunidad para ser «nativo digital» desde el principio.
Interoperabilidad	Capacidad de los sistemas, dispositivos, aplicaciones y organizaciones para intercambiar y utilizar información de forma eficaz.
Balance de masa	Modelo de cadena de custodia en el que los productos certificados y no certificados pueden mezclarse físicamente, mientras que los atributos certificados se controlan mediante la contabilidad.
Midstream	Fase de la cadena de valor que engloba: transporte, almacenamiento, tuberías, redes troncales de hidrógeno y logística.
Control predictivo basado en modelos	Metodología de control avanzada que utiliza modelos matemáticos para predecir el comportamiento futuro de los procesos y optimizar las decisiones operativas.
Convergencia de tecnologías operativas	Integración progresiva de los entornos de tecnología operativa (OT) y de tecnología de la información (IT) para mejorar la visibilidad operativa, la automatización y la toma de decisiones.
Segregación física	Modelo de cadena de custodia en el que el hidrógeno certificado se mantiene físicamente separado del hidrógeno no certificado a lo largo de toda la cadena de valor.
Mantenimiento predictivo	Estrategia de mantenimiento que utiliza la monitorización del estado, el análisis de datos y la inteligencia artificial para predecir fallos antes de que se produzcan.
Análisis predictivo	Técnicas analíticas que utilizan datos históricos y en tiempo real para pronosticar acontecimientos futuros, el comportamiento de los equipos o los resultados operativos.
Mantenimiento prescriptivo	Enfoque avanzado de mantenimiento que predice fallos y recomienda medidas correctivas.

Término	Contexto en este informe
Modelo de datos semántico	Método estructurado que se utiliza para contextualizar e interpretar la información de forma coherente en todos los sistemas, aplicaciones y partes interesadas.
Simulación	Representación basada en modelos del comportamiento de un sistema que se utiliza para el diseño, la planificación, el análisis dinámico, la puesta en marcha virtual y la formación de los operadores.
Transferibilidad Media	Referencias no específicas del hidrógeno descritas explícitamente como directamente transferibles o análogas, que no requieren adaptación alguna o requieren una adaptación mínima.
Transferibilidad – Brecha / GAP	No se ha documentado ningún caso de uso representativo, ni directo ni indirecto.
Transferibilidad Alta	Referencias o casos de uso nativos del hidrógeno que incluyen aplicaciones específicas del hidrógeno.
Transferibilidad Baja	Las pruebas son limitadas o indirectas y requieren una adaptación significativa.
Upstream	
Puesta en marcha virtual	Pruebas y validación de sistemas de automatización, estrategias de control y procedimientos operativos mediante simulación antes de la puesta en marcha física.

2 ESTADO ACTUAL DE LAS TECNOLOGÍAS DIGITALES APLICABLES AL HIDRÓGENO

La digitalización se está convirtiendo en un factor clave para el despliegue técnico, operativo y económico de la cadena de valor del hidrógeno. Las infraestructuras de hidrógeno combinan la complejidad de los procesos, condiciones críticas para la seguridad, un fuerte acoplamiento con los sistemas eléctricos, entornos de datos fragmentados y un creciente escrutinio regulatorio.

En estas condiciones, las tecnologías digitales no son simplemente palancas de eficiencia, sino componentes estructurales que influyen en las decisiones de diseño, el rendimiento operativo, la integridad de los activos, el cumplimiento normativo y la escalabilidad. En la práctica, la digitalización de los sistemas de hidrógeno se articula en torno a la convergencia de varios ámbitos tecnológicos, entre los que se incluyen la ciberseguridad, el análisis de datos y la inteligencia artificial, la automatización y el control, la gestión de la información de ingeniería, la conectividad industrial, los gemelos digitales, la trazabilidad y la inteligencia geoespacial. En conjunto, estos ámbitos crean la base digital necesaria para pasar de activos aislados y operaciones reactivas a sistemas integrados, predictivos y cada vez más autónomos. En el contexto del hidrógeno, la relevancia de estas tecnologías se ve amplificada por las características de la propia cadena de valor.

La producción y uso del hidrógeno implican conversión electroquímica, termodinámica, transporte de fluidos, compresión, almacenamiento, garantía de calidad e interacción con infraestructuras externas, como las redes eléctricas, los centros de demanda industrial y los sistemas de transporte. Estas interacciones requieren datos de alta calidad, arquitecturas de control robustas, entornos de ingeniería interoperables y mecanismos que garanticen la continuidad entre el diseño, la construcción y la explotación.

En consecuencia, el estado del arte no viene definido por una única tecnología, sino por la integración estructurada de múltiples capacidades digitales en una arquitectura coherente que respalde todo el ciclo de vida de los activos y la infraestructura.

2.1 Ciberseguridad

La ciberseguridad es un requisito fundamental en las infraestructuras de hidrógeno, ya que estos activos se consideran cada vez más como infraestructuras energéticas críticas y porque los incidentes cibernéticos pueden traducirse directamente en consecuencias físicas. Las instalaciones de producción, almacenamiento, transporte y uso final de hidrógeno manejan gases inflamables a alta presión, interactúan con las redes eléctricas y de gas, y dependen cada vez más de sistemas de certificación y notificación gestionados digitalmente. En ese contexto, la ciberseguridad no puede entenderse como una cuestión secundaria de las tecnologías de la información. Debe tratarse como una restricción de diseño arquitectónico que determina la integración de los sistemas, la gestión de accesos, las operaciones remotas, los patrones de comunicación e incluso las decisiones de ingeniería de los equipos desde las primeras fases del proyecto.

En los sistemas de hidrógeno, el riesgo cibernético debe analizarse desde una perspectiva de seguridad de los procesos. La cuestión relevante no es solo si se puede robar información o interrumpir los servicios, sino si el compromiso de los sistemas digitales podría generar pérdida de control, pérdida de visibilidad, pérdida de protección o manipulación de las condiciones del proceso. Esto reviste especial importancia en entornos de electrólisis, donde el hidrógeno y el oxígeno coexisten en la misma planta y están separados por membranas o diafragmas. En estas condiciones, las desviaciones provocadas por ciberataques en la presión, el caudal, la temperatura, la corriente, la gestión de alarmas, la lógica de

parada o la monitorización de la concentración de gas pueden convertirse en causas desencadenantes o contribuyentes de escenarios de accidentes graves.

El sector del hidrógeno presenta vulnerabilidades que lo distinguen de entornos industriales más maduros. La tecnología es relativamente novedosa, el ecosistema de proveedores está fragmentado y muchos proyectos se desarrollan a partir de instalaciones piloto o de primeras implementaciones de su tipo (first-of-a-kind) que todavía no se benefician de una larga experiencia operativa en entornos sometidos a amenazas cibernéticas.

Además, la convergencia entre TI y TO suele ser mayor que en las plantas industriales convencionales, ya que las instalaciones de hidrógeno requieren una estrecha integración con las señales del mercado, los perfiles de generación renovable y las operaciones remotas. El estado actual de la ciberseguridad del hidrógeno se basa en principios de protección por capas. La defensa en profundidad, la segmentación estricta entre TI y TO, el acceso remoto seguro y la supervisión continua son elementos esenciales. Estas medidas garantizan que el acceso a los sistemas esté controlado, sea detectable y auditable, minimizando así la probabilidad de intervenciones no autorizadas. Los marcos normativos, como la Directiva NIS2 y la norma IEC 62443, refuerzan la necesidad de una gobernanza sólida en materia de ciberseguridad. El cumplimiento ya no es opcional, sino que forma parte integrante de los procesos de concesión de licencias, seguros y certificación.

En las operaciones prácticas con hidrógeno, la ciberseguridad también debe converger con la ingeniería de seguridad. El punto decisivo es que la ciberseguridad del hidrógeno no se limita a proteger los activos digitales, sino que consiste en preservar la seguridad operativa, la integridad de los procesos y la confianza en los procesos de hidrógeno gestionados digitalmente.



Figura1 . Infografía sobre la ciberseguridad de las infraestructuras de H₂

2.2 Análisis de datos e inteligencia artificial

El análisis de datos y la inteligencia artificial constituyen la capa de inteligencia de la cadena de valor del hidrógeno, lo que permite a las organizaciones transformar grandes volúmenes de datos heterogéneos en información útil. Su valor se extiende a lo largo de todo el ciclo de vida de los activos, desde el diseño y la planificación hasta la explotación y la optimización.

La base del análisis de datos reside en la integración de información procedente de múltiples fuentes, entre las que se incluyen sensores, sistemas de control, herramientas de ingeniería y plataformas empresariales. Estos datos deben estructurarse, validarse y contextualizarse para que puedan utilizarse en la toma de decisiones. Este proceso crea una base de datos unificada que permite la coherencia entre los ámbitos de la ingeniería, las operaciones y el negocio.

Una vez que los datos están debidamente estructurados, las aplicaciones analíticas pueden generar información predictiva y prescriptiva. El mantenimiento predictivo, la detección de anomalías y la supervisión del rendimiento se encuentran entre los casos de uso más relevantes en los sistemas de hidrógeno, donde la identificación temprana de desviaciones es fundamental para la seguridad y la fiabilidad. Además, el análisis permite optimizar los procesos de producción, especialmente en entornos caracterizados por aportaciones variables de energía renovable.

La inteligencia artificial potencia estas capacidades mediante la aplicación de técnicas avanzadas de modelización para identificar patrones y correlaciones que no resultan evidentes con los métodos tradicionales. Los modelos de aprendizaje automático pueden facilitar la previsión de la producción y la demanda de hidrógeno, la optimización de las condiciones de funcionamiento y la detección de anomalías complejas. Cuando se integran con los sistemas operativos, estas capacidades permiten una gestión de activos más ágil y adaptativa.

La eficacia de las aplicaciones de IA depende en gran medida de la calidad y la gestión de los datos. Dado que los sistemas de hidrógeno suelen encontrarse en una fase inicial de implantación, la disponibilidad de conjuntos de datos representativos puede ser limitada. Esto requiere un enfoque equilibrado que combine modelos basados en datos con el conocimiento experto de ingeniería, para garantizar la solidez y la interpretabilidad de las soluciones desarrolladas.

En general, el análisis de datos y la IA son factores clave para la toma de decisiones, ya que conectan las operaciones técnicas con los objetivos estratégicos y comerciales. Su impacto aumenta cuando se incorporan a los flujos de trabajo y se integran con otras tecnologías digitales, como los gemelos digitales y los sistemas de automatización.

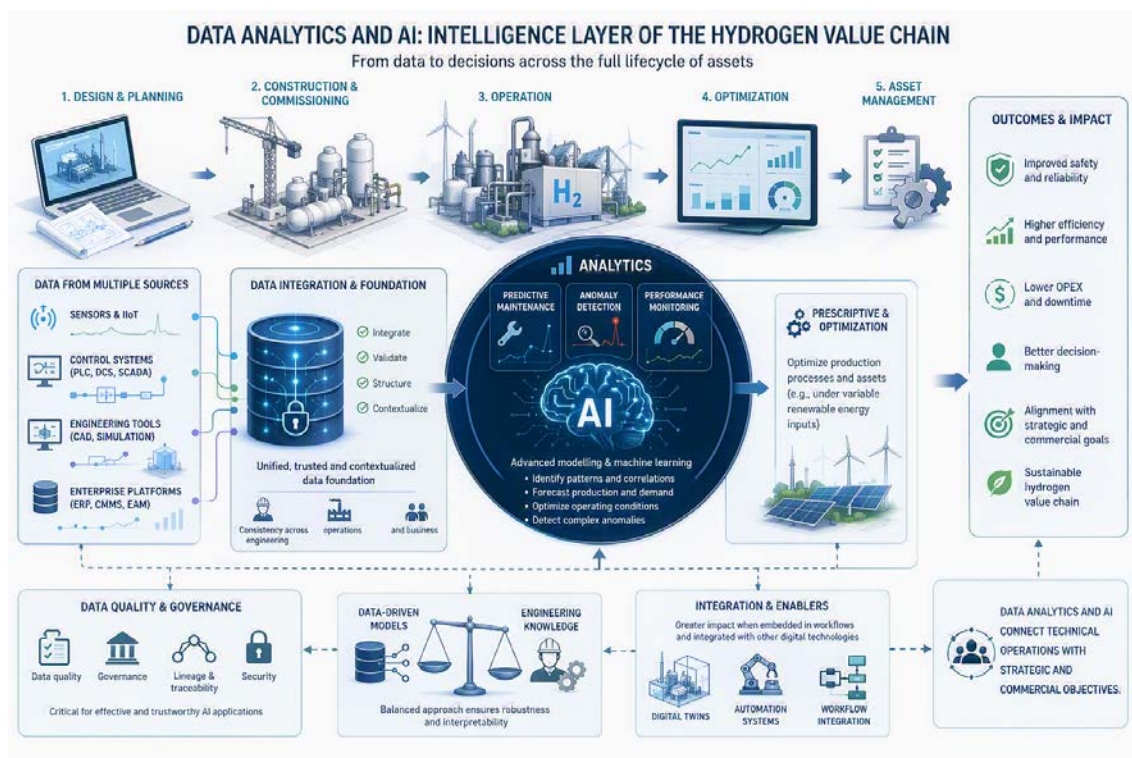


Figura2 . Infografía sobre el análisis de datos y la inteligencia artificial para infraestructuras de hidrógeno.

2.3 Sistemas de automatización y control

Los sistemas de automatización y control constituyen el núcleo operativo de las instalaciones de hidrógeno, ya que traducen el diseño de ingeniería en un comportamiento físico en tiempo real. Estos sistemas garantizan que los procesos funcionen dentro de unos límites seguros y eficientes, al tiempo que responden de forma dinámica a las condiciones cambiantes.

Las infraestructuras modernas de hidrógeno siguen arquitecturas de automatización por capas alineadas con los principios de la norma ISA-95. Estas arquitecturas integran la instrumentación de campo, los sistemas de control, las plataformas de supervisión y los sistemas empresariales en una jerarquía coherente. En paralelo, los sistemas instrumentados de seguridad funcionan de forma independiente para garantizar que las funciones de protección se mantengan operativas incluso en condiciones de riesgo o peligro.

Los avances tecnológicos en los sistemas de control incluyen la aplicación de técnicas avanzadas de control de procesos y de control predictivo basado en modelos. Estos enfoques permiten la optimización multivariable, lo que permite a los sistemas responder de manera eficiente a la variabilidad de las entradas, como el suministro de energía renovable. Las capas de optimización en tiempo real mejoran aún más el rendimiento al ajustar las estrategias de funcionamiento en función de las condiciones económicas y operativas.

La interoperabilidad es un requisito clave en los proyectos de hidrógeno, en los que es necesario integrar múltiples proveedores y sistemas modulares. Los estándares abiertos, como OPC UA, y las especificaciones complementarias emergentes para equipos de hidrógeno permiten una comunicación e integración coherentes entre los distintos sistemas. Estos estándares reducen la complejidad de la ingeniería y favorecen la escalabilidad.

Los sistemas de automatización son especialmente críticos en el ámbito del hidrógeno debido a la combinación de un funcionamiento dinámico y unos requisitos de seguridad muy estrictos. La interacción entre las unidades de electrólisis, los sistemas de alimentación eléctrica y la infraestructura de almacenamiento y distribución requiere estrategias de control coordinadas. Al mismo tiempo, los sistemas de seguridad deben estar estrechamente integrados, manteniendo al mismo tiempo su independencia respecto a las capas de control operativo.

Por lo tanto, la automatización no es solo un requisito técnico, sino un factor estratégico que permite la fiabilidad, la flexibilidad y la escalabilidad. Las decisiones de diseño iniciales en la arquitectura de automatización tienen implicaciones a largo plazo para el rendimiento del sistema y la preparación digital.

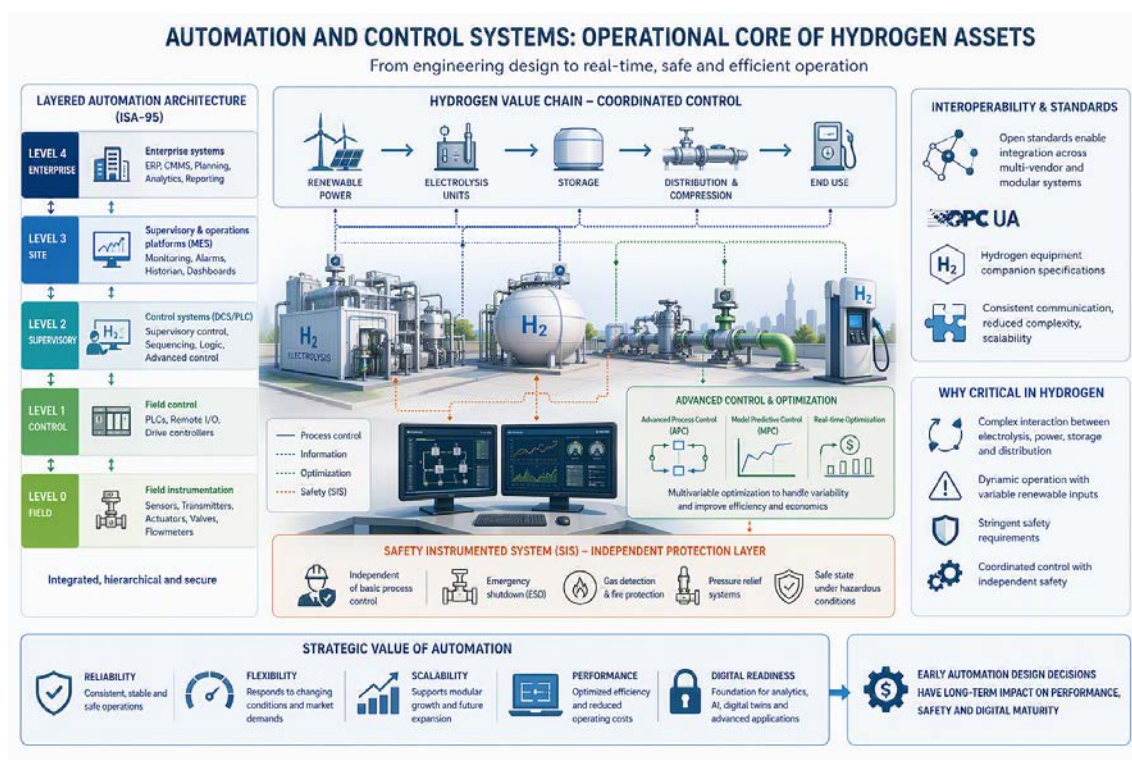


Figura3 . Infografía sobre los sistemas de automatización y control para infraestructuras de H2.

2.4 BIM y gestión de la información de ingeniería

Las tecnologías de modelización de la información para la construcción (BIM) y de gestión de la información de ingeniería constituyen la base estructural para gestionar proyectos complejos de infraestructuras de hidrógeno. Estas tecnologías permiten la integración de datos gráficos y no gráficos en entornos digitales unificados que facilitan la colaboración entre disciplinas y en todas las fases del ciclo de vida.

Uno de los principios fundamentales de los ecosistemas BIM es la existencia de un entorno centralizado de gestión de la información, que a menudo se implementa a través de entornos de datos comunes (Common Data Environments). Estas plataformas garantizan que todas las partes interesadas del proyecto trabajen con información coherente y controlada, lo que permite la gestión de versiones, la trazabilidad y el acceso seguro a los datos de ingeniería.

Las tecnologías BIM van más allá del modelado 3D al incorporar funcionalidades avanzadas de gestión de datos, automatización de flujos de trabajo e interoperabilidad. Los estándares abiertos permiten la integración con otros sistemas digitales, incluidas las plataformas de IoT, los sistemas ICSS, los sistemas SCADA y las aplicaciones empresariales. Gracias a esta capacidad de interoperabilidad, la información de ingeniería se mantiene actualizada, accesible y valiosa durante todas las fases del ciclo de vida del activo, desde su diseño y construcción hasta su operación y mantenimiento.

La gestión de la información de ingeniería se fundamenta igualmente en la estandarización. La definición de estructuras de datos, convenciones de nomenclatura y sistemas de clasificación homogéneos garantiza la coherencia entre proyectos y facilita el intercambio de información. En este contexto, estándares internacionales como la norma ISO 19650 establecen marcos de gobernanza para la gestión eficiente de la información a lo largo del ciclo de vida de los activos, promoviendo la calidad, trazabilidad y accesibilidad de los datos.

La integración del BIM con los sistemas operativos cobra cada vez más importancia en los proyectos de hidrógeno. La continuidad digital entre el diseño, la construcción y la explotación permite una gestión más eficiente de los activos y reduce la pérdida de información a lo largo de las distintas etapas del ciclo de vida. Esta capacidad es especialmente relevante en el sector del hidrógeno, donde los activos son complejos y requieren fiabilidad a largo plazo.

