

RESUMEN EJECUTIVO

Digitalización de la cadena de valor del hidrógeno

ELABORADO POR



La digitalización se está convirtiendo en un factor fundamental para el despliegue a gran escala del hidrógeno. A medida que los proyectos aumentan en complejidad, las capacidades digitales desempeñarán un papel cada vez más importante a la hora de respaldar el rendimiento operativo, el cumplimiento normativo, los requisitos de certificación y la competitividad a largo plazo de los activos.

El sector del hidrógeno cuenta con una ventaja significativa: muchas de las soluciones digitales necesarias para respaldar los futuros ecosistemas de hidrógeno ya están disponibles y se han implementado con éxito en sectores maduros. Esto reduce el riesgo asociado a la adopción de tecnología y proporciona acceso a enfoques probados que pueden acelerar el despliegue.

La mayor oportunidad no reside en la adopción de tecnologías individuales, sino en establecer unas bases digitales sólidas desde el principio. Las decisiones tempranas sobre la gestión de datos, la interoperabilidad, la ciberseguridad y la continuidad de la información a lo largo del ciclo de vida pueden determinar la capacidad de un proyecto para escalar de manera eficiente con el paso del tiempo.

Un enfoque de despliegue progresivo permite a las organizaciones priorizar las inversiones al tiempo que desarrollan las capacidades necesarias para cumplir con unos requisitos operativos, de optimización y de certificación cada vez más avanzados.

En última instancia, los proyectos mejor posicionados para el éxito a largo plazo serán aquellos que consideren la digitalización no como un coste adicional, sino como un facilitador estratégico de operaciones de hidrógeno seguras, eficientes y competitivas.

Este resumen ejecutivo expone las principales conclusiones del informe elaborado por el Observatorio de Tecnología del Hidrógeno y, en concreto, por sus miembros: **ABB, Cidaut, Emerson, Enagás, Endress+Hauser, Engreen, Inetum, Moeve, NTT Data, Siemens Energy y SLB.**

[ACCEDE AL INFORME COMPLETO](#)

LA DIGITALIZACIÓN COMO FACTOR FACILITADOR DE LA EXPANSIÓN DEL HIDRÓGENO

Se espera que el hidrógeno desempeñe un papel central en la descarbonización de sectores en los que es 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. Este informe examina **cómo las tecnologías digitales pueden apoyar el desarrollo y el funcionamiento de toda la cadena de valor del hidrógeno: upstream, midstream, downstream.**

