

## LA SEGURIDAD EN LA INDUSTRIA DEL HIDRÓGENO VERDE

*El papel que el hidrógeno verde jugará en el marco de la estrategia de la Comisión Europea para la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y proceso de descarbonización de la economía, va a ser determinante.*

*El objetivo de todos los agentes implicados en la industria asociada al hidrógeno verde (operadores, usuarios, administración, aseguradoras) es conseguir los más altos niveles de seguridad: tanto en el diseño e ingeniería, como en su operación y mantenimiento, asegurando la minimización de ocurrencia de accidentes en sus instalaciones y por ende la continuidad de la operación y del negocio.*

**INERCO, corporación multinacional que ofrece soluciones para el desarrollo industrial sostenible**, analiza en este artículo elaborado especialmente para la revista Gerencia de Riesgos y Seguros, cómo, en base a las características y propiedades del hidrógeno, el concepto de seguridad aplicable en las distintas fases de su gestión, debe ir mucho más allá del mero cumplimiento de las obligaciones legales, los reglamentos industriales, la normativa técnica o los estándares de diseño. Para ello, se requerirá del empleo experimentado de herramientas avanzadas para la identificación, evaluación y gestión de los riesgos, que servirán como soporte para la administración y la toma de decisiones.

### La producción del hidrógeno y la estrategia de la Comisión Europea

En la actualidad, el 95% del hidrógeno que se produce en la UE se obtiene fundamentalmente por reformado con vapor de metano con emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas (en torno a 330 g CO<sub>2eq</sub>/kWh<sub>H<sub>2</sub></sub>)<sup>2</sup>. Es el denominado **hidrógeno gris** o “derivado de fósiles” en la estrategia de la Comisión Europea<sup>3</sup>.

Este proceso puede ser complementado con captura, uso y almacenamiento de CO<sub>2</sub> para dar origen al **hidrógeno azul**, que puede tener una huella de carbono entre el 70 y 90% inferior. La mayor parte del 5% restante de la producción actual se obtiene como coproducto de la industria del cloro-sosa que emplea electrolizadores alcalinos.

La vía electrolítica está llamada a tener un crecimiento muy rápido en virtud de las políticas comunitarias y nacionales. Pero para que el hidrógeno pueda ser calificado como renovable (**verde**) la electricidad tiene que tener esta característica, pudiendo alcanzarse huellas de carbono de menos de 30 g CO<sub>2eq</sub>/kWh<sub>H<sub>2</sub></sub>. Con una cierta dosis de realismo, la Comisión identifica el “hidrógeno bajo en carbono” como aquel que tiene una huella de carbono significativamente reducida, sea producido por reformado de metano con captura o por electricidad parcialmente renovable.

En la actualidad, el hidrógeno se usa principalmente en refinerías para eliminar contaminantes y generar productos de calidad acordes con la demanda (33%), fabricación de amoníaco (27%), de metanol (11%) y producción de acero por reducción directa de mineral de hierro (3%). El 64% de la producción de hidrógeno es on-site, cautiva, destinada a procesos de la misma factoría.

El Green Deal de la UE establece como objetivo la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) al 50% en 2030, siendo pues necesario un rápido proceso de descarbonización de la economía. Para ello, entre otras líneas de actuación, la Comisión Europea publicó en julio de este año la Estrategia Europea del Hidrógeno ([COM\(2020\) 301 final](#)), en la que la producción de hidrógeno verde por electrolisis del agua mediante electricidad renovable constituye la tecnología clave y permitirá la penetración en el sistema energético de cantidades crecientes de aquella en diferentes formas conocidas como Power-to-X.

Esta estrategia persigue que el hidrógeno pase a ser una parte intrínseca de un sistema energético integrado que disponga en 2030 de, al menos, 40 GW de electrolizadores que produzcan 10 millones de toneladas/año, y en la que el hidrógeno sea el pilar básico de un sistema energético descarbonizado y la materia prima para procesos industriales entre los que destaca la fabricación de combustibles sintéticos.