En general, el BIM y la gestión de la información de ingeniería constituyen la columna vertebral de la colaboración digital, garantizando que la información esté estructurada, sea accesible y coherente en todas las fases del desarrollo de las infraestructuras.

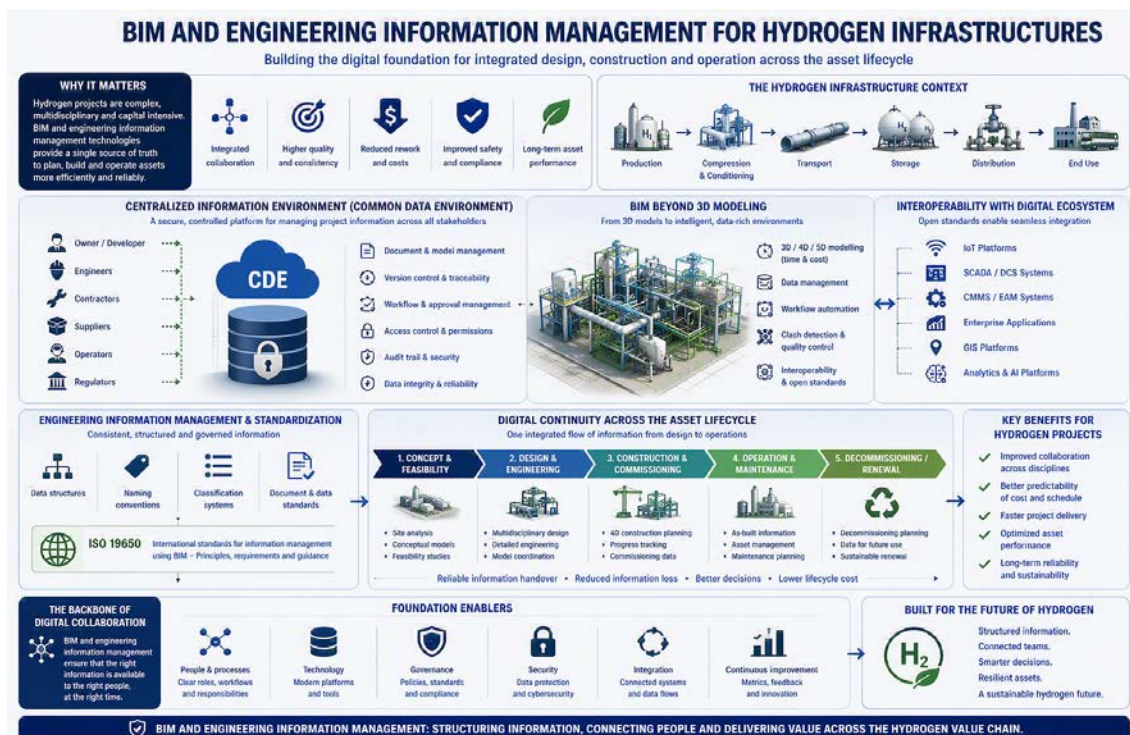


Figura4. BIM y gestión de la información de ingeniería para infraestructuras de H2.

2.5 Internet de las cosas y conectividad industrial

El sector del hidrógeno se sustenta en infraestructuras complejas y distribuidas geográficamente que abarcan plantas de producción, instalaciones de almacenamiento, redes de transporte y aplicaciones de uso final. En este contexto, el Internet de las cosas industrial (IIoT) y las tecnologías de conectividad se están convirtiendo en factores clave para garantizar operaciones con hidrógeno seguras, eficientes y escalables.

El hidrógeno plantea retos operativos únicos debido a sus propiedades físicas, entre las que se incluyen su bajo peso molecular, su alta difusividad y las exigentes condiciones de presión y temperatura asociadas a su producción, almacenamiento y transporte. Para hacer frente a estos retos es necesaria una visibilidad continua de los activos y los procesos mediante una amplia instrumentación y sistemas de monitorización conectados.

Las tecnologías del IIoT ofrecen la capacidad de recopilar datos operativos de una amplia gama de dispositivos de campo, generando información en tiempo real sobre variables de proceso como la presión, la temperatura, el caudal, la vibración, el consumo energético y el estado de los equipos. Estos datos constituyen la base para la optimización operativa, el mantenimiento predictivo y las estrategias de gestión de riesgos a lo largo de toda la cadena de valor del hidrógeno.

La conectividad industrial permite una integración perfecta entre los dispositivos de campo, los sistemas de control y las plataformas empresariales, lo que facilita el flujo de información entre los distintos niveles de la organización. Al eliminar los silos de datos y permitir la interoperabilidad entre sistemas, las organizaciones pueden lograr una mayor transparencia operativa y mejorar los procesos de toma de decisiones basándose en información fiable y oportuna.

En las redes de transporte y distribución de hidrógeno, las soluciones de monitorización conectadas mejoran la capacidad de detectar anomalías, identificar posibles fugas y supervisar la integridad de los activos a grandes distancias. La integración de datos procedentes de sensores, técnicas de analítica avanzada y modelos digitales facilita la transición desde estrategias de mantenimiento correctivo o reactivo hacia enfoques de mantenimiento basados en el estado real de los activos y en capacidades predictivas. Este cambio contribuye significativamente a incrementar los niveles de seguridad operativa, optimizar los costes de mantenimiento y mejorar la disponibilidad y fiabilidad de las infraestructuras.

En las instalaciones de producción, la conectividad digital favorece la optimización de los electrolizadores y otras unidades de proceso críticas, al permitir la supervisión continua del rendimiento y el análisis de la eficiencia energética. Dado que la electricidad representa una parte significativa de los costes de producción de hidrógeno, el acceso a datos operativos de alta calidad es fundamental para maximizar la eficiencia y reducir los costes generales de producción.

La importancia de la conectividad va más allá de los activos individuales. A medida que evolucionan los ecosistemas del hidrógeno, la integración de productores, operadores de transporte, instalaciones de almacenamiento y usuarios finales requerirá un intercambio de datos seguro y estandarizado. La conectividad digital se convierte, por tanto, en un factor clave para coordinar redes complejas de hidrógeno, mejorar la flexibilidad del sistema y apoyar la futura integración del mercado energético.

Además, la enorme cantidad de datos generados por los activos conectados sienta las bases para aplicaciones digitales avanzadas, como los gemelos digitales, la inteligencia artificial y los sistemas de gestión del rendimiento de los activos. Estas tecnologías tienen el potencial de acelerar la excelencia operativa, reducir los costes del ciclo de vida y mejorar la fiabilidad general de las infraestructuras de hidrógeno.

A medida que se desarrolle la economía del hidrógeno, el IIoT y la conectividad industrial desempeñarán un papel fundamental a la hora de transformar los datos en información útil, lo que permitirá operaciones más seguras, una mayor eficiencia y una gestión más sostenible de los activos de hidrógeno a lo largo de toda la cadena de valor.

La implantación de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) debe llevarse a cabo en consonancia con los requisitos de ciberseguridad y de gobernanza de los datos. Disponer de mecanismos de conectividad seguros y de una gestión robusta y fiable de la información resulta fundamental para asegurar que los beneficios derivados de la digitalización puedan aprovecharse plenamente, minimizando al mismo tiempo la introducción de nuevos riesgos operativos, tecnológicos o de seguridad..



Figura5 . Internet de las cosas y conectividad industrial para infraestructuras de H2.

2.6 Tecnologías de gemelos digitales y simulación

Las tecnologías de gemelos digitales y simulación proporcionan representaciones virtuales de los sistemas de hidrógeno, lo que permite el análisis, la predicción y la optimización a lo largo del ciclo de vida de los activos. Estas tecnologías integran modelos, datos y análisis en entornos coherentes que facilitan la toma de decisiones.

Los gemelos digitales se diferencian de los modelos de simulación tradicionales por incorporar datos en tiempo real o casi real procedentes de sistemas físicos. Esta integración permite la monitorización continua y el análisis dinámico, posibilitando que los operadores anticipen el comportamiento del sistema y evalúen escenarios alternativos.

Las capacidades de los gemelos digitales se sustentan en distintos enfoques de modelado. Los modelos fundamentados en principios físicos permiten representar con elevada fidelidad el comportamiento de los sistemas, resultando especialmente adecuados para aplicaciones de ingeniería compleja y entornos donde la seguridad es un requisito crítico. Complementariamente, los modelos basados en datos

aprovechan la información operativa disponible para identificar patrones, tendencias y relaciones que no siempre son evidentes mediante el análisis físico tradicional. La combinación de ambos enfoques da lugar a modelos híbridos, capaces de integrar el rigor de la modelización física con la flexibilidad y capacidad de aprendizaje de las técnicas basadas en datos, logrando un equilibrio óptimo entre precisión, adaptabilidad y eficiencia computacional.

Las tecnologías de simulación también operan en diferentes escalas temporales. Los modelos en estado estacionario sirven de apoyo al diseño y la planificación, mientras que los modelos dinámicos captan el comportamiento transitorio y la variabilidad operativa. La integración de estos modelos permite un análisis exhaustivo del rendimiento del sistema.

En los sistemas de hidrógeno, los gemelos digitales resultan especialmente valiosos debido a la complejidad de la cadena de valor y a la interacción entre múltiples fenómenos físicos. Facilitan la optimización del diseño, la planificación operativa, el análisis de riesgos y la toma de decisiones de inversión. Al reducir la incertidumbre y permitir el análisis de escenarios, los gemelos digitales contribuyen a una ejecución de los proyectos más sólida y eficiente.

La eficacia de los gemelos digitales está directamente condicionada por la calidad y fiabilidad de los modelos, el grado de integración de las fuentes de información y la gobernanza de datos establecidos. Asimismo, dado que las infraestructuras y sus condiciones operativas evolucionan con el tiempo, resulta imprescindible mantener estos sistemas permanentemente actualizados para garantizar que reflejen con precisión el estado real de los activos y su comportamiento operativo.

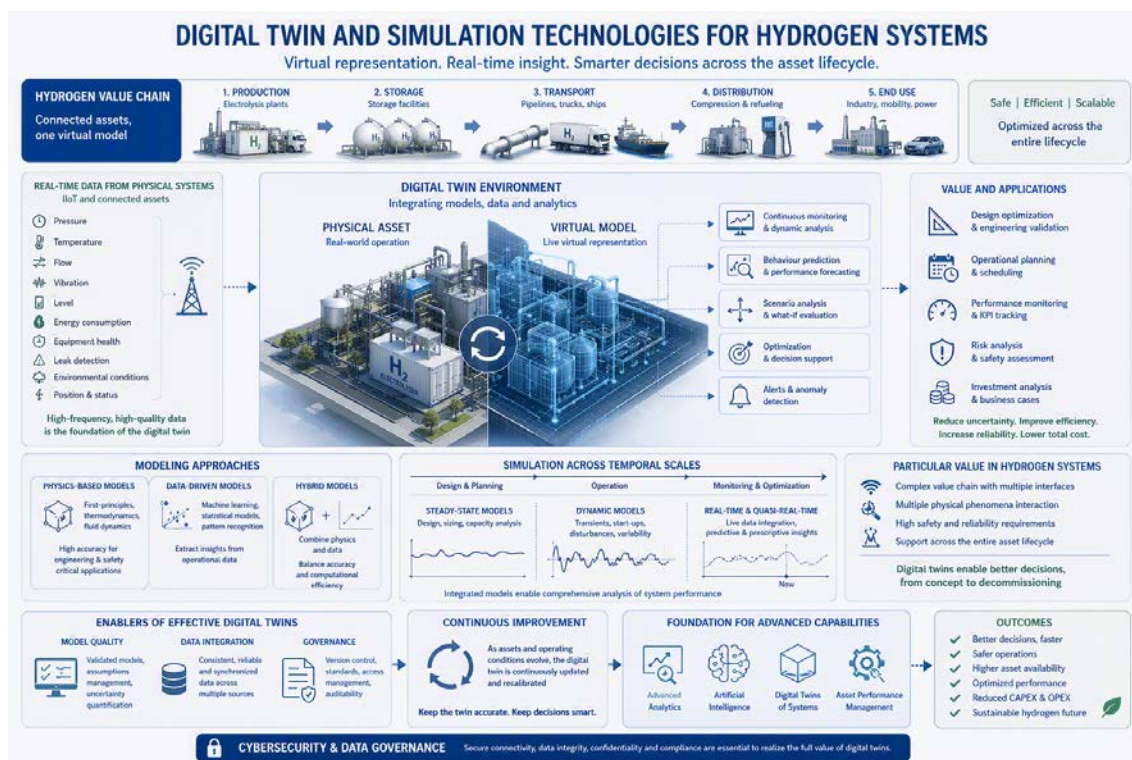


Figura6. Tecnologías de gemelos digitales y simulación para infraestructuras de H2.

2.7 Trazabilidad digital

Las tecnologías de trazabilidad digital permiten el seguimiento y la verificación del hidrógeno a lo largo de toda la cadena de valor, lo que garantiza la transparencia y el cumplimiento de los requisitos normativos y de certificación. En los mercados emergentes del hidrógeno, donde el origen y la sostenibilidad del hidrógeno son fundamentales, la trazabilidad se convierte en un factor clave de valor.

Estos sistemas se basan en la integración de datos procedentes de los procesos de producción, transporte y consumo, creando un registro digital de los flujos y las características del hidrógeno. Esto incluye información relacionada con las fuentes de energía, las emisiones, los métodos de producción y los parámetros operativos.

La trazabilidad es especialmente relevante para los sistemas de certificación, como el del hidrógeno renovable, en los que el cumplimiento depende de datos precisos y auditables. Por lo tanto, las plataformas digitales deben garantizar la integridad, la seguridad y la interoperabilidad de los datos entre las diferentes partes interesadas.

Las soluciones tecnológicas suelen combinar sistemas de gestión de datos con tecnologías de *blockchain* o tecnologías de registro distribuido para mejorar la transparencia y la confianza. Estos enfoques permiten verificar los datos sin necesidad de una autoridad central y facilitan los procesos de certificación transfronterizos.

Más allá del cumplimiento normativo, la trazabilidad también puede contribuir a la optimización operativa y a las estrategias comerciales, al proporcionar visibilidad de las cadenas de suministro y permitir una toma de decisiones más informada. A medida que los mercados del hidrógeno maduren, la trazabilidad digital será un factor clave para fomentar la confianza, la eficiencia y el desarrollo del mercado.

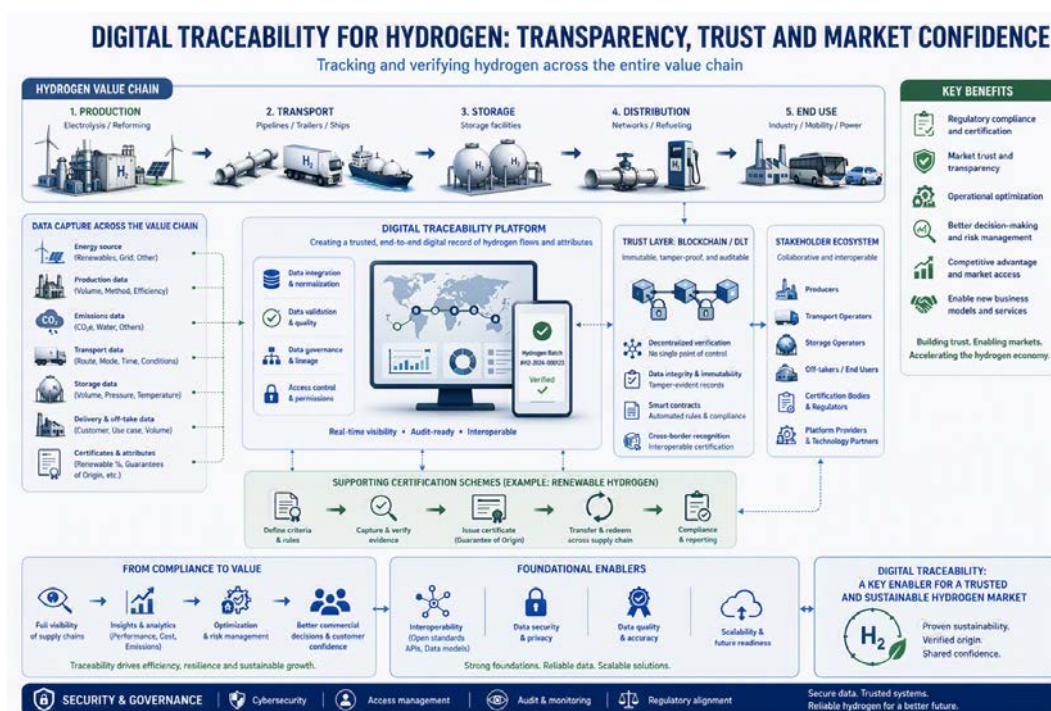


Figura7. Trazabilidad digital para infraestructuras de H₂.

2.8 SIG (Sistemas de Información Geográfica)

Los Sistemas de Información Geográfica aportan una dimensión espacial a la digitalización de la cadena de valor del hidrógeno, permitiendo la integración y el análisis de datos con referencia geográfica. Estos sistemas facilitan la planificación, la gestión de riesgos y la toma de decisiones operativas al conectar los activos, las infraestructuras y el contexto medioambiental.

El despliegue del hidrógeno tiene un fuerte componente territorial, que abarca los recursos renovables, las redes de infraestructura y la demanda industrial. Las plataformas SIG permiten analizar estos elementos dentro de un marco espacial unificado, lo que facilita la identificación de ubicaciones óptimas, rutas y prioridades de inversión.

En las fases de planificación, los SIG facilitan el análisis multicriterio al combinar datos técnicos, medioambientales y económicos. Esto permite tomar decisiones más fundamentadas en cuanto a la selección de emplazamientos, el trazado de infraestructuras y la priorización de proyectos. La integración de datos de observación de la Tierra mejora aún más la precisión y la relevancia de estos análisis.

Durante el desarrollo y la explotación de los proyectos, el SIG proporciona una visión continua y contextualizada del estado de los activos y de las condiciones del entorno. Estas plataformas desempeñan un papel fundamental en la monitorización operativa, la planificación del mantenimiento y la gestión de emergencias, al integrar la información de los activos físicos con sistemas digitales y datos procedentes de fuentes en tiempo real.

La integración del SIG con otras tecnologías, como el BIM, el IoT y los gemelos digitales, crea un ecosistema digital integral, en el que la dimensión espacial aporta una comprensión más profunda del comportamiento de las infraestructuras y sus interacciones con el entorno. Capacidades avanzadas como la GeolA amplían aún más estas funcionalidades al permitir el análisis automatizado y la detección de patrones.

Por lo tanto, el SIG no es solo una herramienta de visualización, sino una plataforma estratégica para gestionar la cadena de valor del hidrógeno. Su capacidad para conectar datos, territorio y procesos de toma de decisiones lo convierte en un factor clave para un despliegue eficiente y sostenible del hidrógeno.

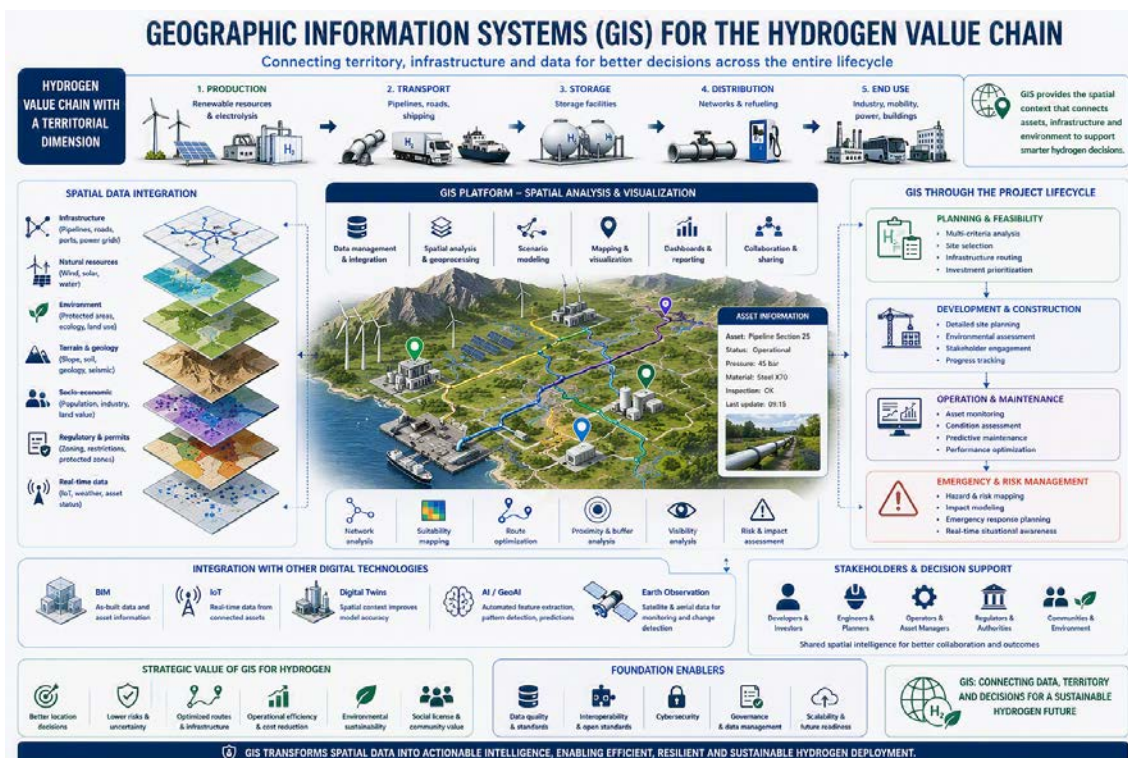


Figura8 . SIG para infraestructuras de H2.