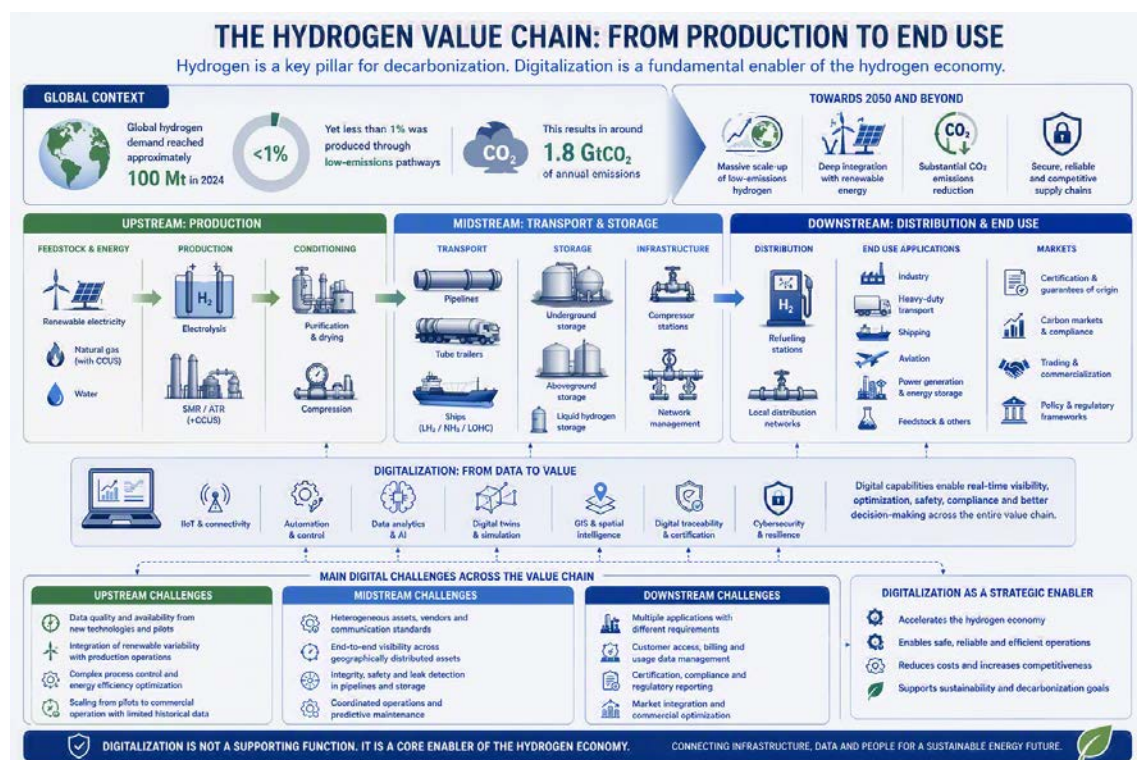


Figura1 . Infografía de la cadena de valor del hidrógeno (elaboración propia)

A medida que los proyectos de hidrógeno avanzan hacia un despliegue industrial a mayor escala, **la digitalización** se está convirtiendo en una capacidad fundamental para mejorar la eficiencia y **respaldar el desarrollo técnico, operativo y económico del sector**. La competitividad en los 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.

En este contexto, la digitalización proporciona un **marco práctico para abordar los retos reales** a lo largo de toda la cadena de valor del hidrógeno. El informe identifica una amplia cartera de **capacidades digitales que pueden contribuir al desarrollo de los ecosistemas del hidrógeno, entre las que se incluyen la ciberseguridad, el análisis avanzado de datos 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.**

PRODUCCIÓN | ▼ TRANSPORTE | ▼ ALMACENAMIENTO | ▼ CONSUMO

El valor de estas capacidades aumenta cuando se implementan como un ecosistema integrado, en lugar de como tecnologías aisladas. En conjunto, 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 y el transporte, así como el control de calidad del producto, la interacción con las redes eléctricas y la coordinación con los centros de demanda industrial.

Capacidades probadas, no es un nuevo paradigma digital

Es importante destacar que muchas de estas capacidades digitales no son conceptos de futuro que esperen una validación tecnológica. Ya hay proyectos de referencia específicos del hidrógeno que están implementando estas tecnologías en ámbitos como la producción a gran escala de hidrógeno verde, los sistemas integrados de hidrógeno verde y amoníaco, la infraestructura de transporte de hidrógeno y la optimización de las redes de hidrógeno. Estos ejemplos demuestran que muchas de las soluciones digitales necesarias para respaldar la futura economía del hidrógeno son ya capacidades industriales probadas.

Esta experiencia se complementa con soluciones y enfoques de implementación desarrollados en sectores digitalmente maduros, como el del petróleo y el gas, el GNL, los sistemas eléctricos, los gases industriales y las industrias de procesos. Muchos de los retos abordados en estos sectores son muy similares a los que se prevén en los ecosistemas del hidrógeno. La combinación de aplicaciones específicas para el hidrógeno y la experiencia industrial directamente transferible reduce significativamente el riesgo de adopción de la tecnología y ofrece a los promotores de proyectos acceso a arquitecturas, metodologías y lecciones aprendidas ya consolidadas.