En la **Figura 1** se refleja esta concepción, en la que los recursos para obtener hidrógeno son diversos, desde gas natural y biometano a electricidad renovable. La prioridad es, evidentemente, que la mayor parte del hidrógeno sea renovable (verde), obtenido por electrolisis con electricidad de origen eólico y solar, debido a que es la opción más compatible con el objetivo de neutralidad climática para 2050.

## ¿Cuáles son las propiedades más relevantes del hidrógeno en relación con la seguridad y otros combustibles?

El hidrógeno es un gas incoloro e inodoro, no tóxico y clasificado como gas extremadamente inflamable de acuerdo con la normativa en vigor. En efecto, para provocar la ignición del hidrógeno hace falta 15 veces menos energía que para el gas natural. Y el rango de concentraciones en el aire en los que el hidrógeno es inflamable, con llama invisible para el ojo humano, es 10 veces mayor que para la gasolina.

Tiene una **densidad** muy baja. Es 14 veces más ligero que el aire y 22 veces más ligero que el propano (**Figura 2**) y se difunde muy rápidamente. En caso de fuga se elevará y dispersará rápidamente (a más de 20m/s), a diferencia de lo que ocurre, por ejemplo, con las fugas de propano u otros combustibles, que tienden a acumularse cerca del suelo al ser más denso que el aire. En cualquier caso, es imprescindible abordar evaluaciones de riesgos de explosión incorporando las medidas adecuadas (equipos aptos para uso en atmósferas clasificadas, ventilación, etc.) para garantizar una adecuada prevención frente a los riesgos de explosión.

La combustión de hidrógeno tiene algunas particularidades relevantes.

- **La temperatura de autoignición**, temperatura más baja a la que una sustancia entra en ignición espontáneamente sin necesidad de chispa o llama, es muy parecida a la del gas natural y mucho más alta que la del vapor de gasolina (**Figura 3**), lo cual supone una ventaja desde el punto de vista de la seguridad.
- Por otro lado, el hidrógeno presenta un amplio rango de concentraciones en aire en el que puede producirse la ignición (**rango de inflamabilidad**, entre el 4 y el 75% en volumen), mucho mayor que el de otros combustibles gaseosos (**Figura 4**). Sin embargo, la concentración de hidrógeno a partir de la cual la mezcla es inflamable (el límite inferior de inflamabilidad) es mayor que la del propano y la de vapores de gasolina, lo que también supone un punto a favor desde el punto de vista de la seguridad.
- **La energía requerida**, en las condiciones de combustión óptimas, para iniciar la combustión es mucho más baja que para otros combustibles, por lo que una pequeña chispa puede iniciar la combustión (**Figura 5**), lo que debe ser tenido en cuenta al dotarse de equipos de trabajo que puedan actuar como potenciales fuentes de ignición, a pesar de que la elevada velocidad de difusión pueda jugar a nuestro favor, en su caso.
- Por último, la combustión de hidrógeno da origen a una **llama invisible** para el ojo humano, por lo que se usan detectores de gas y de llama y cámaras de visión térmica para poder identificarla. La necesidad de estos equipos es relevante pues la radiación térmica originada no produce sensación de calor, por estar mayoritariamente en el rango UV.

Estas propiedades analizadas hacen que las instalaciones industriales que generan, procesan y almacenan hidrógeno tengan asociado un determinado nivel de riesgo sobre elementos vulnerables (personas, medio ambiente e instalaciones o activos industriales), originado por eventos no deseados, siendo necesario disponer de las suficientes barreras de seguridad, así como de una adecuada gestión de los riesgos, para evitarlos o minimizar sus potenciales consecuencias.

### La gestión de la seguridad en la industria del hidrógeno verde

El principal objetivo de todos los agentes implicados en la industria asociada al hidrógeno verde es conseguir los más altos niveles de seguridad: tanto en el diseño e ingeniería, como en su operación y mantenimiento, asegurando la minimización de ocurrencia de accidentes en sus instalaciones y por ende la continuidad de la operación y del negocio.

Dadas las características anteriormente comentadas del hidrógeno, el concepto de seguridad

aplicable debe ir mucho más allá del mero cumplimiento de las obligaciones legales, los reglamentos industriales, la normativa técnica o los estándares de diseño. Se requiere, además, el empleo experimentado de herramientas avanzadas para la identificación, evaluación y gestión de los riesgos, como soporte para la administración y la toma de decisiones.