3. RETOS Y BARRERAS DIGITALES EN LA CADENA DE VALOR DEL HIDRÓGENO

Se prevé que el hidrógeno desempeñe un papel clave en la descarbonización. La demanda mundial de hidrógeno alcanzó aproximadamente 100 Mt en 2024, pero menos del 1 % se produjo mediante procesos de bajas emisiones, lo que supuso unas emisiones anuales de alrededor de 1,8 GtCO₂.

Para alcanzar estos objetivos se necesitarán no solo nuevas infraestructuras de producción, transporte y almacenamiento, sino también capacidades digitales avanzadas. La digitalización se está convirtiendo en un factor fundamental de la economía del hidrógeno, más allá de una mera función de apoyo.

Este capítulo identifica los principales retos digitales a los que se enfrentan actualmente los proyectos de hidrógeno, destacando las similitudes y diferencias entre los segmentos de upstream, midstream, y downstream.

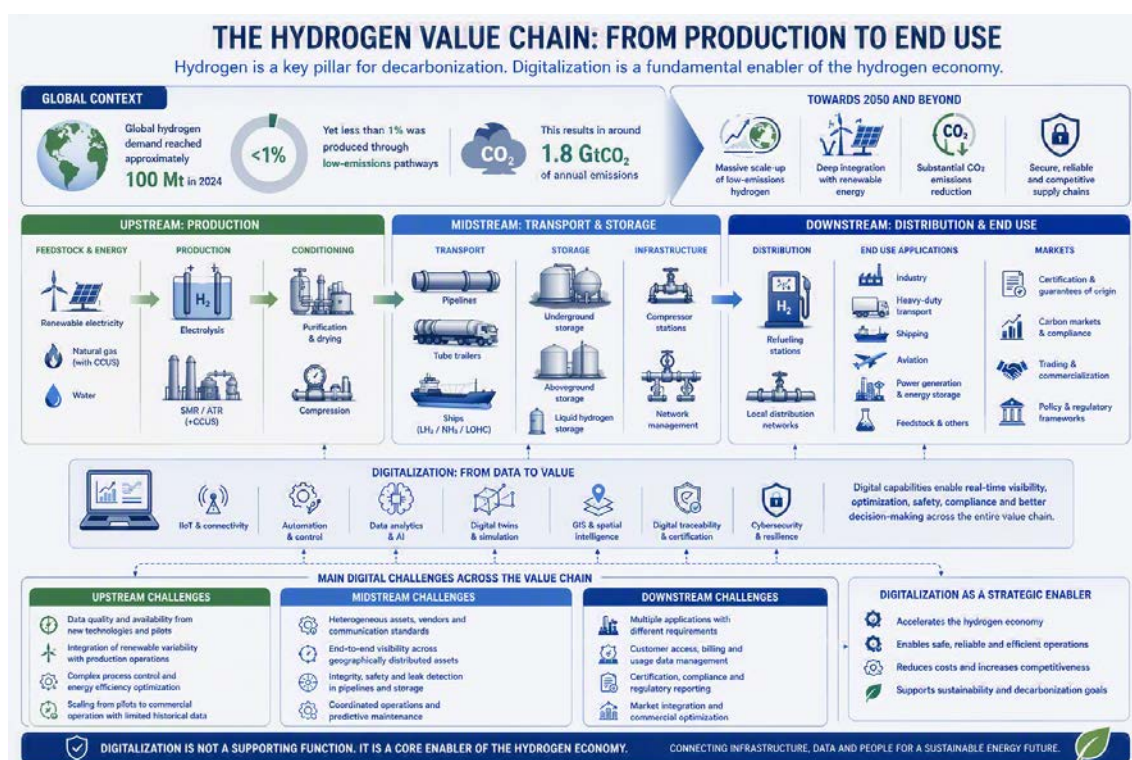


Figura9. Cadena de valor del hidrógeno.

3.1 Retos transversales (los que afectan a toda la cadena de valor)

Los retos que se describen a continuación afectan directamente a la capacidad de extraer, transformar, contextualizar y poner en práctica los datos a lo largo de toda la cadena de valor del hidrógeno. Tal y como se ha destacado en secciones anteriores, el valor de los análisis avanzados, la inteligencia artificial, los gemelos digitales y los sistemas de trazabilidad depende de la existencia de una base digital sólida, escalable y fiable.

Competitividad en los costes y optimización operativa

La principal barrera para el despliegue del hidrógeno renovable sigue siendo su coste en comparación con el hidrógeno de origen fósil. A diferencia de la producción convencional de hidrógeno, el hidrógeno renovable depende de la electricidad renovable variable y debe cumplir cada vez más con estrictos requisitos de correlación temporal entre el consumo de electricidad y la producción de hidrógeno para

poder ser considerado un «combustible renovable de origen no biológico» (RFNBO). Estas limitaciones, combinadas con la dinámica operativa y las restricciones de eficiencia de los electrolizadores, reducen los factores de utilización, limitan la producción de hidrógeno y aumentan el coste nivelado del hidrógeno (LCOH).

La intermitencia del hidrógeno renovable también afecta a los consumidores finales. Muchos procesos industriales que utilizan hidrógeno como materia prima funcionan de forma continua y tienen una flexibilidad limitada para adaptarse a un suministro variable de hidrógeno. Esto crea un nivel adicional de complejidad que solo puede mitigarse mediante el almacenamiento de hidrógeno, activos de producción sobredimensionados, estrategias de demanda flexibles o importaciones de electricidad de la red, cada una de las cuales introduce costes adicionales o puede comprometer las credenciales de sostenibilidad.

A medida que los proyectos pasan de instalaciones piloto a plantas de cientos de megavatios, la optimización operativa se convierte en un reto empresarial fundamental. La planificación de la producción, la previsión de la generación renovable, la gestión energética, la utilización del almacenamiento y los compromisos de suministro posteriores deben equilibrarse continuamente en condiciones operativas cambiantes. Por lo tanto, para lograr unos costes competitivos del hidrógeno se requieren capacidades avanzadas de previsión, optimización y apoyo digital a la toma de decisiones, capaces de integrar las restricciones técnicas, comerciales y normativas a lo largo de toda la cadena de valor.

Percepción de alto coste y escasa visibilidad del retorno de la inversión en soluciones digitales

Actualmente, las incertidumbres del mercado impulsan decisiones de inversión (CAPEX) centradas en alcances mínimos viables, en los que las soluciones digitales suelen considerarse inversiones no esenciales en una primera fase. Las consecuencias típicas de este enfoque son:

- La infraestructura y la arquitectura de OT/IT no se diseñan con una visión de escalabilidad; por lo tanto, las organizaciones pueden encontrarse ante los retos ya señalados para otros sectores energéticos: arquitectura compartimentada, aplicaciones costosas de mantener, aplicaciones difíciles de escalar, etc.
- La digitalización se gestiona como un gasto de explotación (OPEX); por lo tanto, la justificación y la implementación de los planes digitales están siempre en riesgo, lo que retrasa la adopción de la digitalización.

Ecosistema fragmentado

La cadena de valor del hidrógeno suele involucrar a múltiples partes interesadas, cada una de las cuales gestiona sus propios datos bajo marcos contractuales distintos, lo que da lugar a un ecosistema de datos fragmentado que limita la creación de valor. Los datos operativos y de activos críticos suelen estar aislados en silos dentro de las organizaciones. Esta fragmentación crea barreras para el análisis, los gemelos digitales, la gestión de activos y las aplicaciones de optimización. Los casos de uso de alto valor requieren no solo acceso a los datos, sino también una interpretación coherente entre activos, procesos y organizaciones. Muchos proyectos de hidrógeno siguen teniendo dificultades para conectar fuentes de datos heterogéneas y garantizar que los datos sean completos, validados, estandarizados y utilizables.

Los análisis recientes sobre el despliegue del hidrógeno verde hacen hincapié en que, para lograr la escalabilidad, son necesarios una regulación coordinada, el desarrollo de infraestructuras, la integración digital y unas normas armonizadas.

Disponibilidad limitada de datos operativos históricos y representativos

Muchos activos de hidrógeno, en particular las plantas de electrólisis a gran escala y las instalaciones de transformación de hidrógeno en derivados, se encuentran todavía en una fase temprana de implantación industrial. Las referencias existentes suelen ser instalaciones a escala piloto o proyectos que operan en el rango de las decenas de megavatios.

Avanzar hacia instalaciones de cientos de megavatios requiere alcanzar eficiencias de escala al tiempo que se utilizan tecnologías cuyo rendimiento a largo plazo, mecanismos de degradación, requisitos de mantenimiento y estrategias operativas óptimas aún no se comprenden del todo. La falta de conjuntos de datos representativos limita la comparación entre proyectos, reduce la aplicabilidad de los enfoques basados exclusivamente en datos y complica el desarrollo de modelos predictivos fiables.

Este reto es especialmente relevante para el mantenimiento predictivo, la optimización operativa y las aplicaciones de gemelos digitales, donde el rendimiento de los modelos depende tanto de la calidad de los datos como del historial de funcionamiento. La disponibilidad limitada de datos aumenta la incertidumbre y ralentiza la industrialización de soluciones digitales avanzadas.

Falta de implementaciones escalables de gemelos digitales

El despliegue de gemelos digitales es una prioridad estratégica, pero se ve limitado por la complejidad de los modelos y la falta de estandarización. De hecho, algunos proveedores de equipos OEM proponen sus propias aplicaciones de gemelos digitales, pero a menudo se basan en desarrollos internos (escalados a partir de plantas piloto) y no en herramientas comerciales. Esto plantea dos retos principales:

Mantenimiento de la aplicación: los gemelos digitales suelen ser específicos de cada proyecto, no son reutilizables o requieren un gran esfuerzo de ingeniería para su actualización, lo que limita su escalabilidad.

Los gemelos digitales, los motores de optimización y los modelos de IA deben evolucionar a medida que los activos pasan de las fases de diseño e ingeniería a la puesta en marcha y la explotación. A medida que se dispone de nuevos datos operativos, los modelos requieren una calibración, validación y adaptación continuas.

El reto no consiste simplemente en desarrollar modelos, sino en seleccionar el enfoque de modelización adecuado para cada caso de uso, manteniendo al mismo tiempo la coherencia, la transparencia y la trazabilidad a lo largo de todo el ciclo de vida del activo.

Trazabilidad digital y certificación

La trazabilidad del hidrógeno se está convirtiendo en un requisito fundamental para el desarrollo del mercado del hidrógeno. El valor comercial de la molécula depende cada vez más de sus atributos certificados: vía de producción, fuente de electricidad, intensidad de carbono, cumplimiento de los requisitos de sostenibilidad, cadena de custodia y asignación a los usos finales. Esto es especialmente relevante en Europa, donde el hidrógeno renovable debe cumplir con la normativa aplicable a los combustibles renovables de origen no biológico (RFNBO). La trazabilidad influye en el acceso al mercado, la elegibilidad para recibir incentivos y el cumplimiento de la Directiva sobre Energías Renovables III (RED III), factores que determinan la prima verde que pagan los compradores. Actualmente se están utilizando o desarrollando varios sistemas de trazabilidad para hacer frente a este reto.

- Las garantías de origen revelan el origen de la energía suministrada a los consumidores, como la tecnología de producción, la fuente de energía, la ubicación, el período de producción y, potencialmente, campos de datos voluntarios adicionales, incluidas las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, las garantías de origen no demuestran necesariamente el pleno cumplimiento normativo de los requisitos de sostenibilidad de los RFNBO.
- La certificación RFNBO está diseñada para demostrar que el hidrógeno renovable y los combustibles derivados del hidrógeno cumplen los requisitos de sostenibilidad y reducción de gases de efecto invernadero establecidos en la normativa de la UE. Esto incluye pruebas sobre el origen de la electricidad renovable, la adicionalidad, la correlación temporal, la correlación geográfica y la contabilización de emisiones. La certificación RFNBO requiere una base de datos más detallada y auditable que una simple Garantía de Origen.
- Modelos de cadena de custodia: Además del tipo de certificado, la trazabilidad también depende del modelo de cadena de custodia utilizado para vincular la producción certificada con el consumo final. Se pueden aplicar tres modelos diferentes en función del contexto específico:
 - **Segregación.** El hidrógeno certificado se separa físicamente del hidrógeno no certificado a lo largo de toda la cadena de valor.
 - **Balance de masa.** Los productos certificados y no certificados pueden mezclarse físicamente, pero los atributos certificados se controlan mediante un sistema de contabilidad.
 - **«Book-and-claim».** Los atributos medioambientales se separan del producto físico y se comercializan a través de certificados.

La trazabilidad del hidrógeno no puede lograrse únicamente mediante la presentación de informes manuales. La certificación RFNBO requiere la integración continua de múltiples fuentes de datos. Las plataformas digitales automatizan la adquisición de datos a través de API y protocolos de comunicación industrial, contextualizan la información en torno a los activos y los lotes de producción, y generan un hilo digital auditable que vincula el consumo de electricidad renovable con el producto final derivado del hidrógeno. En consecuencia, la función de los sistemas informáticos no es simplemente almacenar certificados, sino proporcionar la columna vertebral digital que conecta los flujos físicos de hidrógeno, las credenciales de sostenibilidad y las transacciones comerciales en un único ecosistema de confianza.

Riesgos de ciberseguridad en una infraestructura de hidrógeno cada vez más conectada

La transformación digital de las infraestructuras de hidrógeno conlleva la incorporación de sensores avanzados, capacidades de acceso remoto, conectividad cloud, sistemas de control automatizado, gemelos digitales y mecanismos de intercambio de información con actores externos. Esta evolución incrementa significativamente la superficie de exposición ciberfísica de las instalaciones, especialmente en escenarios donde convergen e interactúan de forma estrecha las tecnologías operacionales (OT) y las tecnologías de la información (IT).

En este contexto, los riesgos asociados a posibles incidentes de ciberseguridad trascienden el ámbito puramente digital, pudiendo afectar también a la operación física de los activos, los sistemas de seguridad, la integridad de los sistemas de medición y la confianza de las partes interesadas.

Como consecuencia, las infraestructuras de hidrógeno heredan los retos de ciberseguridad característicos de las infraestructuras energéticas críticas, incorporando además requisitos adicionales derivados de las particularidades de seguridad inherentes al hidrógeno y de la necesidad de consolidar la aceptación pública y la confianza en un mercado en pleno proceso de maduración.

Adopción organizativa y gobernanza digital

Por último, la digitalización únicamente aporta valor cuando la información y el conocimiento generados se incorporan de manera efectiva a los procesos de operación y a la toma de decisiones empresariales. En este sentido, el éxito de las iniciativas digitales no depende exclusivamente de la tecnología utilizada, sino también del grado de preparación de la organización, de la existencia de marcos de gobernanza adecuados y del nivel de aceptación y utilización por parte de los usuarios finales.

Por ello, las soluciones digitales deben concebirse y desarrollarse en estrecha colaboración con los equipos de ingeniería, operación y mantenimiento, asegurando su alineación con las responsabilidades funcionales y los objetivos estratégicos de la organización. La implicación temprana de los principales grupos de interés, el establecimiento de mecanismos de gobernanza claramente definidos y la definición de indicadores de valor medibles constituyen factores clave para reducir los riesgos asociados a la adopción, maximizar el retorno de la inversión y garantizar la sostenibilidad de las iniciativas digitales a largo plazo.

3.2 Retos del segmento upstream

Ampliación de la escala de fabricación de electrolizadores

A medida que el despliegue de los electrolizadores avanza hacia una producción a escala de gigavatios, la fabricación se convierte en un factor crítico para el éxito de dicho despliegue. En este contexto, las tecnologías digitales desempeñan un papel esencial al permitir procesos de fabricación altamente controlados, escalables y capaces de garantizar niveles consistentes de calidad, rendimiento y fiabilidad.

Uno de los retos fundamentales radica en mantener la homogeneidad de las prestaciones de los equipos a medida que aumentan significativamente los volúmenes de producción y la capacidad de fabricación. Para ello, la monitorización digital de los procesos productivos y el análisis avanzado de los parámetros de fabricación permiten asegurar una calidad uniforme de los stacks y de los distintos componentes, estandarizar los procesos entre diferentes líneas y centros de producción, y garantizar la trazabilidad completa de materiales y equipos durante todo su ciclo de vida. Asimismo, resulta especialmente importante el establecimiento de bucles de retroalimentación digitales entre las fases de fabricación y diseño.

Para los fabricantes de electrolizadores (OEM), la ventaja competitiva dependerá cada vez más no solo de la excelencia en ingeniería, sino también de la capacidad de integrar el diseño con capacidades de producción industrial basadas en la tecnología digital.

Construcción y fabricación de plantas de electrólisis

Durante la construcción y la puesta en marcha, el enfoque pasa del diseño del sistema a la integración del mismo, las pruebas y la preparación operativa. En esta fase, el éxito de un proyecto de hidrógeno depende no solo del rendimiento de cada equipo, sino también de la capacidad de integrar múltiples subsistemas suministrados por diferentes proveedores en una planta totalmente funcional y fiable.

La digitalización desempeña un papel clave a la hora de gestionar esta complejidad. Facilita la gestión de la configuración, el control de calidad y la integración de sistemas. Al mismo tiempo, las herramientas digitales facilitan la validación del rendimiento del sistema en condiciones reales de funcionamiento, lo que reduce los riesgos técnicos, acelera la entrega del proyecto y mejora la preparación operativa.

Interfaz con la red eléctrica

Los electrolizadores constituyen sistemas eléctricos de gran capacidad que actúan como elemento de conexión entre la red eléctrica y las infraestructuras industriales de producción de hidrógeno. Cuando alcanzan una potencia de decenas o cientos de MW, los electrolizadores dejan de ser simples cargas eléctricas que operan «detrás del contador», ya que su funcionamiento afecta a toda la red.

Esta evolución plantea nuevos retos relacionados con la estabilidad de la red, la integración de las energías renovables, la flexibilidad operativa, la participación en el mercado y la resiliencia del sistema.

Al mismo tiempo, una adecuada permite que los electrolizadores actúen como recursos activos para la red, contribuyendo a mejorar su fiabilidad, resiliencia y capacidad de integración de energías renovables. Algunas características clave de los electrolizadores en cuanto al apoyo a la red son:

- **Funcionamiento “Grid-Forming”:** Permite al electrolizador contribuir a la estabilización de la frecuencia en condiciones de baja inercia. Debe evolucionar en consonancia con los requisitos europeos.
- **Servicios de equilibrio y frecuencia:** Sistemas de control de potencia activa y herramientas en tiempo real que permiten al electrolizador participar en los mercados de FCR, aFRR y mFRR. Esto contribuye a la estabilidad de la red y facilita fuentes de ingresos adicionales. La participación en estos mercados requiere un control en tiempo real, previsiones precisas, optimización operativa y una gestión clara del equilibrio entre los ingresos por servicios de red y los compromisos de producción de hidrógeno.
- **Apoyo a la tensión:** El control coordinado de los sistemas de potencia del electrolizador y de los equipos de apoyo a la red, incluidas las tecnologías STATCOM cuando sea necesario, permite la regulación de la tensión en el punto de conexión de alta tensión, lo que facilita la integración de las energías renovables y refuerza la estabilidad del sistema de transmisión.
- **Arranque en negro y restauración del sistema:** Permite que el electrolizador funcione como una carga flexible durante los procesos de restauración del sistema eléctrico tras un apagón total o parcial, mejorando la resiliencia del sistema y acelerando la recuperación tras los cortes de suministro.
- **Arquitectura de CC:** Desarrollo de un bus de CC de media tensión que interconecte las unidades de electrolizadores, la generación renovable y los sistemas de almacenamiento para reducir las pérdidas y aumentar la eficiencia.
- **EMS impulsado por IA:** La aplicación de técnicas de inteligencia artificial en los sistemas de gestión energética permite optimizar la producción de hidrógeno, la participación en el mercado y los servicios de apoyo a la red.
- **Gemelo digital EMT y protección adaptativa:** Gemelo digital EMT para validar estrategias de control, esquemas de protección y escenarios operativos, reduciendo los riesgos técnicos y facilitando una puesta en marcha más fluida.