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 tecnología, sino seleccionar las capacidades adecuadas, integrarlas de forma eficaz y adoptar estrategias de implantación que se ajusten a los objetivos del proyecto y a los presupuestos disponibles: la digitalización debe evaluarse no solo como un coste de implementación, sino como una **palanca de valor estratégico que mejora la nanciabilidad y la competitividad a largo plazo** de los proyectos de hidrógeno.

«El sector del hidrógeno no necesita inventar un paradigma digital completamente nuevo. La mayoría de las capacidades necesarias ya existen».

Esta consideración es especialmente relevante en las condiciones actuales del mercado, en las que muchos proyectos de hidrógeno se enfrentan a importantes restricciones de CAPEX. La presión para concentrar la inversión en activos considerados esenciales para la puesta en marcha inicial puede llevar a que las capacidades digitales se reduzcan, se aplacen o se excluyan durante el desarrollo del proyecto. Aunque esto puede reducir el gasto inicial, **la experiencia de sectores maduros demuestra que adaptar las capacidades digitales tras la puesta en servicio puede resultar sustancialmente más caro que integrarlas durante la fase de diseño.**

El hidrógeno, sin embargo, cuenta con una oportunidad única en comparación con sectores industriales más consolidados. Mientras que las industrias maduras a menudo necesitan modernizar sus activos e incorporar capacidades digitales en infraestructuras desarrolladas hace décadas, muchos proyectos de hidrógeno a gran escala se están diseñando actualmente como desarrollos totalmente nuevos. Esto brinda la oportunidad **de sentar las bases digitales desde el principio e incorporar 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 en el alcance inicial del proyecto.**

Proyectos de nueva creación	Industrias maduras
Digital desde el diseño	Digitalización mediante adaptación
Menores costes de integración	Mayores costes de adaptación
Arquitectura escalable	Infraestructura heredada
Interoperabilidad desde el principio	Sistemas fragmentados

Las decisiones tomadas durante las primeras fases de diseño pueden tener importantes repercusiones en la exhibilidad operativa futura, la escalabilidad, los costes de integración y el rendimiento de los activos. Por lo tanto, los cimientos digitales deben considerarse un componente estratégico del desarrollo del proyecto, en lugar de una capa adicional que se incorpore una vez que la infraestructura física ya esté operativa.



Uno de los principales retos identificados es que el desarrollo de las bases digitales no siempre va al mismo ritmo que el despliegue de la infraestructura física de hidrógeno. A medida que los proyectos crecen en escala, los entornos de datos fragmentados, los sistemas aislados de tecnología operativa y de tecnología de la información, 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 puede permitir la optimización, la integración y la expansión futuras, al tiempo que se evitan costosas modificaciones posteriores en el ciclo de vida de los activos.

Por lo tanto, las bases digitales deben tratarse con una importancia estratégica comparable a la de las tuberías, los electrolizadores o los activos de almacenamiento. Su papel va más allá del apoyo a las operaciones actuales: determinan la capacidad del ecosistema del hidrógeno en su conjunto para integrar nuevos activos, ampliar sus capacidades y evolucionar con el tiempo.

Valor del ciclo de vida y viabilidad financiera de los proyectos

La digitalización también puede mejorar directamente la viabilidad económica de los proyectos de hidrógeno a lo largo de todo el ciclo de vida de un 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.

Estas ventajas no se limitan a una única fase del proyecto. Muchas capacidades digitales pueden generar valor de forma repetida a lo largo del ciclo de vida de un activo. 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.



«La digitalización puede convertirse en una palanca estratégica para reforzar tanto la financiabilidad como la competitividad a largo plazo de los proyectos de hidrógeno».

Se puede obtener un valor similar a lo largo del ciclo de vida gracias a la gestión de la información de ingeniería, las plataformas de datos industriales, las arquitecturas de ciberseguridad y los marcos de trazabilidad digital. Por consiguiente, la digitalización no debe evaluarse únicamente en función de su coste inicial de implementación. Debe considerarse una inversión a largo plazo cuyos beneficios se acumulan a lo largo de todo el ciclo de vida del activo.

Las capacidades digitales pueden influir en el dimensionamiento de los activos, la optimización de la producción, la planificación del mantenimiento, la exhibibilidad operativa, el cumplimiento normativo y el rendimiento global a lo largo del ciclo de vida. Al generar valor en las diferentes fases del proyecto, pueden mejorar la rentabilidad del ciclo de vida y, al mismo tiempo, reducir la incertidumbre para los promotores, los operadores y los inversores. En este contexto, **la digitalización puede convertirse en una palanca estratégica para reforzar tanto la financiabilidad como la competitividad a largo plazo de los proyectos de hidrógeno.**

Certificación, trazabilidad y acceso al mercado

La creciente relevancia de la certificación del hidrógeno también conlleva un papel importante a la digitalización. El hidrógeno se valora cada vez más no solo como molécula, sino también en función de atributos certificados como su origen, su intensidad de carbono y el cumplimiento de los marcos de sostenibilidad. Esta evolución hace que la trazabilidad pase de ser exclusivamente una actividad de cumplimiento normativo a convertirse en una capacidad comercial.

CUMPLIMIENTO (requisito) → CAPACIDAD COMERCIAL

Las plataformas de trazabilidad digital, los pasaportes digitales de productos y las arquitecturas de datos integradas pueden proporcionar la base necesaria para respaldar los sistemas de certificación, los requisitos de acceso al mercado y la confianza de los clientes. **A medida que se desarrollen los mercados del hidrógeno, las organizaciones necesitarán cada vez más información digitalizable para demostrar la procedencia, la sostenibilidad y los atributos de cumplimiento asociados a sus productos.**

La gobernanza como factor crítico de éxito

Al mismo tiempo, el éxito de la implementación de la digitalización no depende únicamente de la tecnología. Las iniciativas digitales pueden no generar los resultados esperados cuando no se definen claramente la titularidad, las responsabilidades y los mecanismos de adopción. La experiencia de los sectores con mayor madurez digital demuestra que la gobernanza digital debe integrarse junto con la ingeniería, las operaciones y la gestión empresarial.

PROPIEDAD | RESPONSABILIDADES | GOBERNANZA | ADOPCIÓN

Las organizaciones que establecen desde el principio modelos de gobernanza e caces tienen más probabilidades de convertir las capacidades tecnológicas en resultados empresariales cuanti cables. Por lo tanto, la transformación digital debe entenderse como un reto organizativo respaldado por la tecnología, y no simplemente como un proyecto tecnológico. La selección e implementación de las capacidades digitales deben ir acompañadas de responsabilidades claras, estructuras de gobernanza y mecanismos que respalden su adopción efectiva en toda la organización.

La etapa actual de desarrollo del sector del hidrógeno brinda una oportunidad especial para abordar estas cuestiones desde el inicio. Dado que muchos activos relacionados con el hidrógeno aún se encuentran en fase de diseño o construcción, el sector tiene la posibilidad de establecer la ciberseguridad desde el diseño, hilos digitales 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 del desarrollo de los proyectos. De este modo, el sector del hidrógeno puede evitar algunas de las limitaciones heredadas a las que se enfrentan las industrias maduras y avanzar hacia su conversión en una industria energética nativa digital.

Madurez y transferibilidad de las capacidades digitales

La evaluación de la madurez realizada muestra que **las capacidades digitales aplicables al hidrógeno pueden agruparse, a grandes rasgos, en tres categorías.** La **primera comprende tecnologías con un alto grado de madurez industrial que pueden transferirse a aplicaciones de hidrógeno con una adaptación específica al sector limitada.** Entre ellas se incluyen la ciberseguridad para infraestructuras críticas, el análisis económico y la optimización tecno-económica, la gestión de operaciones y la optimización basada en DERMS, la monitorización de gasoductos y la gestión de la integridad, la detección de fugas, la integración y contextualización de datos industriales, la integración BIM-SIG para la planificación de infraestructuras, el mantenimiento predictivo de equipos rotativos, y los sistemas de automatización y control integrados.