3.3 Retos del segmento midstream

El desarrollo del hidrógeno renovable como vector energético clave para la descarbonización plantea un reto estructural en el segmento midstream, la necesidad de diseñar y desplegar infraestructuras de transporte específicas o adaptadas para un gas cuyas propiedades físicas y químicas difieren significativamente de las del gas natural.

A diferencia de otras transiciones energéticas, el despliegue del hidrógeno requiere la construcción progresiva de una red que, en su mayor parte, carece de precedentes operativos a gran escala, lo que aumenta la incertidumbre tecnológica y de planificación.

Aunque hoy en día existen redes de hidrógeno en funcionamiento, estas son bastante diferentes de la red troncal de hidrógeno. Si bien los gasoductos de hidrógeno existentes llevan décadas en funcionamiento en la costa del Golfo de EE. UU. o en la región del Benelux, conectaban múltiples reformadores de metano al vapor (SMR) con un suministro estable y predecible a puntos de demanda cercanos, como refinerías, plantas de amoníaco y metanol u otras industrias químicas.

Las futuras redes troncales de hidrógeno, como la Red Troncal Europea de Hidrógeno (EHB), conectarán, en cambio, la producción renovable geográficamente dispersa en ubicaciones favorables con la demanda industrial en condiciones de funcionamiento muy variables.

Como resultado, el sistema de transporte se convierte en un activo de flexibilidad energética que absorbe el excedente de producción, amortigua los déficits temporales y redistribuye los flujos de hidrógeno desde centros de producción competitivos en términos de costes hacia grandes centros de consumo.

Aunque es esencial para una adopción competitiva del hidrógeno, la construcción y explotación de este tipo de infraestructuras plantea múltiples retos.

Diseño y dimensionamiento en un contexto de gran incertidumbre

El dimensionamiento de la red representa uno de los principales retos tecnológicos. A diferencia de la infraestructura madura del gas natural, las futuras redes troncales de hidrógeno deben diseñarse antes de que se hayan establecido plenamente los niveles de producción, demanda y utilización.

Los modelos avanzados de simulación hidráulica, la definición de escenarios y la optimización operativa de la red resultan esenciales para evaluar el dimensionamiento de los gasoductos, los requisitos de compresión, las presiones de funcionamiento y las estrategias de expansión futuras en escenarios de producción y demanda inciertos.

Este reto se ve agravado por la coexistencia progresiva de gasoductos de gas natural reconvertidos e infraestructuras de hidrógeno de nueva construcción, lo que exige una evaluación minuciosa de la compatibilidad de los materiales, la idoneidad de los equipos y la integración operativa.

Limitaciones técnicas del transporte de hidrógeno

El transporte de hidrógeno plantea retos de ingeniería adicionales en comparación con la infraestructura convencional de gas natural debido a las propiedades físicas específicas de la molécula. El hidrógeno gaseoso tiene un tercio de la densidad energética volumétrica del gas natural. Esto requiere caudales más elevados, afecta al dimensionamiento de las tuberías, aumenta los requisitos de energía de compresión y reduce los márgenes operativos para garantizar un funcionamiento estable y fiable de la red.

Estas condiciones de funcionamiento también tienen implicaciones para la integridad de la infraestructura. Los sistemas de transporte de hidrógeno son más sensibles a los transitorios de presión y a las cargas cíclicas, lo que aumenta la importancia de supervisar la integridad de los gasoductos, la compatibilidad de los materiales y las condiciones de funcionamiento a lo largo de todo el ciclo de vida de los activos. Las tecnologías digitales son esenciales para la simulación avanzada, la supervisión del estado y la gestión de activos, con el fin de garantizar un funcionamiento seguro y fiable.

Estrategia de infraestructura: reutilización frente a nueva construcción

Teniendo en cuenta las grandes inversiones necesarias para desplegar una infraestructura a escala europea como la EHB, es esencial determinar el equilibrio óptimo entre la reconversión de la infraestructura de gas natural existente y el desarrollo de gasoductos específicos para hidrógeno, con el fin de minimizar los costes futuros del sistema. La reconversión de los activos existentes ofrece una oportunidad significativa para reducir la inversión de capital y acelerar el despliegue de la red.

Sin embargo, la reconversión también plantea importantes retos técnicos y operativos en lo que respecta a la compatibilidad de los materiales, la adaptación o sustitución de los equipos y las limitaciones operativas. La complejidad aumenta cuando la mezcla de hidrógeno se utiliza como estrategia de transición.

Por el contrario, las nuevas infraestructuras de hidrógeno optimizan el trazado de las tuberías, los materiales, los sistemas de compresión y las condiciones de funcionamiento, lo que proporciona una mayor flexibilidad operativa y un control del rendimiento a largo plazo, a costa de una mayor inversión de capital.

La planificación de la infraestructura se convierte en un problema de optimización dinámica que solo puede abordarse mediante el uso de tecnologías digitales.

Requisitos de flexibilidad y almacenamiento

La producción intermitente de hidrógeno renovable crea un desajuste con la demanda industrial estable. La red troncal de hidrógeno proporciona la flexibilidad necesaria entre la producción y el consumo.

El diseño de la red debe tener en cuenta los requisitos mínimos de autonomía. La capacidad intrínseca de almacenamiento en línea del gasoducto, combinada con el almacenamiento subterráneo a gran escala y el despliegue de almacenamiento intermedio, permite el equilibrio intradiario y la flexibilidad operativa.

De este modo, la red evoluciona de un sistema de transporte puro a un sistema híbrido de transporte y almacenamiento en el que la previsión digital, la optimización del almacenamiento y la operación coordinada de la red contribuyen a la seguridad del suministro.

Digitalización del almacenamiento subterráneo de hidrógeno

El almacenamiento subterráneo de hidrógeno ya sea en cavernas de sal o en yacimientos de gas agotados, presenta una brecha estructural en materia de digitalización. Estos activos son extremadamente difíciles de instrumentar debido a su profundidad, a la limitada accesibilidad física y a las condiciones geológicas heterogéneas, lo que da lugar a datos operativos escasos, de baja frecuencia y difíciles de validar. Esta falta de información fiable sobre el subsuelo limita el despliegue de tecnologías digitales avanzadas: la detección continua, la monitorización en tiempo real, los modelos predictivos, los gemelos digitales y la optimización basada en la inteligencia artificial no pueden aplicarse con la misma madurez que en los activos en superficie, y a menudo dependen de conjuntos de datos sintéticos o incompletos.

La literatura técnica reciente destaca de forma sistemática varios cuellos de botella digitales: capacidades insuficientes de monitorización en profundidad, adquisición limitada de datos geomecánicos y geoquímicos, falta de marcos digitales interoperables que conecten el

comportamiento del subsuelo con la toma de decisiones operativas, y la ausencia de gemelos digitales dinámicos capaces de actualizar su estado con datos operativos reales. Además, los actuales sistemas de MRV siguen siendo en gran medida manuales o discontinuos, y las herramientas de evaluación de riesgos aún no están integradas en plataformas digitales unificadas.

Sin avances en estas áreas, y sin un compromiso organizativo explícito para incorporar los activos subterráneos en las estrategias de digitalización, esta parte fundamental y primordial de la infraestructura del hidrógeno seguirá quedando al margen de las hojas de ruta digitales corporativas. Mientras el almacenamiento subterráneo siga estando digitalmente subdesarrollado, la incertidumbre sobre la integridad de las cavernas, la evolución de la presión, el comportamiento del hidrógeno en medios porosos y las posibles vías de fuga persistirá como una barrera para el despliegue a gran escala.

Conclusión

El desarrollo de redes de transporte de hidrógeno representa un reto de ingeniería transversal, que combina la incertidumbre sobre la evolución de la producción y la demanda de hidrógeno, las propiedades físicas específicas del hidrógeno, las nuevas metodologías de diseño y explotación, y las decisiones de inversión en infraestructuras a largo plazo.

En este contexto, el segmento midstream se perfila como un factor clave para la economía del hidrógeno. Las capacidades digitales —entre las que se incluyen la simulación avanzada, los gemelos digitales, los SIG, la previsión y la optimización de redes— se vuelven esenciales para respaldar la planificación, la explotación y la futura expansión, permitiendo que la infraestructura evolucione al mismo ritmo que el mercado del hidrógeno, al tiempo que se minimizan los riesgos técnicos y las inversiones perdidas a lo largo del tiempo.

3.4 Retos del segmento downstream

A medida que los proyectos de hidrógeno pasan de escala de demostración a un despliegue comercial, la digitalización cobra cada vez más relevancia, ya que los activos del sector downstream deben operar en ubicaciones dispersas, con múltiples modelos de propiedad, equipos de alta presión, requisitos de calidad estrictos y sistemas de certificación emergentes. Sin embargo, las mismas características que hacen que la digitalización sea valiosa también crean barreras: limitada disponibilidad de datos históricos de operación y fallo, la fragmentación de la propiedad y gestión de la información entre distintos actores, la falta de estándares plenamente consolidados y la necesidad de integrar de manera coherente la gestión de la seguridad física de las infraestructuras con sistemas digitales fiables, trazables y seguros. Diversos estudios recientes coinciden en señalar que las infraestructuras de almacenamiento, transporte y distribución constituyen un requisito indispensable para el desarrollo de una economía del hidrógeno a gran escala. En este sentido, las restricciones asociadas a la disponibilidad, interoperabilidad y desarrollo de dichas infraestructuras continúan representando uno de los principales obstáculos para la consolidación comercial del sector.

Limitaciones en la disponibilidad, la calidad y la gestión de los datos

La infraestructura del hidrógeno se encuentra todavía en una fase inicial en comparación con la del gas natural, los productos petrolíferos o los gases industriales convencionales, por lo que los operadores disponen de menos conjuntos de datos a largo plazo que abarquen la degradación, los incidentes anómalos, el funcionamiento transitorio, el historial de mantenimiento y el envejecimiento de los activos. Esto es importante porque muchas aplicaciones digitales dependen de datos históricos representativos para identificar patrones, clasificar anomalías y respaldar la toma de decisiones basada en el riesgo. La dificultad se ve amplificada por el comportamiento físico específico del hidrógeno, que

incluye una alta difusividad, un tamaño molecular reducido, problemas de compatibilidad de materiales y la posibilidad de fugas a través de pequeños defectos o juntas. Estas características aumentan la importancia de la monitorización, pero también dificultan la creación de conjuntos de datos fiables, ya que los eventos relevantes pueden ser poco frecuentes, rápidos, localizados o difíciles de detectar de forma sistemática.

Digitalización de las operaciones críticas para la seguridad

Las infraestructuras de hidrógeno correspondientes a la fase downstream operan con sistemas de alta presión, que incorporan procesos de compresión, refrigeración, suministro y transferencia, en los que las desviaciones operativas del proceso pueden tener implicaciones para la seguridad.

Diversos análisis técnicos sobre estaciones de repostaje e infraestructuras de hidrógeno coinciden en señalar que la detección de fugas, el control de presión y temperatura, la correcta implantación de sistemas de parada de emergencia, la integridad de los sistemas de medición y el control de los subsistemas de almacenamiento y refrigeración constituyen elementos críticos para una operación segura. El reto radica en que los sistemas digitales no solo deben recopilar datos, sino también representar el estado de seguridad de las instalaciones con suficiente fiabilidad, trazabilidad y tiempo de respuesta. Esto resulta especialmente exigente en el caso del hidrógeno, ya que las fugas, la sobrepresión, la degradación de los materiales y los riesgos de ignición pueden dar lugar a secuencias de fallo altamente interdependientes.

Robustez limitada de los modelos predictivos para la evaluación de riesgos en fases posteriores

El uso de análisis avanzados, sistemas de seguridad basados en IA y gemelos digitales es un tema cada vez más debatido en el ámbito de las infraestructuras de hidrógeno, pero la bibliografía reciente sigue señalando lagunas en la modelización predictiva, la evaluación de la durabilidad de los materiales, el análisis de errores humanos y la madurez de los marcos de seguridad basados en IA. Esta barrera existe porque las herramientas digitales predictivas requieren relaciones validadas entre las variables medidas, el estado de los equipos, el contexto operativo y las consecuencias del riesgo. En los sistemas de hidrógeno, estas relaciones se ven afectadas por los ciclos de presión, los transitorios de temperatura, los mecanismos de fragilización, la dispersión de las fugas, las condiciones de ventilación y los procedimientos operativos. Como resultado, los modelos digitales posteriores pueden enfrentarse a incertidumbres a la hora de extrapolar más allá de los limitados datos operativos disponibles de las primeras implantaciones.

Control de la calidad del hidrógeno y trazabilidad de los datos

El hidrógeno suministrado a los usuarios finales, especialmente en aplicaciones relacionadas con las pilas de combustible, debe cumplir estrictas especificaciones de calidad del combustible, ya que las trazas de contaminantes pueden afectar al rendimiento, la durabilidad y la seguridad. La norma ISO 14687 define las características mínimas de calidad del hidrógeno como combustible para varias aplicaciones, mientras que los estudios científicos muestran que el análisis de impurezas sigue siendo complejo, costoso y técnicamente exigente.

Los desafíos asociados a la calidad del hidrógeno trascienden el ámbito puramente analítico. La gestión digital de la información de calidad requiere la implementación de procesos capaces de garantizar la correcta adquisición, validación, trazabilidad y vinculación de los datos con lotes de producción o eventos de suministro específicos. Asimismo, dicha información debe poder intercambiarse de forma segura y fiable entre productores, operadores, distribuidores, clientes y organismos reguladores.

La monitorización continua o casi en tiempo real de la calidad sigue viéndose limitada por el hecho de que no existen sensores disponibles en el mercado para todos los contaminantes enumerados en las normas de calidad del combustible y de que sigue siendo necesario desarrollar protocolos de ensayo estandarizados.

En consecuencia, las principales barreras para la digitalización en las etapas downstream de la cadena de valor del hidrógeno no radican exclusivamente en la disponibilidad de tecnologías digitales, sino en la compleja interacción entre las características físico-químicas del hidrógeno, las exigencias de seguridad operativa, el grado de madurez de las infraestructuras, los requisitos de calidad del producto, la evolución de los sistemas de certificación y la fragmentación de los agentes participantes.

Por ello, aunque la digitalización constituye un habilitador clave para la escalabilidad y eficiencia de las infraestructuras de hidrógeno, su despliegue efectivo continúa condicionado por desafíos relacionados con la disponibilidad de los datos, la interoperabilidad entre sistemas, la incertidumbre de los modelos, y las limitaciones actuales de las capacidades metrológicas.

Figura10 resume las principales áreas de desafío identificadas en el capítulo 3 y las traduce en las necesidades digitales que deben abordarse a lo largo de toda la cadena de valor del hidrógeno, incluyendo economía y optimización, bases de datos, modelización e inteligencia, operaciones y seguridad, confianza y cumplimiento normativo, y planificación de infraestructuras. El capítulo 3 define estos retos transversales y específicos de cada segmento como la base de referencia de los problemas para la posterior cartografía de las capacidades digitales y los casos de uso.

Economics & optimisation Digital need Forecasting, scenario analysis, operational optimisation, investment support Challenge drivers Cost competitiveness, LCOH pressure, ROI visibility	Data foundations Digital need OT/IT integration, data governance, contextualisation, interoperability Challenge drivers Fragmented ecosystem, limited data quality, multi-stakeholder data exchange	Models & intelligence Digital need Digital twins, AI, predictive models, model governance Challenge drivers Limited historical data, model robustness, scalable twin lifecycle
Operations & safety Digital need Automation, control, monitoring, safety logic, pipeline integrity Challenge drivers Dynamic operation, safety-critical assets, leaks, pressure and quality control	Trust, compliance & resilience Digital need Cybersecurity, digital traceability, auditability, governance Challenge drivers Cyber-physical exposure, certification, provenance, chain of custody	Infrastructure planning Digital need GIS, BIM, engineering information, lifecycle data continuity Challenge drivers Transport network design, repurposing/new-build decisions, territorial constraints

Figura10: Mapa de retos digitales para la cadena de valor del hidrógeno.

4 LECCIONES APRENDIDAS DE LOS SECTORES INDUSTRIALES CON MADUREZ DIGITAL

Los sectores industriales con madurez digital, como el del petróleo y el gas, el GNL, los sistemas eléctricos y las industrias de procesos, ofrecen modelos contrastados de cómo las tecnologías digitales crean valor a gran escala. En definitiva, el éxito de la digitalización depende menos de las tecnologías individuales y más de cómo se implementan, integran y gestionan.

Las siguientes lecciones sintetizan tanto las prácticas que han demostrado ser eficaces como los enfoques que han resultado insuficientes, y son directamente aplicables a la cadena de valor del hidrógeno, siempre que se realicen las adaptaciones necesarias para tener en cuenta las limitaciones específicas del hidrógeno (por ejemplo, la escasez de datos, los límites de seguridad o la evolución de las normas).

4.1 Integración y gobernanza de datos

Factores de éxito:

- Establecer desde el principio una base de datos unificada, integrando los datos de OT e IT en un entorno coherente.
- Definir modelos de datos estándar y jerarquías de activos.
- Implementar flujos de datos automatizados conectados a los sistemas de origen.
- Incorporar una gobernanza de datos clara (propiedad, calidad, normas).

Errores comunes que hay que evitar:

- Considerar la integración de datos como una actividad secundaria.
- Permitir entornos de datos fragmentados y aislados.
- Basarse en datos no estandarizados o mal contextualizados.
- Subestimar el esfuerzo necesario para la armonización de los datos.

Implicaciones para el hidrógeno:

- Dar prioridad a la base de datos (Extraer-Transformar-Contextualizar-Colaborar) como requisito previo.

4.2 Análisis de datos e inteligencia artificial

Factores de éxito:

- Diseñar el análisis de datos en torno a los flujos de trabajo para la toma de decisiones operativas (detectar → diagnosticar → decidir → actuar → aprender).
- Integrar el análisis de datos en los procesos de mantenimiento, operaciones y planificación.
- Combinar el conocimiento del ámbito de aplicación con los modelos analíticos.

Errores comunes que hay que evitar:

- Implementar paneles de control sin integrarlos en la toma de decisiones.
- Considerar la IA como un mero ejercicio tecnológico.
- Desarrollar modelos desconectados de las operaciones.

Implicaciones para el hidrógeno:

- Centrarse en la puesta en práctica de los conocimientos obtenidos.

4.3 Gemelos digitales y simulación

Factores de éxito:

- Seleccionar enfoques de modelización en función del caso de uso y la fase del ciclo de vida.
- Mantener la coherencia entre los modelos y los datos operativos.

- Garantizar la trazabilidad y la transparencia de los modelos.

Errores comunes que hay que evitar:

- Dependencia en exceso de modelos basados exclusivamente en datos.
- Considerar los gemelos digitales como entregables estáticos.
- Falta de responsabilidad y facilidad de mantenimiento de los modelos.

Implicaciones para el hidrógeno:

- Adoptar estrategias de modelización híbridas con gobernanza del ciclo de vida.

4.4 Sistemas de automatización y control

Factores de éxito:

- Diseñar una arquitectura de automatización teniendo en cuenta la escalabilidad.
- Combinar de forma coherente las capas de control y optimización.
- Alinear los sistemas de control con las herramientas analíticas y los flujos de trabajo.

Errores comunes que hay que evitar:

- Tratar la automatización como una infraestructura aislada.
- Ignorar las necesidades futuras en materia de datos y análisis.
- Integración tardía entre las capas de control y las digitales.

Implicaciones para el hidrógeno:

- Asegurarse de que el diseño inicial de la automatización permita la preparación digital a largo plazo.

4.5 Conectividad industrial e integración OT/IT

Factores de éxito:

- Implementar capas de conectividad estandarizadas.
- Garantizar un intercambio de datos coherente entre los distintos sistemas.
- Facilitar la visibilidad de extremo a extremo.

Errores comunes que hay que evitar:

- Mantener la separación entre OT e IT.
- Crear integraciones punto a punto.
- Falta de alineación con los sistemas de la empresa.

Implicaciones para el hidrógeno:

- Desarrollar patrones de integración de extremo a extremo a lo largo de toda la cadena de valor.