Estas capacidades están respaldadas por múltiples referencias industriales e implementaciones demostradas, que incluyen tanto ejemplos específicos del hidrógeno como aplicaciones en sectores adyacentes con requisitos operativos muy similares. Sus principios técnicos subyacentes, arquitecturas y ujos de trabajo ya están consolidados y, por lo tanto, pueden contribuir a acelerar el despliegue del hidrógeno sin necesidad de avances tecnológicos significativos.

Transferibilidad Alta	Transferibilidad Media	Transferibilidad Baja
Soluciones industriales probadas	Tecnologías maduras que requieren adaptación	Capacidades emergentes
Adaptación limitada	Adaptación específica al hidrógeno	Despliegue a gran escala limitado

Una segunda categoría está formada por tecnologías que, aunque técnicamente maduras, requieren una mayor adaptación a las condiciones de funcionamiento específicas del hidrógeno. Entre ellas se incluyen los gemelos digitales y los ecosistemas de simulación, la optimización basada en la inteligencia artificial y el análisis avanzado, los sistemas de gestión energética interactivos con la red, la optimización operativa de toda la flota y el análisis avanzado de procesos. En estos ámbitos, la principal limitación no es necesariamente la disponibilidad o la madurez de la tecnología subyacente, sino la disponibilidad de conjuntos de datos operativos representativos, modelos validados e historiales de funcionamiento a largo plazo. A medida que los proyectos de hidrógeno aumenten en escala y complejidad operativa, y a medida que se disponga de más experiencia operativa, se espera que estas capacidades cobren cada vez más importancia.

La tercera categoría abarca áreas de capacidad emergentes y las brechas que aún persisten, en las que las implementaciones de referencia industriales a gran escala siguen siendo limitadas. Entre estas áreas se incluyen las arquitecturas de trazabilidad digital para la certificación RFNBO y los pasaportes digitales de productos; los ecosistemas de certificación interoperables a gran escala; los modelos de gobernanza digital organizativa adaptados específicamente al hidrógeno; la gestión escalable del ciclo de vida de los gemelos digitales en ecosistemas de proveedores heterogéneos; los modelos predictivos específicos para el hidrógeno en materia de degradación, seguridad y fiabilidad; y la integración de la información sobre certificación, operativa y comercial entre múltiples partes interesadas. En muchos de estos casos, las tecnologías subyacentes ya existen, pero su implementación práctica a gran escala industrial sigue siendo relativamente inmadura en comparación con otros ámbitos de capacidades digitales. Esta situación refleja tanto la fase inicial del desarrollo del mercado del hidrógeno como la continua evolución de los marcos normativos y de certificación. El informe clasifica cada capacidad digital en las categorías mencionadas: 1.ª categoría (alta transferibilidad), 2.ª categoría (media transferibilidad) y 3.ª categoría (baja transferibilidad), y las asigna a los segmentos correspondientes de la cadena de valor del hidrógeno, destacando aquellas que son más específicas de cada parte de la infraestructura.

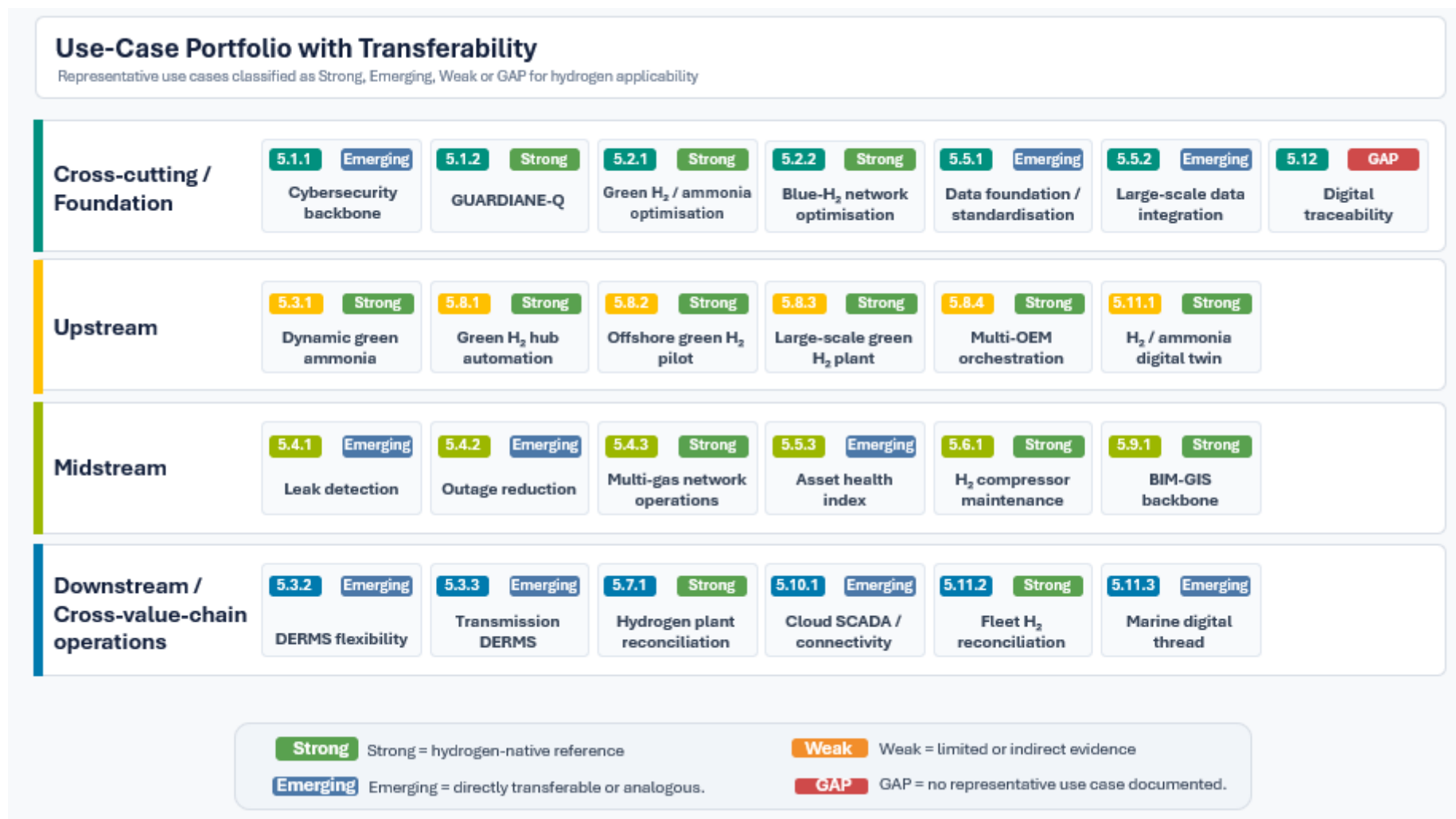


Figura 2: Cartera de soluciones digitales y evaluación de la transferibilidad a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno.

Una hoja de ruta progresiva para el despliegue digital

Teniendo en cuenta estos diferentes niveles de madurez y las limitaciones de inversión que afectan a los proyectos de hidrógeno, las organizaciones deben evitar intentar implementar todas las capacidades digitales disponibles de forma simultánea. En su lugar, **la digitalización puede seguir una hoja de ruta progresiva y escalable que permita introducir las capacidades en función de las necesidades del proyecto, al tiempo que se mantienen las bases necesarias para el desarrollo futuro.**



La primera fase se centra en sentar las bases digitales. Esto incluye la integración de OT/IT, la gobernanza de datos, la conectividad industrial, la ciberseguridad desde el diseño, BIM-GIS, gemelos digitales, puesta en marcha virtual, modelos de información estándar y entornos de datos comunes. El objetivo es garantizar que las futuras capacidades digitales se construyan sobre bases de datos fiables e interoperables, teniendo en cuenta al mismo tiempo el dimensionamiento de los activos y el análisis de viabilidad económica.