4.6 Mantenimiento predictivo y gestión de activos

Factores de éxito:

- Desarrollar enfoques basados en el estado real y predictivos.
- Combinar datos de inspección, operativos y de mantenimiento.
- Asegurarse de que los modelos sean transparentes y fáciles de mantener.

Errores comunes que hay que evitar:

- Confiar únicamente el mantenimiento en programas periódicos.
- Falta de conexión con los flujos de trabajo operativos.
- Tratar la gestión de activos como algo aislado.

Implicaciones para el hidrógeno:

- Crear modelos de datos de activos estructurados desde el principio.

4.7 Interoperabilidad y estandarización

Factores de éxito:

- Adoptar modelos de datos y arquitecturas estandarizados.
- Diseñar soluciones modulares y reutilizables.
- Garantizar la interoperabilidad entre sistemas y proveedores.

Errores comunes que hay que evitar:

- Desarrollar soluciones específicas para cada proyecto que no sean reutilizables.
- Utilizar interfaces propietarias que limitan la escalabilidad.
- Ignorar la interoperabilidad en la fase de diseño.

Implicaciones para el hidrógeno:

- Hacer de la interoperabilidad un principio de diseño desde el principio.

4.8 Adopción organizativa y gobernanza digital

Factores de éxito:

- Diseñar soluciones juntamente con los equipos de ingeniería y operaciones.
- Alinear las iniciativas digitales con los flujos de trabajo.
- Establecer la gobernanza y las responsabilidades.

Errores comunes que hay que evitar:

- Desarrollar soluciones de forma aislada.
- Falta de alineación con las prácticas operativas.
- Falta de responsabilidad claramente definida.

Implicaciones para el hidrógeno:

- Integrar la digitalización en los procesos organizativos.

4.9 Escalabilidad y enfoque de implementación

Factores de éxito:

- Empezar con casos de uso específicos, pero diseñar pensando en la escalabilidad.
- Utilizar arquitecturas modulares.
- Incorporar el desarrollo iterativo.

Errores comunes que hay que evitar:

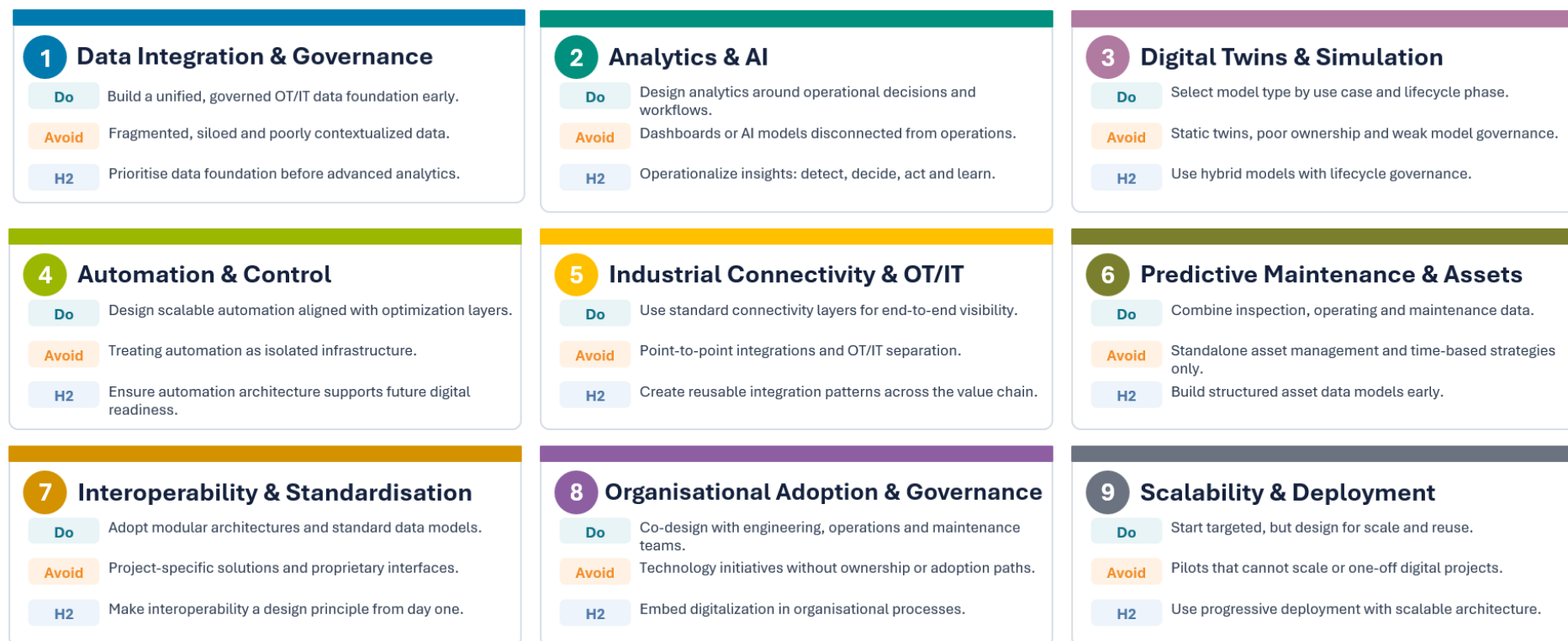
- Desarrollar proyectos piloto que no se pueden ampliar.
- Falta de estandarización.
- Considerar la digitalización como un proyecto puntual.

Implicaciones para el hidrógeno:

- Combinar un despliegue progresivo con una arquitectura escalable.

Figura11 resume las principales lecciones aprendidas en materia de implementación en los ámbitos de la gobernanza de datos, el análisis de datos, los gemelos digitales, la automatización, la conectividad, el mantenimiento predictivo, la interoperabilidad, la gobernanza y la escalabilidad, y destaca que el éxito de la digitalización depende de unos cimientos integrados, de la adopción operativa y de un despliegue escalable, más que de tecnologías aisladas.

Figura11 . Lecciones clave de los sectores con madurez digital y sus implicaciones para la digitalización del hidrógeno.



5. APLICACIÓN DE SOLUCIONES DIGITALES A LO LARGO DE LA CADENA DE VALOR DEL HIDRÓGENO

Este capítulo se basa en las tecnologías digitales descritas en el capítulo 0 y en los retos identificados en el capítulo 0, traduciéndolos en soluciones prácticas y orientadas a la aplicación a lo largo de toda la cadena de valor del hidrógeno.

Al vincular los retos, las tecnologías y las aplicaciones contrastadas, este capítulo establece un puente práctico entre las capacidades digitales conceptuales y su implementación en proyectos de hidrógeno a lo largo del ciclo de vida y los segmentos de la cadena de valor, lo que permite comprender claramente cómo las tecnologías digitales contribuyen a resolver los retos identificados y en qué casos las soluciones ya son directamente transferibles. Véase [el capítulo 3](#).

Nota: La columna «Transferibilidad al hidrógeno» se ha clasificado de la siguiente manera:

Alta: referencias propias del hidrógeno; los casos de uso incluyen casos específicos del hidrógeno.

Media: referencias no específicas del hidrógeno; los casos de uso se describen explícitamente como directamente transferibles o análogos. No se requiere adaptación alguna o esta es mínima.

Baja: referencias no específicas del hidrógeno; la aplicabilidad de los casos de uso documentados es actualmente limitada o indirecta. Requiere un esfuerzo de adaptación significativo.

Brecha: No se ha documentado ningún caso de uso representativo, ni directo ni indirecto.

Tabla 3. - Retos, capacidades digitales y mapa de madurez.

Reto	Segmento	Fase	Capacidad	Transferibilidad a H ₂	Referencia de casos de uso
Competitividad en costes y presión sobre el LCOH	Transversal	Diseño	Análisis de datos – Análisis económico	Alta	5.2.1; 5.2.2; 5.2.3; 5.3.1; 5.10.1; 5.11.1
Percepción de un bajo retorno de la inversión en el ámbito digital	Transversal	Diseño	Análisis de datos – Análisis económico	Alta	5.2.1; 5.2.3; 5.2.2; 5.10.1; 5.11.3;
Incertidumbre en el diseño del sistema y el dimensionamiento de los activos	Transversal	Diseño	Análisis de datos – Análisis económico	Alta	5.2.1; 5.2.3; 5.3.1; 5.8.1; 5.8.3; 5.10.1; 5.11.1
Complejidad de la optimización operativa a nivel de todo el sistema	Transversal	Operaciones y mantenimiento	Análisis de datos – Gestión de operaciones	Media	5.3.3; 5.4.2; 5.4.3; 5.8.1; 5.8.2; 5.11.2;
Intermitencia frente al desajuste de la demanda	Upstream	Operación y mantenimiento	Análisis de datos – Gestión de operaciones	Alta	5.3.1; 5.3.3
Integración con los mercados energéticos	Transversal	Operaciones y mantenimiento	Análisis de datos – Gestión de operaciones	Alta	5.3.1; 5.3.2
Ecosistema fragmentado / silos de datos	Transversal	Operación y mantenimiento	Integración de datos / OT-IT	Alta	5.5.1; 5.5.2; 5.8.2; 5.8.3

Reto	Segmento	Fase	Capacidad	Transferibilidad a H ₂	Referencia de casos de uso
Adopción organizativa y gobernanza digital	Transversal	Operación y mantenimiento	Colaboración / flujos de trabajo	Baja	
Disponibilidad limitada de datos históricos	Transversal	Operación y mantenimiento	IA / Modelos predictivos	Media	5.5.1; 5.5.2; 5.7.1; 5.8.3; 5.11.1;
Falta de implementaciones escalables de gemelos digitales	Transversal	Diseño	Gemelo digital	Media	5.5.1; 5.11.1; 5.11.2; 5.11.3
Trazabilidad digital y certificación	Transversal	Explotación y mantenimiento	Trazabilidad digital	Media	5.4.2; 5.5.1; 5.5.2;
Calidad y trazabilidad del hidrógeno	Downstream	Funcionamiento y mantenimiento	Trazabilidad digital	Media	5.5.1; 5.5.2;
Exposición a riesgos de ciberseguridad en la infraestructura de H₂	Transversal	Todos	Ciberseguridad	Alta	5.1.1; 5.1.1; 5.8.2; 5.10.1;
Servicios de formación de red, equilibrio y auxiliares	Midstream	Operación y mantenimiento	Control avanzado / EMS	Media	5.3.1; 5.3.2; 5.3.3; 5.7.1; 5.11.2
Integración de la arquitectura de corriente continua	Upstream	Ingeniería	Automatización y control	Brecha / GAP	
Gestión energética basada en IA	Upstream	Operación y mantenimiento	Análisis de datos: gestión de operaciones	Media	5.3.3; 5.5.2; 5.7.1; 5.11.2;
Gemelo digital EMT y protección adaptativa	Upstream	Ingeniería	Gemelo digital	Baja	5.11.1; 5.11.2; 5.11.3
Integridad de las tuberías y detección de fugas	Midstream	Operación y mantenimiento	Gestión de oleoductos	Alta	5.4.1
Interrupciones operativas y fiabilidad del sistema	Midstream	Operación y mantenimiento	Oleoductos / Gemelo digital	Alta	5.4.2; 5.4.3; 5.5.3; 5.6.1; 5.8.1; 5.8.2; 5.11.1; 5.11.2; 5.11.3
Restricciones de ingeniería de la red troncal de hidrógeno	Midstream	Diseño	SIG	Alta	5.9; 5.9.1;
Ingeniería: continuidad de los datos operativos	Midstream	Diseño	BIM + SIG	Alta	5.4.2; 5.4.3; 5.5.1; 5.8.1; 5.8.2; 5.9.1
Falta de datos operativos	Downstream	Explotación y mantenimiento	IoT / Análisis de datos	Media	5.5.1; 5.5.2; 5.8.3; 5.11.1; 5.11.2;

Reto	Segmento	Fase	Capacidad Capacidad	Transferi bilidad a H ₂	Referencia de casos de uso
(almacenamiento/distribución)					
Digitalización de operaciones críticas para la seguridad	Downstream	Operación y mantenimiento	Automatización y control	Media	5.3.1; 5.4.1; 5.4.3; 5.5.3; 5.6.1; 5.8.1; 5.8.2;
Robustez limitada de los modelos predictivos	Downstream	Operación y mantenimiento	Gemelo digital e IA	Media	5.11.1; 5.11.2; 5.11.3

5.1 Ciberseguridad

Descripción de la capacidad: Una solución de ciberseguridad diseñada específicamente para entornos de tecnología operativa industrial puede consolidar todas las herramientas de seguridad, automatizar la detección de amenazas y resolver problemas, sustituyendo la complejidad actual de las soluciones de múltiples proveedores por una única interfaz fácil de usar. Este tipo de enfoque puede reducir el riesgo de amenazas a la ciberseguridad entre un 80 % y un 90 %. Una diferencia clave favorece a la infraestructura de hidrógeno: puede diseñarse desde el principio con un enfoque integrado de automatización y seguridad, en lugar de tener que adaptarla a los sistemas existentes. La infraestructura de hidrógeno puede construirse para funcionar como una red unificada desde el primer día de puesta en servicio. [Véase el apartado 2.1](#) para obtener más detalles.

Segmento de la cadena de valor: transversal.

Fase del ciclo de vida: Diseño, explotación y mantenimiento.

Retos abordados:

- Actualizaciones de seguridad y parches automáticos en todos los dispositivos conectados.
- Supervisión de los sistemas antimalware y alertas de fallos de protección.
- Gestión automática de copias de seguridad, garantizando la restauración de datos en cualquier momento.
- Aislamiento de sistemas críticos para contener amenazas.
- Control de acceso remoto y gestión de sesiones (activación y finalización).
- Inventario en tiempo real de los activos conectados a la red.

5.1.1 Ciberseguridad para las operaciones de la red troncal

Contexto: Un gran operador europeo de oleoductos de productos refinados gestiona más de 4.000 kilómetros de oleoductos que conectan 40 terminales de almacenamiento, 26 instalaciones aeroportuarias, 8 refinerías y 14 instalaciones portuarias en toda la Península Ibérica y en otros mercados internacionales.

El sistema proporcionado supervisa todas las comunicaciones de red, detecta anomalías en el comportamiento de los equipos, gestiona los controles de acceso en las estaciones de trabajo de los operadores, aplica parches automáticamente a los sistemas vulnerables y aísla los equipos comprometidos antes de que las amenazas puedan propagarse. El acceso a la red está controlado y autenticado. Se registran todas las decisiones operativas. Se registran todos los incidentes de seguridad. Cuando los reguladores o auditores solicitan pruebas de que el sistema es seguro y funciona de forma segura, los datos están disponibles automáticamente.

Segmento de la cadena de valor: Midstream

Fase del ciclo de vida: Diseño, explotación y mantenimiento.

Beneficios observados:

- Mejora de la seguridad y el cumplimiento normativo.
- Los incidentes se detectan más rápidamente. Las anomalías se detectan antes de que se agraven.
- Los registros de auditoría completos proporcionan pruebas del correcto funcionamiento y la seguridad.
- Las operaciones se han coordinado mejor (se ha reducido el tiempo de almacenamiento y se ha maximizado el rendimiento).

Transferibilidad: Directamente transferible a proyectos de hidrógeno, ya que los retos subyacentes son análogos. Ambos presentan una topología de red, retos operativos, riesgos de ciberseguridad y alineación con el marco normativo (NIS2) similares.

Referencia: Estudio de caso de ABB, anónimo.

5.1.2 GUARDIANE-Q

Contexto: GUARDIANE-Q es un proyecto de investigación industrial centrado en el diseño y la validación conceptual de una arquitectura de seguridad avanzada e integral para infraestructuras críticas de almacenamiento subterráneo de hidrógeno renovable.

Segmento de la cadena de valor: Midstream.

Fase del ciclo de vida: Diseño, explotación y mantenimiento.

Beneficios observados: El proyecto integra capacidades que van desde la modelización geológica del subsuelo hasta la ciberseguridad poscuántica, pasando por la monitorización multisensor, la inteligencia artificial y las comunicaciones por satélite resilientes.

La combinación de estos ámbitos tecnológicos permite explorar un nuevo paradigma de protección integral para las infraestructuras energéticas estratégicas en la era del sistema energético postfósil.

Transferibilidad: Aplicabilidad directa en toda la cadena de valor del hidrógeno.

Referencia: [guardianeq.eu](https://www.guardianeq.eu/) (<https://www.guardianeq.eu/>).

5.2 Análisis de datos e inteligencia artificial. Análisis económico

Descripción de la capacidad: Distribuciones de probabilidad para datos de entrada inciertos (por ejemplo, disponibilidad de energías renovables, rendimiento de los electrolizadores, capacidad de almacenamiento, condiciones meteorológicas dinámicas y demanda) y predicción de métricas futuras de rendimiento del sistema, como la producción, los ingresos, los costes, la disponibilidad y las emisiones. Véase el apartado 2.2 para obtener más detalles.

Segmento de la cadena de valor: Transversal.

Fase del ciclo de vida: Diseño.

Retos abordados:

- **Percepción de un bajo retorno de la inversión (ROI) en soluciones digitales.** Evaluación de diversas vías de producción de hidrógeno, dimensionamiento de la capacidad de energías renovables, opciones de almacenamiento y productos derivados, como el amoníaco verde. El análisis exhaustivo de opciones durante la evaluación del concepto y el diseño permite a los diseñadores dimensionar adecuadamente los activos y el almacenamiento para minimizar el CAPEX, al tiempo que se garantiza el rendimiento objetivo.
- **Presión por la competitividad de los costes y el coste nivelado del hidrógeno (LCOH).** Los proyectos de hidrógeno verde se enfrentan a una elevada volatilidad de los costes debido a la

naturaleza intermitente de la energía renovable y a la incertidumbre en su utilización (p. ej., tecnologías de electrolizadores, opciones de almacenamiento, mezclas de energías renovables), por lo que se identifican diseños que minimizan el coste total y cumplen los precios objetivo del hidrógeno, al tiempo que mantienen la fiabilidad.

- **Incertidumbre en el diseño del sistema y el dimensionamiento de los activos.** Los resultados probabilísticos (por ejemplo, un 90 % de certeza de cumplir los objetivos de producción) y las compensaciones claras entre costes y beneficios superan el escepticismo respecto a las inversiones digitales, lo que ayuda a asegurar la financiación y a alinear a las partes interesadas internas y externas.
- **Mayor confianza en la inversión y alineación de las partes interesadas.** Estabiliza el funcionamiento de los electrolizadores ante un suministro variable de energías renovables y optimiza el consumo energético.

5.2.1 Optimización de un complejo de amoníaco verde e hidrógeno

Contexto: Una importante empresa del sector energético y químico que desarrollaba un proyecto integrado de amoníaco verde utilizó una herramienta de análisis económico probabilístico para unificar los datos financieros y técnicos. El modelo evaluó configuraciones alternativas (fuentes de energía, tecnología de electrolizadores, almacenamiento en baterías y de amoníaco) y su impacto en la producción y los ingresos ante condiciones meteorológicas y precios de la electricidad variables. Los talleres con los equipos de procesos, energía y comercial identificaron oportunidades de mejora y un diseño con el tamaño adecuado.

Segmento de la cadena de valor: Upstream.

Fase del ciclo de vida: Diseño.

Beneficios observados:

- Se identificó un ahorro de aproximadamente 500 millones de dólares en CAPEX, manteniendo al mismo tiempo el objetivo de producción.
- Permitió reconocer las compensaciones entre las distintas configuraciones, lo que redujo el riesgo del proyecto y aceleró la decisión final de inversión (FID).

Transferibilidad: Directa.

Referencia: Estudio de caso de Emerson–AspenTech, «Envision. 1323746 Amoníaco verde de principio a fin».

5.2.2 Optimización de la red de las plantas de hidrógeno azul

Contexto: Un operador que gestiona más de quince instalaciones de hidrógeno azul utilizó un modelo económico basado en escenarios para optimizar la programación del mantenimiento y la producción en toda la red. La solución combinó las previsiones de demanda, la disponibilidad de reformadores de metano al vapor y de unidades de captura y almacenamiento de carbono (CCS), y los escenarios de fijación de precios del carbono para minimizar el coste nivelado del hidrógeno.

Segmento de la cadena de valor: Operación y mantenimiento. Midstream.

Fase del ciclo de vida: Diseño.

Beneficios observados:

- Se logró una reducción superior al 1 % en los costes operativos gracias a una mejor utilización de los activos y a una mejor planificación del mantenimiento.
- Mejora de la capacidad para cumplir con las entregas contractuales de hidrógeno y reducir las emisiones de carbono.

Transferibilidad: Aplicabilidad directa en toda la cadena de valor del hidrógeno.

Referencia: Estudio de caso de Emerson–AspenTech. «Air Products. Caso de optimización de la red de hidrógeno».

5.2.3 Herramienta web AIHRE

Contexto: El proyecto europeo AIHRE ha desarrollado una plataforma de dimensionamiento diseñada para facilitar el diseño y la evaluación preliminar de proyectos basados en hidrógeno renovable. La herramienta permite analizar la viabilidad técnica, económica y medioambiental de diferentes configuraciones antes de emprender estudios de ingeniería detallados, lo que contribuye a reducir la incertidumbre asociada a las fases iniciales de planificación.

Segmento de la cadena de valor: Transversal.

Fase del ciclo de vida: Diseño.

Beneficios observados: La plataforma se ha diseñado como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para empresas, administraciones públicas, centros tecnológicos y otras partes interesadas en desarrollar soluciones basadas en el hidrógeno renovable. Su principal objetivo es facilitar la comparación de alternativas tecnológicas y modelos de negocio mediante una metodología flexible y fácilmente configurable.

Transferibilidad: Aplicabilidad directa en toda la cadena de valor del hidrógeno.

Referencia: aihre.eu (<https://aihre.eu/aihre-lanza-una-plataforma-para-evaluar-la-viabilidad-de-proyectos-de-hidrogeno-renovable/>)

5.3 Análisis de datos e inteligencia artificial. Gestión y optimización de operaciones

Descripción de la capacidad: Planificación operativa en tiempo real, integración de energías renovables, participación en el mercado y optimización a nivel empresarial en toda la cadena de valor del hidrógeno. Véase el apartado 2.2 para obtener más detalles.

Segmento de la cadena de valor: Transversal.

Fase del ciclo de vida: Operación y mantenimiento.

Retos abordados:

- **Complejidad de la optimización operativa a nivel de todo el sistema.** Los sistemas de gestión de recursos energéticos distribuidos (DERMS) y las herramientas de optimización empresarial proporcionan el marco analítico y de control necesario para gestionar este problema de optimización multivariable en tiempo real.
- **Desajuste entre la intermitencia y la demanda.** Los sistemas DERMS, el control de microrredes y el control dinámico de procesos abordan directamente este problema al permitir una respuesta inteligente a la demanda, la gestión del almacenamiento de energía y unas operaciones dinámicas de las plantas que se ajustan a los perfiles de generación de energías renovables.
- **Complejidad del equilibrio del sistema en la fase intermedia.** Los sistemas DERMS y de gestión de tuberías proporcionan la visibilidad y la optimización en tiempo real necesarias para equilibrar los sistemas de hidrógeno en la fase intermedia.
- **Integración con los mercados energéticos.** Los productores de hidrógeno deben responder a las señales de precios del mercado en tiempo real, participar en los mercados de servicios auxiliares y optimizar el despacho para maximizar los ingresos. Los DERMS y los sistemas de gestión energética proporcionan las capacidades de integración en el mercado y optimización necesarias.
- **Brechas de la adopción organizativa.** La falta de coordinación entre los equipos digitales y de operaciones supone un obstáculo para una implementación eficaz. Las implementaciones

probadas de DERMS demuestran que es posible lograr una rápida adopción por parte de los usuarios cuando las soluciones se integran a la perfección con interfaces familiares.

- **Gestión de operaciones para la inyección de H₂ en gasoductos de gas natural.** La gestión de la inyección de hidrógeno en las redes de gasoductos de gas natural requiere herramientas especializadas de planificación de operaciones capaces de gestionar las restricciones de mezcla, la gestión de la presión, el seguimiento del caudal y el cumplimiento normativo.
- **Medición fiscal / transferencia de custodia.** Una medición precisa de la transferencia de custodia es fundamental para las transacciones comerciales de hidrógeno. La medición fiscal de alta precisión permite la facturación a los clientes, el cálculo de impuestos y el cumplimiento normativo.

5.3.1 Solución dinámica integral para el amoníaco verde

Contexto: Un proyecto de conversión de hidrógeno verde en amoníaco en China (Chifeng, con un objetivo de 1 520 Kt de amoníaco al año, 20 Kt de hidrógeno verde líquido al año y 200 Kt de metanol al año) ha implementado una solución dinámica integral para adaptarse a la variabilidad de la energía eólica renovable sin necesidad de una gran estabilización de la red eléctrica ni de almacenamiento en baterías. Este enfoque minimiza el almacenamiento y el uso de baterías desde la fase de diseño hasta la explotación, lo que permite que el producto sea verdaderamente ecológico al limitar el consumo de energía de la red eléctrica.

Segmento de la cadena de valor: Sector downstream.

Fase del ciclo de vida: Explotación y mantenimiento.

Beneficios observados:

- Flexibilidad dinámica de la carga (del 10 % al 100 % en 10 minutos para el electrolizador, y en 30 minutos para la síntesis de amoníaco).
- Estrategia de control dinámico validada de principio a fin, desde la energía renovable hasta el producto.
- Energía y producción optimizadas para alcanzar el precio de mercado competitivo del amoníaco verde/H₂ (presión sobre el LCOH).
- Funcionamiento dinámico seguro validado a escala piloto.
- CAPEX minimizado gracias a la reducción de los requisitos de almacenamiento y baterías.

Transferibilidad: directa.

Referencia: Estudio de caso de Emerson–AspenTech, «Envision. 1323746 Amoníaco verde de extremo a extremo».

5.3.2 DERMS para la flexibilidad en una red con un alto porcentaje de energías renovables

Contexto: El Grupo Iberdrola, que gestiona aproximadamente 20 GW de energías renovables en España con el objetivo de alcanzar una electricidad 100 % renovable para 2050, ha implantado el DERM. El sistema integra dispositivos controlados por SCADA, vehículos eléctricos (VE), sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS), energía solar y sistemas de control de edificios en una única plataforma para la optimización a nivel de toda la empresa. El DERMS gestiona los horarios de recarga de los vehículos eléctricos, el despacho de baterías, las cargas de climatización mediante la integración con la gestión de edificios, la previsión de la carga y la generación renovable, y los controles de consumo máximo de potencia.

Segmento de la cadena de valor: Downstream.

Fase del ciclo de vida: Explotación y mantenimiento.

Beneficios observados:

- Integración perfecta de diversos tipos de recursos energéticos distribuidos (DER) en una única plataforma de optimización.
- Capacidad para coordinar los recursos energéticos en diferentes ubicaciones; equilibrio dinámico de la demanda según las necesidades de la red.
- Creación validada de una central eléctrica virtual (VPP) para la participación en el mercado.

Transferibilidad: Directamente transferible a proyectos de hidrógeno. La adaptación clave necesaria consiste en ampliar los modelos de activos para incluir los electrolizadores como cargas flexibles controlables, el almacenamiento de hidrógeno como un análogo de una «batería» y los compromisos de retirada de hidrógeno como obligaciones de mercado.

Referencia: Estudio de caso de Emerson–AspenTech, «AT-1563_CS_Iberdrola_DERMS_v2».

5.3.3 DERMS de transmisión para la descarbonización de la cartera de energías renovables

Contexto: Public Service Company of New Mexico (PNM) —el mayor proveedor de electricidad del estado, que da servicio a más de 530 000 clientes— implementó un DERMS para gestionar dos grandes unidades de energía solar con almacenamiento (150 MW y 20 MW) conectadas a la red de transmisión de alta tensión. La solución gestiona el estado de carga de las baterías en tiempo real basándose en las previsiones de energía solar, realiza pujas con un día de antelación en el mercado de desequilibrio energético (EIM) de la ISO de California, responde a las violaciones de frecuencia (eventos ACE) y proporciona energía de reserva de emergencia.

Segmento de la cadena de valor: downstream.

Fase del ciclo de vida: Explotación y mantenimiento.

Beneficios observados:

- Reducción del 32 % en las emisiones de CO₂ entre 2005 y 2022.
- Gestión en tiempo real del almacenamiento de energía basada en las previsiones de energía solar.
- Optimización del despacho al EIM de California ISO; supervisión y ajuste de la carga en función del ACE del área de equilibrio.

Transferibilidad: El valor demostrado es directamente transferible. Las adaptaciones menores incluyen la modelización de la dinámica de los electrolizadores y las limitaciones del almacenamiento de hidrógeno.

Referencia: Estudio de caso de Emerson–AspenTech, «PNM utiliza un sistema DERMS en tiempo real para descarbonizar su cartera de generación».

5.4 Análisis de datos e inteligencia artificial. Gestión de tuberías, integridad y detección de fugas

Descripción de la funcionalidad: Proporciona visibilidad continua y en tiempo real de lo que ocurre en el interior un ducto—supervisando la presión, el caudal, la temperatura y la composición— y traduce esos datos en información útil para los operadores: detecta anomalías, avisa de posibles fugas, verifica que las operaciones se mantengan dentro de los límites de seguridad y de cumplimiento normativo, y respalda las decisiones diarias sobre programación y rendimiento. [Véase el apartado 2.2](#) para obtener más detalles.

Segmento de la cadena de valor: Midstream.

Fase del ciclo de vida: Operación y mantenimiento.

Retos abordados:

- **Detección de fugas y roturas críticas para la seguridad en infraestructuras de hidrógeno.** Un enfoque de detección por capas —que combina modelos basados principios físicos, analítica mediante aprendizaje automático y reconocimiento estadístico de patrones— aborda todo el espectro, desde microfugas hasta roturas instantáneas, en todas las condiciones de funcionamiento de los ductos.
- **Integridad de las tuberías en servicio con hidrógeno.** Sistemas de gestión de la integridad que cuantifican y realizan un seguimiento de los mecanismos de degradación, junto con análisis de riesgos e informes de cumplimiento, para mantener un funcionamiento seguro a lo largo del ciclo de vida de los activos.
- **Preparación para la transición energética.** Gestión de hidrógeno, CO₂, mezclas de gas natural, aceites renovables e hidrocarburos convencionales dentro del mismo marco operativo. Los operadores que incorporan hidrógeno a la infraestructura existente reconfiguran y recalibran la capa digital existente para reflejar las propiedades del nuevo producto, protegiendo así la inversión de capital tanto en infraestructura como en software.
- **Cumplimiento normativo en un entorno de aplicación cada vez más estricto.** Elimina la necesidad de agregar datos manualmente durante las auditorías y proporciona un registro documentado del rendimiento del sistema de detección de fugas.
- **Brechas de conocimiento en los sensores y las mediciones de las tuberías de hidrógeno.** La monitorización computacional de las tuberías compensa las limitaciones de la instrumentación mediante el uso de modelos hidráulicos basados en principios físicos para inferir el estado de la tubería en segmentos donde la detección directa es limitada.
- **Eficiencia operativa y optimización del rendimiento.** Reduce la mezcla de productos (transmix) en los ductos, mejora la utilización de los activos y facilita la toma de decisiones más segura y fundamentada.

5.4.1 Detección de fugas en sistemas de recogida con escasa instrumentación

Contexto: Una importante empresa norteamericana de refino y transporte implementó un sistema analítico de detección de fugas basado en el aprendizaje automático para una cartera de tuberías más cortas y con menor instrumentación, en las que el modelado a escala real basado en modelos físicos no resultaba óptimo desde el punto de vista de los costes. El sistema se entrenó con datos operativos históricos y mejoró progresivamente su rendimiento mediante el aprendizaje por refuerzo, sin necesidad de instrumentación adicional sobre el terreno.

Segmento de la cadena de valor: transporte

Fase del ciclo de vida: Operación y mantenimiento

Beneficios observados:

- Detección de fugas simuladas al 5 %, 8 % y 10 % del caudal del gasoducto de forma sustancialmente más rápida que los procesos de monitorización tradicionales.
- Detección de un subconjunto de fugas que los métodos tradicionales no lograban identificar.

Transferibilidad: Directamente transferible, ya que el enfoque computacional básico es independiente del producto. Las principales adaptaciones necesarias a la hora de aplicar estas capacidades al servicio específico del hidrógeno se refieren a la calibración del modelo, la selección de sensores y la adaptación a la normativa.

Referencia: Estudio de caso de Emerson, «Alyeska Pipeline Service Company».

5.4.2 Minimizar las interrupciones operativas

Contexto: Una empresa europea de transporte de gas implementó una solución de gestión de gasoductos basada en gemelos digitales para mejorar el apoyo a la toma de decisiones operativas y reducir las interrupciones de producción no planificadas. La solución proporcionaba perfiles hidráulicos en tiempo real, detección temprana de anomalías y generación automática de informes, sustituyendo así un proceso de monitorización que requería un gran esfuerzo manual.

Segmento de la cadena de valor: Midstream.

Fase del ciclo de vida: Operación y mantenimiento.

Beneficios observados:

- Reducción de la frecuencia y la duración de las interrupciones de producción.
- Mayor confianza en las decisiones operativas.
- Simplificación de la presentación de informes de cumplimiento normativo.

Transferibilidad: Directamente transferible. Las principales adaptaciones necesarias a la hora de aplicar estas capacidades al servicio específico del hidrógeno se refieren a la calibración del modelo, la selección de sensores y la adaptación a la normativa.

Referencia: Estudio de caso de Emerson, «TGI minimiza las interrupciones en la producción mejorando el apoyo a la toma de decisiones con el gemelo digital».

5.4.3 Suministro energético estable y seguro en todo el país

Contexto: El operador nacional de la red de transporte de gas de España —que gestiona más de 11 000 kilómetros de gasoductos y está llevando a cabo una transición activa de su red para transportar biometano e hidrógeno junto con el gas natural convencional— seleccionó una solución de gestión digital de la red para supervisar, operar y optimizar la red nacional de transporte. La solución integra datos en tiempo real basados en SCADA con un software avanzado de gestión de gasoductos para ofrecer cálculos energéticos en tiempo real, un seguimiento continuo del gas en toda la red y la mitigación proactiva de condiciones peligrosas, incluida la detección de sobrepresión y de roturas. La implantación respalda directamente la estrategia de descarbonización del operador, al permitir una monitorización fiable de una red multimolécula a medida que aumentan los volúmenes de hidrógeno y biometano.

Segmento de la cadena de valor: Midstream.

Fase del ciclo de vida: Explotación y mantenimiento.

Beneficios observados:

- Visibilidad completa en tiempo real y supervisión digital en más de 11 000 km de infraestructura nacional de gasoductos.
- Detección proactiva de roturas y sobrepresiones.
- Capacidad de seguimiento de múltiples gases que admite mezclas de biometano e hidrógeno, además del gas convencional.
- Plataforma digital alineada con los objetivos nacionales de descarbonización energética.

Transferibilidad: Directamente transferible. El operador gestiona activamente una red que transporta biometano e hidrógeno junto con el gas convencional; se trata de una referencia directamente relevante para el hidrógeno.

Referencia: Comunicado de prensa de Emerson, «Emerson, seleccionada por el operador de la red nacional de gas de España para garantizar un suministro energético estable y seguro en todo el país».

5.5 Análisis de datos e inteligencia artificial. Integración de datos industriales

Descripción de la capacidad: La integración y contextualización de datos industriales crea una estructura de datos que agrega, normaliza y contextualiza la información procedente de fuentes de tecnología operativa (OT) (sensores, sistemas de control, historiales) y de sistemas de tecnología de la información (TI) (planificación de recursos empresariales, programación, certificación) en una única capa segura. Crea un entorno de datos coherente y estructurado, que permite la visibilidad en tiempo real, la interoperabilidad y el análisis avanzado a lo largo de toda la cadena de valor del hidrógeno. Por lo tanto, la estructura de datos constituye la columna vertebral de los análisis avanzados, los gemelos digitales y los flujos de trabajo basados en IA, proporcionando un recurso de información fiable y contextualizado a lo largo de toda la cadena de valor del hidrógeno. [Véase el apartado 2.2](#) para obtener más detalles.

Segmento de la cadena de valor: Transversal.

Fase del ciclo de vida: Operación y mantenimiento.

Retos abordados:

- **Arquitectura OT/IT no escalable y silos de datos.** Las instalaciones de hidrógeno comprenden múltiples electrolizadores, compresores y unidades de almacenamiento diseñadas utilizando diversos estándares y herramientas. Durante los traspasos de proyectos, se intercambian grandes volúmenes de documentos y datos técnicos que, a menudo, se almacenan en sistemas fragmentados, lo que dificulta la organización, validación y verificación de la información.
- **Base para el análisis avanzado, los gemelos digitales y la autonomía.** Los datos contextualizados y de alta calidad son un requisito previo para los gemelos digitales, el mantenimiento predictivo y la optimización basada en la IA. La estructura de datos alimenta plataformas de análisis avanzado y modelos de IA, lo que permite obtener información que mejora la fiabilidad, optimiza el uso de la energía y respalda las operaciones autónomas.
- **Menor complejidad de integración y menor dependencia de un único proveedor.** Una arquitectura escalable e independiente del proveedor simplifica la integración de nuevos activos y socios, lo que reduce el riesgo del proyecto y permite una rápida ampliación a nuevos proyectos de hidrógeno; los conectores estandarizados y los modelos semánticos facilitan la incorporación de nuevos sensores, instrumentos y módulos de aplicación, acelerando así la implementación.
- **Coordinación entre los actores de la cadena de valor.** Los productores, los operadores de transporte y los compradores suelen utilizar protocolos y plataformas diferentes. Una infraestructura de datos integrada permite un intercambio de información coherente, alineando las métricas operativas con los requisitos comerciales y normativos.
- **Complejidad de la trazabilidad y la certificación.** A medida que maduran los mercados del hidrógeno, los compradores, los reguladores y los inversores exigen información fiable sobre la huella de carbono, el origen y el movimiento de cada lote de hidrógeno. Una estructura de datos unificada con datos contextualizados respalda el desarrollo de pasaportes digitales de productos y plataformas inteligentes de trazabilidad.

5.5.1 Estandarizar y conectar las operaciones

Contexto: Una empresa del sector de las ciencias de la salud ha adoptado a nivel global una arquitectura Data Fabric que integra datos de fabricación en tiempo real procedentes de planta con sistemas corporativos, plataformas cloud y sistemas de gestión de la calidad para impulsar la excelencia operativa y fomentar las iniciativas de fabricación digital.

Segmento de la cadena de valor: N/A.

Fase del ciclo de vida: Explotación y mantenimiento.

Beneficios observados:

- **Integración de TI/TO:** Cierra la brecha entre la tecnología operativa (TO) de la planta de fabricación y los sistemas de TI de la empresa, con un ahorro del 10-15 % en el gasto en TI.
- **Estandarización y contextualización de datos:** Ofrece una visión única y unificada de los datos operativos de cientos de sistemas de registro histórico de la planta, lo que permite a la empresa realizar un seguimiento de la fabricación de medicamentos, con una reducción de los costes de TI del 2-5 %.
- **Análisis a nivel de toda la empresa:** permite el uso de aplicaciones robustas de IA industrial y aprendizaje automático en tiempo real para supervisar y mejorar el rendimiento de la producción, con un aumento del rendimiento del 10-15 %.
- **Cumplimiento normativo:** Consolida los datos bajo el cortafuegos de la empresa con seguridad y cumplimiento nativos para cumplir con las estrictas normativas de fabricación farmacéutica, con una reducción de costes del 5-7 %.

Transferibilidad: Directamente transferible. Las instalaciones de hidrógeno se enfrentan a una complejidad, unos requisitos de seguridad y unos volúmenes de datos similares.

Referencia: Estudio de caso de Emerson–AspenTech, «AT-4654 BRO Inmation Pharma V3».

5.5.2 Agregar y centralizar millones de puntos de datos en tiempo real

Contexto: Al facilitar el acceso unificado a los datos operativos, una empresa multinacional integrada del sector energético está acelerando la integración de la IA en los procesos industriales.

Segmento de la cadena de valor: Midstream.

Fase del ciclo de vida: Operación y mantenimiento.

Beneficios observados:

- **Integración de datos empresariales:** Recopila y contextualiza de forma continua datos de sensores y máquinas en tiempo real en las instalaciones de upstream, refinería y productos químicos para eliminar los silos operativos.
- **Optimización de emisiones y energía:** integra datos de control de procesos en tiempo real para optimizar el consumo energético, reducir la huella medioambiental y cumplir los objetivos de sostenibilidad de la empresa.
- **Habilitación de la inteligencia artificial (IA):** Prepara y alimenta con datos operativos depurados aplicaciones avanzadas de IA y aprendizaje automático para facilitar una toma de decisiones más inteligente y basada en datos.

Transferibilidad: Directamente transferible. Podría ser necesaria una adaptación específica, ya que la estructura de datos debe admitir registros de procedencia seguros e interactuar con sistemas de certificación como CertifHy.