Una vez sentadas estas bases, la segunda fase introduce la visibilidad operativa y las capacidades de apoyo a la toma de decisiones. Los paneles operativos, la contextualización de datos, el análisis de procesos, la supervisión del estado de los activos y la gestión del rendimiento pueden reforzar la eficiencia operativa y el conocimiento de la situación. Al mismo tiempo, la explotación de los activos genera los conjuntos de datos necesarios para desarrollar aplicaciones más avanzadas en las etapas posteriores.

La tercera fase introduce capacidades predictivas y de optimización, entre las que se incluyen el mantenimiento predictivo, la optimización económica, los sistemas de gestión de recursos energéticos distribuidos (DERMS) y la optimización energética, el análisis de procesos y la gestión operativa a nivel de flota. Estas capacidades permiten a las organizaciones pasar de la supervisión y la toma de decisiones reactiva a una gestión más proactiva de los activos y las operaciones, al tiempo que respaldan directamente la competitividad económica.

La cuarta fase amplía la digitalización hacia la gestión integrada del ciclo de vida. La continuidad de la información del ciclo de vida, las plataformas de trazabilidad digital, la integración BIM-SIG y la integración de gemelos digitales pueden contribuir a la creación de un hilo digital continuo que abarque el diseño, la construcción, la explotación, la certificación y la futura evolución de los activos.

A través de este enfoque progresivo, las capacidades digitales pueden introducirse desde las primeras fases del proyecto y ampliarse a medida que los proyectos evolucionan. En primer lugar, pueden establecerse las arquitecturas digitales fundamentales y la gestión de la información de ingeniería, seguidas de la visibilidad operativa, las capacidades predictivas y de optimización y, en última instancia, un entorno digital integrado que abarque todo el ciclo de vida de los activos.

Este enfoque permite a las organizaciones equilibrar la ambición tecnológica, los riesgos del proyecto y la inversión disponible. Además, evita la necesidad de implementar todas las capacidades desde el principio, al tiempo que garantiza que las decisiones iniciales de arquitectura y diseño no se conviertan en obstáculos para la integración y la escalabilidad futuras.



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							

Figura2 . Hoja de ruta práctica recomendada para la adopción de capacidades digitales a lo largo del ciclo de vida de los proyectos de hidrógeno.

Hacia ecosistemas de hidrógeno digitalmente nativos

En conjunto, el informe sugiere 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 de establecer bases digitales escalables capaces de respaldar el diseño, la ingeniería, las operaciones, la certificación, la optimización y la expansión futura. Las organizaciones que aborden estas carencias de forma proactiva probablemente se beneficiarán de menores costes a lo largo del ciclo de vida, una mayor flexibilidad operativa, un menor riesgo de implementación y una escalabilidad más rápida a medida que maduren los mercados del hidrógeno.



Por lo tanto, la evaluación global sitúa la digitalización como un elemento integral de la industrialización del hidrógeno. El riesgo asociado a la adopción de tecnología en muchas de las capacidades analizadas es, en general, menor de lo que a menudo se percibe, ya que numerosas soluciones cuentan ya con el respaldo de implementaciones industriales contrastadas y una experiencia operativa documentada. Su madurez permite que los proyectos de hidrógeno se beneficien de arquitecturas y metodologías consolidadas, así como de las lecciones aprendidas.

Por lo tanto, el factor diferenciador no será simplemente el acceso a las tecnologías digitales, sino la capacidad de las organizaciones para seleccionar las capacidades que mejor respondan a los requisitos reales del proyecto, integrarlas de forma eficaz y ampliar progresivamente su entorno digital en consonancia con los objetivos del proyecto y los presupuestos disponibles.

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

ACCEDE AL INFORME COMPLETO

Observatorio
Tecnológico
del **Hidrógeno**