Referencia: Datos y digitalización: Comunicado de prensa de TotalEnergies «Potenciar el valor de los datos industriales»

5.5.3 Índice de estado de los activos para la gestión basada en el estado de los activos

Contexto: Una infraestructura de gas y GNL a gran escala, con activos de larga duración y múltiples fuentes de datos heterogéneas (datos de inspección, registros de mantenimiento, datos operativos), se emplean indicadores de salud de los activos y modelos de Asset Health Index para consolidar esta información en una visión integrada del estado de los activos. Pasar de evaluaciones de estado fragmentadas a un «Índice de salud de los activos» estandarizado y basado en algoritmos permite tomar decisiones de gestión de activos coherentes, escalables y con visión de futuro.

Segmento de la cadena de valor: Midstream.

Fase del ciclo de vida: Explotación y mantenimiento.

Beneficios observados:

- Evaluación objetiva y comparable del estado de los activos en toda la flota.
- Capacidad para anticipar tendencias de deterioro.
- Mejor priorización del mantenimiento y las inversiones.
- Apoyo a la estrategia a largo plazo de los activos.

Transferibilidad: El valor demostrado es directamente transferible. Podría ser necesaria una adaptación específica para definir los mecanismos de degradación propios del hidrógeno a partir de las primeras implantaciones. Incorporar la incertidumbre debida al historial operativo limitado.

Referencia: Índice de Estado de los Activos implementado para activos de alta capitalización, Enagás (España).

5.6 Análisis de datos e inteligencia artificial. Mantenimiento prescriptivo y predictivo

Descripción de la capacidad: Los modelos de inteligencia artificial y aprendizaje automático —en concreto, los agentes basados en firmas de fallos— analizan datos de sensores en tiempo real e históricos para detectar patrones tempranos de degradación de los equipos y predecir fallos semanas o meses antes de que se produzcan. Estos agentes proponen medidas correctivas y se integran en los flujos de trabajo de mantenimiento, lo que permite pasar de un mantenimiento reactivo y preventivo a estrategias predictivas y prescriptivas.

Segmento de la cadena de valor: Transversal.

Fase del ciclo de vida: Operación y mantenimiento.

Retos abordados:

- **Continuidad operativa.** Al detectar patrones de fallo con semanas o meses de antelación, se reducen significativamente las paradas no planificadas. En el caso de los activos de hidrógeno —donde el tiempo de inactividad inesperado repercute directamente en los compromisos de producción, los costes de restricción de la energía renovable y la seguridad—, esta mejora de la fiabilidad es fundamental para la viabilidad económica. La alerta temprana también mejora la seguridad de los trabajadores y reduce el riesgo de incidentes de fuga de hidrógeno.
- **Escalabilidad y transferencia de conocimientos a nivel de flota.** Las firmas de fallo desarrolladas en un activo o instalación pueden transferirse a activos idénticos o similares, lo que acelera drásticamente el despliegue en toda la empresa. Esta capacidad de aprendizaje por transferencia es estratégicamente importante para el sector del hidrógeno, donde se espera la replicación de arquitecturas de planta similares a medida que la industria crece.
- **Reducción de los costes del ciclo de vida.** Pasar de un mantenimiento basado en el tiempo a uno basado en el estado reduce las intervenciones preventivas innecesarias, al tiempo que evita costosas medidas correctivas.

5.6.1 Mantenimiento prescriptivo de compresores de hidrógeno

Contexto: Una gran empresa energética diversificada que opera más de una docena de refinerías emprendió una iniciativa de transformación digital basada en big data, aprendizaje automático e inteligencia artificial. Tres fallos anteriores de un compresor de hidrógeno habían provocado pérdidas de producción y costes de mantenimiento que ascendían a más de 250 millones de dólares en los tres incidentes.

Segmento de la cadena de valor: Midstream.

Fase del ciclo de vida: Operación y mantenimiento.

Beneficios observados:

- Reducción de la parada de hasta 8 días al programar el mantenimiento en un momento óptimo dentro de la ventana de aviso.
- Reducción del 30 % en los costes de mantenimiento en comparación con el mantenimiento de emergencia.
- Ahorro potencial de unos 30 millones de dólares por incidente al planificar la parada para minimizar las pérdidas de producción.
- Ahorro potencial combinado en tres incidentes históricos: más de 75 millones de dólares.
- Mejora del rendimiento en materia de salud, seguridad y medio ambiente al evitar paradas de emergencia.
- Posteriormente, la solución se amplió para supervisar más de 300 activos en 12 refinerías y 6 gasoductos.

Transferibilidad: directa. El activo en cuestión es un compresor de hidrógeno, un componente fundamental de la cadena de valor del hidrógeno en aplicaciones de upstream (compresión tras la electrólisis), midstream (compresión en ductos) y downstream (compresión en estaciones de repostaje). Los modos de fallo de los compresores de hidrógeno son directamente análogos en todos los tipos de producción.

Referencia: Estudio de caso de Emerson–AspenTech, «La transformación digital con mantenimiento predictivo impulsa el ahorro de costes: estudio de caso de un compresor de hidrógeno. AT-05064».

5.7 Análisis de datos e inteligencia artificial. Análisis de procesos y optimización multivariante de la calidad

Descripción de la capacidad: El control estadístico multivariante de procesos y los modelos analíticos en línea identifican el conjunto mínimo crítico de variables que determinan la calidad, el rendimiento y la productividad de los procesos, tanto en operaciones continuas como por lotes. Estos modelos detectan cambios sutiles con respecto a las condiciones de funcionamiento óptimas, identifican las causas fundamentales de las desviaciones de calidad y recomiendan valores de consigna correctivos, lo que permite una calidad constante del producto y la optimización del rendimiento.

Segmento de la cadena de valor: Transversal.

Fase del ciclo de vida: Diseño, ingeniería, operación y mantenimiento.

Retos abordados:

- **Optimización de procesos y garantía de calidad.** El análisis multivariante de procesos permite identificar de forma sistemática las variables clave que determinan la pureza del hidrógeno, la eficiencia del electrolizador, el consumo energético y el rendimiento. En lugar de basarse en una monitorización basada en umbrales, estas herramientas correlacionan patrones multivariantes complejos con los resultados, sacando a la luz causas raíz que no pueden identificarse mediante el análisis tradicional de tendencias de una sola variable. Esta capacidad resulta especialmente relevante para garantizar el cumplimiento de las especificaciones de calidad del producto (por ejemplo, la calidad del hidrógeno como combustible según la norma ISO 14687), optimizar la eficiencia de la electrólisis con entradas de potencia variables y reducir la producción fuera de especificación.
- **Escalabilidad y transferencia de conocimientos a nivel de flota.** Los modelos de optimización de procesos desarrollados en un activo o instalación pueden transferirse a activos idénticos o similares, lo que acelera drásticamente el despliegue en toda la empresa. Esta capacidad de aprendizaje por transferencia reviste una importancia estratégica para el sector del hidrógeno,

en el que se prevé la replicación de arquitecturas de planta similares a medida que la industria crezca.

- **Base de datos para gemelos digitales y operaciones autónomas.** El análisis avanzado actúa como la capa de inteligencia de datos que sustenta las capacidades digitales de orden superior. Los modelos de IA validados alimentan los gemelos digitales, proporcionan información a los sistemas de control autónomos y respaldan la evolución hacia activos que se optimizan por sí mismos: la visión a largo plazo para la producción de hidrógeno en el marco de la integración de energías renovables variables.

5.7.1 Conciliación de datos bajo demanda para una red de plantas de hidrógeno

Contexto: El mayor proveedor de hidrógeno del mundo ocupa una posición de liderazgo mundial en el suministro de hidrógeno, con más de 80 instalaciones de producción de hidrógeno y 1.800 millas de gasoductos industriales. La gestión de una flota distribuida de plantas de reformado de metano con vapor (SMR) de diversas configuraciones —cada una de las cuales genera enormes conjuntos de datos operativos— requería un enfoque analítico escalable que permitiera la optimización de los procesos y la resolución de problemas.

Segmento de la cadena de valor: Transversal.

Fase del ciclo de vida: Operación y mantenimiento.

Beneficios observados:

- La conciliación de datos permitió a los ingenieros de procesos detectar un cambio en las condiciones de alimentación tras un corte de suministro eléctrico que, de otro modo, se habría descartado como un error del analizador, lo que evitó más de 1 millón de dólares en posibles daños al catalizador y costes por paradas no planificadas.
- Optimización proactiva de la aproximación al equilibrio del reactor: los ingenieros de procesos pueden ahora detectar y corregir el deterioro del rendimiento antes de que afecte a la producción, con un valor estimado de entre 250 000 y 500 000 dólares al año por planta.
- Beneficios totales demostrados y costes evitados superiores a 1 millón de dólares por implementación.
- Acceso democratizado: los ingenieros no especialistas pueden realizar análisis avanzados de procesos sin necesidad de conocimientos especializados en herramientas de simulación.

Transferibilidad: directa. La extensión al hidrógeno verde requiere adaptar la superestructura de conciliación de la termodinámica de los SMR al balance energético de los electrolizadores y a los modelos electroquímicos.

Referencia: Estudio de caso de Emerson–AspenTech, «Air Products & Chemicals, presentación en AspenTech Chemicals OPT21».

5.8 Sistemas de automatización y control

Descripción de la capacidad: Los sistemas de automatización y control constituyen la base operativa de cualquier activo de hidrógeno. Estos sistemas, convierten los requisitos de ingeniería en acciones ejecutadas en tiempo real en los equipos de campo y garantizan que los procesos se mantengan dentro de su margen operativo seguro, eficiente y conforme a la normativa en todas las fases del ciclo de vida del activo. [Véase el apartado 2.3](#) para obtener más detalles.

Segmento de la cadena de valor: Transversal.

Fase del ciclo de vida: Operación y mantenimiento.

Retos abordados:

- **Respuesta dinámica al suministro variable de energía renovable.** Los sistemas de control deben gestionar las cargas cambiantes al tiempo que protegen los equipos y mantienen la estabilidad de los procesos
- **Servicios de formación de red, equilibrio y servicios auxiliares.** Control de la potencia activa y coordinación en tiempo real que permiten la participación de los electrolizadores en los mercados de respuesta de frecuencia y de equilibrio de la red.
- **Integración de la arquitectura de corriente continua.** Bus de corriente continua de media tensión que interconecta las unidades de electrolizadores, la generación renovable y el almacenamiento, lo que requiere una lógica de automatización coordinada.
- **Requisitos de seguridad estrictos.** El procesamiento, almacenamiento, compresión y manipulación del hidrógeno requieren una supervisión rigurosa, enclavamientos, lógica de parada de emergencia y detección de incendios y gases conforme a la norma IEC 61511.
- **Digitalización de las operaciones críticas para la seguridad.** Los sistemas de hidrógeno downstream (almacenamiento a alta presión, compresión, refrigeración y suministro) requieren sistemas digitales que representen las condiciones relevantes para la seguridad con suficiente fiabilidad, trazabilidad y tiempo de respuesta.
- **Integración de múltiples subsistemas.** Las unidades de electrólisis, la electrónica de potencia, el tratamiento del agua, el almacenamiento, la compresión, las interfaces de transporte y los consumidores deben funcionar de manera coordinada a través de una plataforma de automatización común.
- **Requisitos de calidad y coherencia.** Las especificaciones del producto y las condiciones del proceso (por ejemplo, la pureza del hidrógeno según la norma ISO 14687) deben mantenerse a pesar de la variabilidad de las materias primas renovables o de los modos de funcionamiento.
- **Disponibilidad limitada de datos históricos para el entrenamiento de modelos predictivos.** Las implementaciones en fase inicial carecen de referencias operativas; las plataformas de automatización deben proporcionar una recopilación estructurada de datos y su contextualización desde la puesta en marcha en adelante.
- **Escalabilidad y operaciones a nivel de parque.** Las plataformas de automatización modulares permiten la replicación en múltiples unidades dentro de una planta, en un parque de plantas y desde la escala piloto hasta la escala comercial completa, lo que hace posible la gestión del rendimiento a nivel de parque y los centros de operaciones remotos.

5.8.1 El mayor centro mundial de hidrógeno verde y almacenamiento de energía de larga duración

Contexto: El centro ACES (Advanced Clean Energy Storage) utiliza un conjunto de electrolizadores de 220 MW para producir hasta 100 toneladas de hidrógeno verde al día. El hidrógeno se almacena bajo tierra en cavernas de sal (con una capacidad de almacenamiento de 300 GWh). Se prevé que el hidrógeno almacenado se utilice como combustible para una central eléctrica híbrida de turbina de gas de ciclo combinado (CCGT) de 840 MW, destinada a sustituir a una central térmica de carbón de 1.800 MW que va a ser retirada del servicio. Se seleccionó una plataforma integrada de control y seguridad (ICSS) para automatizar la instalación de producción y almacenamiento de hidrógeno verde. El sistema proporciona un control y una supervisión fiables del proceso de producción de hidrógeno renovable, así como funciones de parada de emergencia y protección contra incendios y gases, y recopila y contextualiza los datos procedentes de la amplia variedad de sistemas de terceros de la central.

Segmento de la cadena de valor: Upstream, Downstream.

Fase del ciclo de vida: Explotación y mantenimiento.

Beneficios observados:

- Reducción de la complejidad de la puesta en marcha gracias a una conectividad de E/S modular y escalable.
- Mantenimiento simplificado a lo largo del ciclo de vida de 240 electrolizadores y una central eléctrica de 600 MW desde una única plataforma de automatización.
- Ya en funcionamiento (2025) y en expansión gradual, se estima que contribuirá a evitar 126.517 toneladas métricas de emisiones de dióxido de carbono al año.

Transferibilidad: Directa.

Referencia: [Página web de ADVANCED CLEAN ENERGY STORAGE](#)

5.8.2 Proyecto piloto de hidrógeno verde en alta mar

Contexto: Primer proyecto piloto europeo de producción de hidrógeno verde en alta mar, en el Mar del Norte neerlandés. Se utiliza electricidad eólica marina para alimentar un electrolizador de hidrógeno situado en la plataforma; el hidrógeno producido se mezcla con gas y se transporta a tierra a través del gasoducto existente. Se implantó un sistema integrado de control y seguridad (ICSS) para supervisar el electrolizador en alta mar, gestionar las interfaces con el suministro de energía eólica y controlar la mezcla de hidrógeno y gas, así como la inyección en el gasoducto.

Segmento de la cadena de valor: Upstream.

Fase del ciclo de vida: Explotación y mantenimiento.

Beneficios observados:

- Primera validación de sistemas energéticos integrados de energía eólica marina, gas e hidrógeno offshore.
- Se ha demostrado la seguridad de la mezcla de hidrógeno y gas y de la inyección en el gasoducto desde un entorno marino en el que la seguridad es fundamental.
- Se han proporcionado datos operativos para la ampliación a instalaciones de hidrógeno en alta mar de mayor tamaño.

Transferibilidad: Directa.

Referencia: Estudio de caso de Emerson, «Proyecto PosHYdon de Emerson».

5.8.3 Planta de producción de hidrógeno verde a gran escala

Contexto: Una planta de producción de hidrógeno verde de 25 MW —la mayor en construcción en España en el momento de la adjudicación del proyecto— integra cinco electrolizadores PEM de 5 MW para abastecer a una refinería situada en el mismo emplazamiento, con una segunda fase en desarrollo destinada al consumo industrial y al transporte. Se implementó un sistema integrado de control y seguridad (ICSS) que combina una plataforma de sistema de control distribuido optimizada para la energía y el agua con un sistema instrumentado de seguridad (SIL3) totalmente integrado, para el control del resto de la planta y la supervisión de los PLC de los electrolizadores. El sistema incorporaba funciones de ciberseguridad y controladores redundantes y ultra confiables.

Segmento de la cadena de valor: Upstream.

Fase del ciclo de vida: Operación y mantenimiento.

Beneficios observados:

- BPCS y SIS integrados con clasificación SIL3 desde una única plataforma de automatización, lo que reduce la complejidad de la ingeniería y el coste del ciclo de vida.
- Integración multiprotocolo que permite una supervisión fluida de paquetes heterogéneos de electrolizadores y del resto de la planta procedentes de diferentes fabricantes de equipos originales (OEM).

- Ciberseguridad integrada que cumple con los requisitos de los operadores industriales y los socios del proyecto.
- Arquitectura escalable que admite una ampliación de capacidad en una segunda fase.

Transferibilidad: Directa.

Referencia: caso práctico de Emerson, «Anónimo. Planta de hidrógeno verde, España».

5.8.4 Coordinación de procesos de múltiples fabricantes

Contexto: Instalación que se transformó en una planta de producción, almacenamiento y repostaje de hidrógeno a escala de demostración que combinaba energía solar fotovoltaica in situ, almacenamiento en baterías, un electrolizador, una pila de combustible y un surtidor de hidrógeno. Se implementaron un sistema de control distribuido y un sistema instrumentado de seguridad integrado de forma nativa para gestionar las operaciones en una amplia gama de sistemas de distintos fabricantes con diversos protocolos de comunicación. Una capa de coordinación de procesos convirtió los múltiples protocolos (medidores de potencia, electrolizador, pila de combustible, estación de repostaje, inversor solar y de baterías) a un protocolo común basado en Ethernet, conectado directamente a un único controlador, lo que eliminó la necesidad de una compleja infraestructura de marshalling.

Segmento de la cadena de valor: Upstream.

Fase del ciclo de vida: Explotación y mantenimiento.

Beneficios observados:

- La integración de múltiples fabricantes de equipos originales (OEM) mediante la orquestación de procesos redujo la complejidad de la comunicación y disminuyó el coste del proyecto.
- La estandarización de los protocolos acortó el plazo del proyecto en comparación con los enfoques tradicionales de integración punto a punto.
- Viabilidad técnica y económica de la producción, el almacenamiento y el suministro de hidrógeno utilizando energías renovables.
- El sistema automatizado de generación de informes permite supervisar el cumplimiento normativo y realizar un seguimiento del rendimiento de las energías renovables, tal y como exige la Agencia Australiana de Energías Renovables (ARENA).

Transferibilidad: Directa.

Referencia: Estudio de caso de Emerson, «Toyota Australia, Centro de Ensayos de Emisiones de Altona (planta de demostración de hidrógeno)».

5.9 BIM y gestión de la información de ingeniería

Descripción de la capacidad: Un marco de integración BIM-GIS permite conectar modelos de ingeniería detallados con plataformas geoespaciales corporativas. [Véase el apartado 2.4](#) para obtener más detalles.

Segmento de la cadena de valor: Transversal.

Fase del ciclo de vida: Diseño, ingeniería.

Retos abordados:

- Los modelos BIM contienen información técnica asociada a los activos.
- Las plataformas GIS proporcionan el contexto territorial y de red.
- Entorno de datos común (CDE) para la gestión de la información.
- Modelos de datos estandarizados y mecanismos de interoperabilidad.

Transferibilidad al hidrógeno: Especialmente relevante para proyectos de redes troncales de hidrógeno en los que las tuberías, las estaciones de compresión y las instalaciones asociadas deben gestionarse como parte de una red de infraestructuras conectada.

5.9.1 Entorno BIM-GIS integrado para la infraestructura de transporte de hidrógeno

Contexto: Las redes de transporte de hidrógeno a gran escala combinan activos distribuidos geográficamente, infraestructura lineal e información de ingeniería compleja. La gestión eficiente de estos activos requiere conectar los datos de ingeniería generados durante el diseño con la información geoespacial utilizada para la planificación, la explotación y la gestión de activos.

Segmento de la cadena de valor: Midstream.

Fase del ciclo de vida: Diseño, ingeniería.

Beneficios observados:

- Visión unificada de la red de hidrógeno a lo largo de su ciclo de vida.
- Mejor trazabilidad de la información de ingeniería y de los activos.
- Mejor gestión de las restricciones de trazado y los impactos territoriales.
- Integración más eficiente entre los entornos de diseño y de explotación.
- Mayor apoyo a las futuras actividades de explotación y mantenimiento.

Transferibilidad: Directamente transferible. Especialmente relevante para proyectos de red troncal de hidrógeno en los que es necesario gestionar gasoductos, estaciones de compresión e instalaciones asociadas como parte de una red de infraestructuras conectadas.

Referencia: Enagás (España), «Primeros tramos de la red troncal de hidrógeno de España en fase de diseño e ingeniería».

5.10 Internet de las cosas y conectividad industrial

Descripción de la capacidad: Las tecnologías digitales que proporcionan monitorización, conectividad periférica y control de supervisión son esenciales para gestionar cadenas de valor complejas del hidrógeno. Estas capacidades permiten a los operadores mantener una visión global segura de los activos distribuidos, tomar decisiones más rápidas e integrar la automatización, al tiempo que se evita el trabajo manual de alto riesgo. [Véase el apartado 2.5](#) para obtener más detalles.

Segmento de la cadena de valor: Downstream, Midstream.

Fase del ciclo de vida: Explotación y mantenimiento.

Retos abordados:

- **Limitaciones metrológicas.** Los medidores de caudal con sensores integrados de presión, presión diferencial y temperatura mejoran el rendimiento metrológico, reduciendo el tiempo de conciliación y garantizando el cumplimiento de los contratos.
- **Control de calidad y trazabilidad.** Las plataformas SCADA e IIoT integran analizadores en línea (cromatógrafos, espectrómetros), análisis en el borde y un sistema de registro histórico para supervisar de forma continua las impurezas y almacenar registros de auditoría. El almacenamiento seguro de datos y el acceso basado en roles preservan la integridad de los datos.
- **Complejidad de la supervisión y la integridad.** Los sensores en el borde de la red, las unidades terminales remotas y los sistemas SCADA alojados en la nube proporcionan visibilidad en tiempo real de las tuberías.
- **Mayor seguridad e integridad de los activos.** Los sensores distribuidos y la computación en el borde detectan eventos de sobrepresión, fugas o impurezas y activan paradas automáticas.

- **Reducción de los costes operativos y de las necesidades de mano de obra.** El sistema SCADA alojado en la nube elimina la necesidad de hardware in situ. Las herramientas de configuración remota permiten reducir el número de visitas a las instalaciones y mantienen a los trabajadores alejados de las zonas peligrosas.
- **Ciberseguridad y cumplimiento normativo.** El alojamiento gestionado proporciona actualizaciones de seguridad continuas y cumple con la normativa NERC-CIP. La seguridad basada en roles y el almacenamiento seguro de datos mejoran la auditabilidad y cumplen los requisitos normativos para los certificados de pureza del hidrógeno.

Transferibilidad: directamente transferible. En general, las capacidades básicas de monitorización, conectividad periférica y SCADA pueden transferirse al transporte y la distribución de hidrógeno con modificaciones en los sensores, la calibración de los analizadores y la lógica de seguridad.

5.10.1 Las tecnologías en la nube permiten reducir los costes de capital y que los operadores se centren en tareas críticas

Contexto: Una empresa de servicios públicos norteamericana buscaba modernizar su sistema de control de supervisión para las operaciones de electricidad, gas y agua. Su sistema SCADA heredado, instalado en sus propias instalaciones, requería una cantidad significativa de tiempo del personal para la aplicación de parches y actualizaciones complejas. La empresa adoptó una tecnología de plataforma SCADA alojada en la nube.

Segmento de la cadena de valor: Midstream.

Fase del ciclo de vida: Explotación y mantenimiento.

Beneficios observados:

- La transición supuso un ahorro de más de 100 000 dólares estadounidenses en inversión inicial al evitar la sustitución de servidores y mejoró la eficiencia del mantenimiento gracias a la externalización de las actualizaciones de software.
- Mejoró el cumplimiento de las normas de ciberseguridad, lo que permitió a los operadores centrarse en las operaciones de la red en lugar de en el mantenimiento informático.
- Capacidad para gestionar múltiples flujos de energía (gas, agua y electricidad) desde una única plataforma SCADA en la nube (las redes de distribución de hidrógeno pueden supervisarse y controlarse junto con otros medios).

Transferibilidad: Directamente transferible, ya que la capacidad de gestionar múltiples flujos de energía (gas, agua y electricidad) desde una única plataforma SCADA en la nube demuestra cómo se pueden supervisar y controlar las redes de hidrógeno junto con otros elementos. Será necesario realizar modificaciones en los sensores, la calibración de los analizadores y la lógica de seguridad.

Referencia: Estudio de caso de Emerson–AspenTech, «AT-2577_CS_DGM_Austin_SCADA».

5.11 Tecnologías de gemelo digital y simulación

Descripción de la capacidad: Las tecnologías de gemelo digital y simulación proporcionan una representación virtual de un activo, un proceso o una red. [Véase el apartado 2.6](#) para obtener más información.

Segmento de la cadena de valor: Transversal.

Fase del ciclo de vida: En los proyectos de hidrógeno, esta capacidad abarca todo el ciclo de vida:

- **Diseño** para dimensionar sistemas de electrolizadores, optimizar el resto de la planta (compresores, almacenamiento y purificación) y evaluar rutas de proceso alternativas.
- **Ingeniería y operaciones** para el diseño de plantas en 3D, simuladores de formación de operadores y optimización en tiempo real.

Retos abordados:

- **Mejores decisiones de inversión.** Evaluación de diversas vías de producción de hidrógeno, dimensionamiento de la capacidad de energías renovables, opciones de almacenamiento y derivados del producto, como el amoníaco verde.
- **Aceleración del diseño y reducción de las repeticiones.** Coordinación temprana entre la ingeniería de procesos, la lógica de control y las operaciones. Este enfoque de «hilo digital» reduce las repeticiones y permite ciclos de diseño más rápidos.
- **Mejora de las operaciones.** Identifica los errores de los sensores y mejora la calidad de los datos.
- **Eficiencia energética.** Estabiliza el funcionamiento del electrolizador ante un suministro variable de energías renovables y optimiza el consumo energético.
- **Fiabilidad y tiempo de actividad.** Mantenimiento predictivo y análisis de la causa raíz.
- **Complejidad de la optimización operativa a nivel de todo el sistema.** Optimización coordinada de la generación renovable, el funcionamiento del electrolizador, el almacenamiento y la demanda posterior, lo que permite mejorar la planificación de la producción y la gestión energética.
- **Puesta en marcha virtual y arranque más seguro.** Permite probar el sistema de control en escenarios dinámicos realistas antes de que finalice la construcción. Los simuladores de formación para operadores, basados en gemelos digitales, familiarizan a los operadores con los fenómenos transitorios, lo que se traduce en arranques más seguros y rápidos.

Transferibilidad: directa.

5.11.1 Planta integrada de hidrógeno verde y amoníaco

Contexto: Se desarrolló un gemelo digital híbrido de alta fidelidad que combina modelos de proceso en estado estacionario y simulación dinámica para un concepto de producción de hidrógeno verde y amoníaco. El gemelo modelaba la variabilidad de las energías renovables, la dinámica de los electrolizadores, las reacciones de síntesis y el almacenamiento de energía. Se vinculó al simulador del sistema de control para la puesta en marcha virtual y la formación de los operadores, y se reutilizó a lo largo de las fases de diseño y construcción.

Segmento de la cadena de valor: Upstream, Midstream.

Fase del ciclo de vida: Diseño, explotación y mantenimiento.

Beneficios observados:

- Reducción de hasta un 30 % en los costes de construcción gracias a la integración temprana y la optimización de las estrategias de diseño y control.
- Mayor preparación operativa gracias a los simuladores de formación.

Transferibilidad: directa.

Referencia: Estudio de caso de Emerson–AspenTech, «Doosan Fuel Cells».

5.11.2 Conciliación de datos de las plantas de hidrógeno de toda la flota

Contexto: Una empresa global de gases industriales implementó una solución de conciliación de datos y simulación para una flota de plantas de hidrógeno con reformadores de metano al vapor (SMR). Los modelos de proceso se integraron en una herramienta basada en Excel para conciliar los datos de las plantas y validar las lecturas de los analizadores en múltiples unidades. Este gemelo digital identificó lecturas incorrectas de los sensores, concilió los balances de materiales y proporcionó recomendaciones para ajustar los puntos de consigna de los reactores.

Segmento de la cadena de valor: Midstream.

Fase del ciclo de vida: Explotación.

Beneficios observados:

- Se evitó un gasto de más de 1 millón de dólares estadounidenses en paradas innecesarias y sustitución de catalizadores gracias a la interpretación correcta de los datos de los analizadores.
- La optimización del funcionamiento de los reactores generó unos beneficios de entre 250 000 y 500 000 dólares al año.

Transferibilidad: Directa.

Referencia: Estudio de caso de Emerson–AspenTech, «Optimización de la planta de hidrógeno de Air Products»—

5.11.3 Hilo digital en la industria naval

Contexto: En el sector marítimo, las soluciones de gemelos digitales «de buque a flota» integran modelos de diseño, ingeniería y operativos a lo largo de todo el ciclo de vida del buque. Los simuladores dinámicos polivalentes se reutilizan desde las primeras fases de diseño hasta la formación de los operadores y la optimización en tiempo real, mientras que los modelos híbridos y los controles avanzados mejoran la eficiencia operativa y la seguridad. Aunque no es específico del hidrógeno, esto demuestra cómo un hilo digital acelera la ampliación de la escala, mejora la fiabilidad y permite el funcionamiento a distancia.

Segmento de la cadena de valor: Midstream.

Fase del ciclo de vida: Operación y mantenimiento.

Beneficios observados:

- Puesta en servicio más rápida y reducción de las repeticiones de trabajo gracias a la reutilización de modelos dinámicos.
- Mayor eficiencia operativa y fiabilidad gracias a los modelos híbridos y al control avanzado.

Transferibilidad: Directamente transferible. Las instalaciones de hidrógeno pueden adoptar el mismo enfoque de «hilo digital», pero los modelos deben incorporar propiedades específicas del hidrógeno (solubilidad, fragilización, límites de inflamabilidad) y su comportamiento electroquímico. Las capas de seguridad y los análisis de riesgos deben tener en cuenta el amplio rango de inflamabilidad del hidrógeno y su baja energía de ignición.

Referencia: Estudio de caso de Emerson–AspenTech, «Marine Industry Synergy».

Figura12 resume los casos de uso representativos identificados a lo largo del capítulo0 y su transferibilidad evaluada a las aplicaciones del hidrógeno. El análisis demuestra que varias capacidades digitales ya cuentan con el respaldo de referencias específicas del hidrógeno o de experiencia industrial directamente transferible, mientras que un número menor de áreas de capacidad aún requiere pruebas adicionales o un desarrollo específico para el sector. En conjunto, estos casos de uso proporcionan la base empírica que vincula los retos del hidrógeno con soluciones digitales probadas y respalda la evaluación de madurez y adopción presentada en el capítulo0 .

Use-Case Portfolio with Transferability

Representative use cases classified as Strong, Emerging, Weak or GAP for hydrogen applicability

Cross-cutting / Foundation

5.1.1 Emerging

Cybersecurity
backbone

5.1.2 Strong

GUARDIANE-Q

5.2.1 Strong

Green H₂ / ammonia
optimisation

5.2.2 Strong

Blue-H₂ network
optimisation

5.5.1 Emerging

Data foundation /
standardisation

5.5.2 Emerging

Large-scale data
integration

5.12 GAP

Digital
traceability

Upstream

5.3.1 Strong

Dynamic green
ammonia

5.8.1 Strong

Green H₂ hub
automation

5.8.2 Strong

Offshore green H₂
pilot

5.8.3 Strong

Large-scale green
H₂ plant

5.8.4 Strong

Multi-OEM
orchestration

5.11.1 Strong

H₂ / ammonia
digital twin

Midstream

5.4.1 Emerging

Leak detection

5.4.2 Emerging

Outage reduction

5.4.3 Strong

Multi-gas network
operations

5.5.3 Emerging

Asset health
index

5.6.1 Strong

H₂ compressor
maintenance

5.9.1 Strong

BIM-GIS
backbone

Downstream / Cross-value-chain operations

5.3.2 Emerging

DERMS flexibility

5.3.3 Emerging

Transmission
DERMS

5.7.1 Strong

Hydrogen plant
reconciliation

5.10.1 Emerging

Cloud SCADA /
connectivity

5.11.2 Strong

Fleet H₂
reconciliation

5.11.3 Emerging

Marine digital
thread

Strong

Strong = hydrogen-native reference

Weak

Weak = limited or indirect evidence

Emerging

Emerging = directly transferable or analogous.

GAP

GAP = no representative use case documented.

Figura12 - Cartera de soluciones digitales y evaluación de la transferibilidad a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno.

6 CONCLUSIONES

El sector del hidrógeno está entrando en una fase crítica de industrialización, en la que el éxito dependerá no solo del despliegue de infraestructuras de producción, transporte, almacenamiento y uso final, sino también de la capacidad para establecer unos cimientos digitales sólidos capaces de respaldar operaciones seguras, eficientes, escalables y económicamente viables. A lo largo de este estudio, se ha demostrado que la digitalización es un factor facilitador transversal que influye en las decisiones de ingeniería, el rendimiento operativo, la integridad de los activos, el cumplimiento normativo y la competitividad empresarial en toda la cadena de valor del hidrógeno. El análisis de las tecnologías, los retos, las lecciones aprendidas y los casos de uso representativos demuestra que muchas de las capacidades digitales que requiere el sector del hidrógeno ya existen y se han implantado con éxito en sectores industriales maduros.

6.1 Evaluación de la madurez de las capacidades digitales

Basándose en las tecnologías, los casos de uso y el análisis de transferibilidad presentados en el capítulo 0, las capacidades digitales pueden agruparse, a grandes rasgos, en tres categorías de madurez.

Alta madurez y transferibilidad directa

Varias tecnologías ya muestran una sólida madurez industrial y pueden adoptarse con una adaptación específica al hidrógeno limitada:

- Ciberseguridad para infraestructuras críticas.
- Análisis económico y optimización tecnoeconómica.
- Gestión de operaciones y optimización basada en DERMS.
- Monitorización de tuberías, gestión de la integridad y detección de fugas.
- Integración y contextualización de datos industriales.
- Integración BIM-GIS para la planificación de infraestructuras.
- Mantenimiento predictivo de equipos rotativos.
- Automatización y sistemas de control integrados.

Estas capacidades están respaldadas por múltiples referencias industriales e implementaciones demostradas, incluidos ejemplos específicos del hidrógeno e industrias afines con requisitos operativos muy similares. El capítulo «0» muestra que los principios técnicos, las arquitecturas y los flujos de trabajo subyacentes ya están maduros y pueden acelerar el despliegue del hidrógeno sin necesidad de avances tecnológicos significativos.

Madurez media que requiere adaptación

Un segundo grupo está formado por tecnologías que, aunque técnicamente maduras, requieren adaptación a las condiciones de funcionamiento específicas del hidrógeno:

- Gemelos digitales y ecosistemas de simulación.
- Optimización impulsada por IA y análisis avanzados.
- Sistemas de gestión energética interactivos con la red.
- Optimización operativa de toda la flota.
- Análisis avanzado de procesos.

La principal limitación no es la tecnología en sí misma, sino la disponibilidad de conjuntos de datos operativos representativos, modelos validados e historiales de funcionamiento a largo plazo. Se prevé

que estas capacidades cobren cada vez más importancia a medida que los proyectos de hidrógeno ganen en escala y aumente la complejidad operativa.

Áreas de capacidad emergentes y brechas pendientes

Se han identificado varios retos en los que las implementaciones de referencia a nivel sectorial siguen siendo limitadas:

- Arquitecturas de trazabilidad digital para la certificación RFNBO y los pasaportes digitales de productos.
- Ecosistemas de certificación interoperables a gran escala.
- Modelos de gobernanza digital organizativa específicos para el hidrógeno.
- Gestión escalable del ciclo de vida de los gemelos digitales en ecosistemas de proveedores heterogéneos.
- Modelos predictivos específicos para el hidrógeno en materia de degradación, seguridad y fiabilidad.
- Integración de datos de certificación, operativos y comerciales entre múltiples partes interesadas.

Aunque las tecnologías subyacentes existen, las implementaciones prácticas a gran escala siguen siendo relativamente inmaduras en comparación con otros ámbitos de capacidad. Esto refleja la fase inicial de desarrollo del mercado del hidrógeno y la continua evolución de los marcos normativos y de certificación.

6.2 Enfoque práctico recomendado para la adopción

La experiencia de sectores industriales maduros sugiere que las organizaciones del sector del hidrógeno deberían evitar intentar desplegar todas las capacidades digitales de forma simultánea. En su lugar, la digitalización debería seguir una hoja de ruta progresiva y escalable. Un posible enfoque por fases podría ser el siguiente.

Fase 1 – Establecer las bases digitales:

Centrarse en:

- Integración de OT/IT
- Gobernanza de datos
- Conectividad industrial
- Ciberseguridad desde el diseño
- BIM-GIS
- Gemelos digitales
- Puesta en marcha virtual
- Modelos de información estándar
- Entornos de datos comunes

El objetivo es garantizar que las futuras capacidades digitales se basen en fundamentos de datos fiables e interoperables, teniendo en cuenta asimismo el dimensionamiento de todos los activos y el análisis de viabilidad económica.

Fase 2: Visibilidad operativa y apoyo a la toma de decisiones

Introducción:

- Cuadros de mando operativos
- Contextualización de datos
- Análisis de procesos
- Supervisión del estado de los activos
- Gestión del rendimiento

En esta fase, la digitalización favorece la eficiencia operativa y la comprensión de la situación, al tiempo que genera los conjuntos de datos necesarios para futuras aplicaciones avanzadas.

Fase 3: Capacidades predictivas y de optimización

Implementación:

- Mantenimiento predictivo
- Optimización económica
- DERMS y optimización energética
- Análisis de procesos
- Gestión operativa a nivel de flota

Estas capacidades permiten una toma de decisiones proactiva y favorecen la competitividad económica.

Fase 4: Digitalización integrada del ciclo de vida

Ampliar hacia:

- Continuidad de la información del ciclo de vida
- Plataformas de trazabilidad digital
- Integración BIM-GIS
- Integración de gemelos digitales

El objetivo es crear un hilo digital continuo que abarque el diseño, la construcción, la explotación, la certificación y la evolución futura de los activos.

.

Figura13 ilustra cómo se pueden introducir progresivamente las capacidades digitales desde la fase Pre-FEED hasta la optimización y la expansión, comenzando por la gestión de la información básica de arquitectura e ingeniería digital, para luego ampliarse hacia la visibilidad operativa, las capacidades predictivas y de optimización, y, finalmente, un hilo digital integrado a lo largo de todo el ciclo de vida del activo.

Adoption Layer	Pre-FEED	FEED	Design	Construction	Operation	Maintenance	Optimisation / Expansion
Phase 1 Digital Foundation Data governance • OT/IT integration • Cybersecurity-by-design • Industrial connectivity • Standard information models • Common data environments	Digital requirements	Architecture & standards	Embed in design	Handover structures	Operational backbone	Trusted data foundation	Extend to new assets / sites
Phase 1+ Engineering & Simulation Foundation BIM-GIS • Digital twins • Virtual commissioning • Engineering information management	Concept modelling	Simulation validation	Detailed digital models	Virtual commissioning	Model-based operations	Maintain model validity	Debottleneck / retrofit reuse
Phase 2 Operational Visibility & Decision Support Operational dashboards • Data contextualisation • Process analytics • Asset health monitoring • Performance management			Use cases & KPIs	Monitoring commissioning	Operational visibility	Asset condition visibility	Performance improvement
Phase 3 Predictive & Optimisation Capabilities Predictive maintenance • Economic optimisation • Energy / DERMS optimisation • Process analytics • Fleet-level management	Economic scenarios	Operational strategy	Model integration	Data collection for models	Optimisation & decision support	Predictive maintenance	Fleet & lifecycle optimisation
Phase 4 Integrated Lifecycle Digitalisation Lifecycle information continuity • Digital traceability • BIM-GIS integration • Digital twin integration • Continuous digital thread	Digital thread scope	Traceability & handover reqs.	Connect engineering & asset data	Digital handover	Digital thread in operation	Lifecycle information continuity	Certification / expansion / repurposing
Legend Primary focus in this lifecycle phase Early definition, preparation, reuse or progressive extension Not a primary focus							

Figura13 : hoja de ruta práctica recomendada para la adopción de capacidades digitales a lo largo del ciclo de vida de un proyecto de hidrógeno.

6.3 Observación final

La conclusión principal de este informe es que el **sector del hidrógeno no necesita inventar un paradigma digital completamente nuevo**. La mayoría de las capacidades necesarias ya existen y han demostrado su eficacia en otros sectores industriales. Por lo tanto, el **reto para los proyectos de hidrógeno no es la disponibilidad de la tecnología, sino seleccionar las capacidades adecuadas, integrarlas de forma eficaz y adoptar estrategias de implementación que se ajusten a los objetivos del proyecto y a los presupuestos disponibles**.

El informe también muestra que **el riesgo asociado a la adopción de tecnología es, en general, menor de lo que a menudo se percibe**. Muchas de las capacidades evaluadas ya cuentan con el respaldo de implementaciones industriales contrastadas y una experiencia operativa documentada. **Su madurez reduce la incertidumbre en la implementación**, al tiempo que permite a las organizaciones beneficiarse de arquitecturas, metodologías y lecciones aprendidas ya consolidadas.

Las organizaciones que desarrollen desde el principio bases digitales escalables, adopten prácticas industriales contrastadas y amplíen progresivamente sus capacidades **estarán en la mejor posición para lograr operaciones de hidrógeno seguras, eficientes y competitivas a escala industrial**.