Este criterio es aplicado ya en la actualidad por los operadores de instalaciones que producen hidrógeno por otras vías (especialmente el denominado 'hidrógeno gris, por reformado con vapor de metano) en refino, industria química y petroquímica. La entrada en la escena de la producción de hidrógeno de nuevos actores de sectores distintos requiere, sin lugar a dudas, replicar los elevados estándares de seguridad puestos en práctica por estas actividades.

Con el objetivo de alcanzar estos altos estándares de seguridad, a continuación, se desarrollan de forma breve las principales herramientas disponibles y aplicables en la gestión de riesgos en la industria en las diferentes etapas del ciclo de vida de las instalaciones (**Figura 6**).

Muchas de ellas no solo son prácticas habituales en la industria sino prescripciones del sector asegurador encaminadas a minimizar los riesgos de que un evento no deseado o una indisponibilidad o parada en el proceso ocasione daños o pérdidas de producción.

## Seguridad en el diseño

En la etapa de diseño e ingeniería (conceptual, básica y de detalle), las plantas deben concebirse con seguridad intrínseca, para reducir al mínimo el riesgo tanto en su interior como en el exterior. Es clave, en esta fase, la realización de análisis de riesgos exhaustivos y la aplicación de técnicas adecuadas para gestionar todas las posibles situaciones de peligro.

Son innumerables las distintas herramientas (HAZID, HAZOP, Análisis SIL, LOPA, FMECA, QRA, BRA, FERA, FIRE&GAS, ALARP, BOW-TIE, ATEX, Human Factors Engineering, Análisis de Riesgos por Factor Humano (Human HAZOP, SCTA), etc.) que pueden ser utilizadas en función de la fase de la ingeniería en la que nos encontremos, el proyecto a desarrollar, el objetivo perseguido y la política de gestión de riesgos que el promotor del proyecto y la ingeniería hayan definido como válidas para alcanzar dichos objetivos. Su aplicación permite durante todo el ciclo de vida de una instalación industrial obtener importantes beneficios en seguridad, tales como:

- **Identificar las situaciones de peligro de origen interno o externo** que puedan dar lugar a un escenario de accidente, en el que esté implicado el hidrógeno u otras sustancias presentes, o en algunas de las operaciones en fase de construcción y explotación de la planta, incluyendo aquéllas originadas por el Factor Humano.
- **Evaluar los daños ocasionados de potenciales accidentes**, cuantificando los efectos y consecuencias sobre elementos vulnerables (personas, medio ambiente y bienes)
- **Determinar las probabilidades de ocurrencia** de los sucesos iniciadores de una situación de peligro y sus diferentes evoluciones potenciales.

- **Cuantificar y evaluar los riesgos.**
- **Identificar las barreras de seguridad** preventivas y mitigadoras a disponer para controlar los riesgos hasta niveles aceptables.

Por referir solo algunos ejemplos prácticos de aplicación de algunas de estas herramientas para la fase de diseño o de buenas prácticas recomendadas por las compañías de seguros, y considerando las propiedades del hidrógeno antes comentadas, tenemos los siguientes análisis:

- **Análisis SIL**, que permite el diseño e implantación del ciclo de vida de los Sistemas Instrumentados de Seguridad (sistema de enclavamientos de emergencia o interlocks), de acuerdo a la normativa de buenas prácticas sobre Seguridad Funcional, para el correcto diseño, operación y mantenimiento de estos sistemas con criterios de seguridad y fiabilidad.
- **Fire&Gas**, orientados al correcto diseño y ubicación de los detectores de fuego e hidrógeno como barrera de seguridad, para identificar los potenciales eventos peligrosos en fases tempranas, activar los mecanismos de respuesta necesarios y mitigar las posibles consecuencias. Estos estudios Fire&Gas permiten una ubicación optimizada de los distintos tipos de sensores, siendo muy importante el diseño del tratamiento de las señales de medida y su transmisión, para que la activación de protocolos sea rápida y eficaz.
- **FERA (Fire and Explosión Risk Assessment)**, definir la más adecuada y optima implantación y ubicación de equipos de proceso, y en particular de sus equipos críticos, en función de las consecuencias y riesgos analizados, determinando asimismo las necesidades constructivas de éstos para soportar dichos efectos adversos
- **BRA (Building Risk Assessment)**, con la finalidad de definir la mejor ubicación de los edificios y salas de control, así como los parámetros de su diseño estructural para garantizar la integridad del mismo en el caso de que se vea afectado por valores de sobrepresión y/o radiación térmica que requieran un nivel de protección especial para las personas y los sistemas de control de las instalaciones que albergan en su interior.
- **Estudios ATEX**: Clasificación de Áreas peligrosas, Evaluaciones de Riesgos de Explosión y Documento de Protección Contra Explosiones, en cumplimiento a las obligaciones impuestas por el RD 681/03. La realización de este tipo de estudios debe considerar las condiciones específicas de cada instalación, evaluando de manera pormenorizada cada potencial fuente de ignición – una a una – en cada área clasificada. Como buenas prácticas, se empieza a extender la implantación de etiquetas NFC que incluyan la información relevante del equipo, también en materia ATEX, lo que facilita la gestión de la prevención de riesgos de explosión motivados por equipos eléctricos y mecánicos; además, se debe prever la actualización periódica y ante deterioro o sustitución de dichos equipos; y por último, la evaluación debe tener en cuenta, de nuevo, el potencial papel del factor humano como origen de fuentes de ignición.

- **Human Factors Engineering**, con la finalidad de verificar que el diseño de las nuevas instalaciones: a) cumple con los estándares en materia de prevención; b) responde a criterios ergonómicos; c) garantiza la accesibilidad a elementos críticos en situaciones de emergencia; d) minimiza los riesgos de accidente potencialmente provocados por el Factor Humano; e) maximiza la operabilidad de las instalaciones. El acometer este tipo de análisis en fase de diseño (conceptual, básico y/o de detalle), elimina el coste de implantación de medidas correctoras una vez las instalaciones han sido construidas y entregadas. El HFE, se puede llevar a cabo mediante integración de especialistas HFE en los equipos de diseño, o mediante la revisión de modelos 3D a distancia de los proyectos a medida que se vayan generando en las diferentes fases de desarrollo de la ingeniería del Proyecto, o mediante sesiones HFE, similares a las sesiones HAZOP.

## Seguridad en la operación

La operación requiere la implementación de sistemas de gestión de seguridad de procesos que garanticen el funcionamiento adecuado de los activos. Dichos sistemas se basan en dos pilares fundamentales: el compromiso de la organización con la seguridad y el conocimiento y gestión de los riesgos.

La práctica habitual en los sectores Oil&Gas y energético, es adoptar e implementar estándares de Sistema de Gestión de Seguridad de Procesos (**PSM**) con el objetivo principal evitar la materialización de accidentes en aquellas instalaciones donde se utilicen, almacenen, produzcan y/o manipulen sustancias con características peligrosas, como es el caso del hidrógeno.

**PSM** se fundamenta en el desarrollo e implementación de los siguientes **pilares fundamentales** de la seguridad:

- Alcanzar un compromiso y **liderazgo organizacional** y personal inquebrantable con la seguridad de los procesos y operaciones.
- Entender los riesgos y peligros derivados de los procesos químicos para su **identificación y evaluación**.
- **Gestionar el riesgo** disponiendo de las herramientas que faciliten su monitorización, seguimiento, alarma, así como de barreras de seguridad disponibles y fiables.
- Aprender de la experiencia incorporando las lecciones aprendidas en la **revisión y mejora**.

La **implantación de PSM** abordará en el **ciclo de vida de las instalaciones (Figura 7)** los aspectos y cuestiones fundamentales relacionadas con la seguridad como con:

- **Diseño**, ingeniería y construcción **seguras**
- **Evaluación de peligros**
- **Alarmas** eficientes
- **Control efectivo** del proceso
- **Procedimientos de puesta en marcha y operación de las instalaciones** adecuados
- **Gestión de las modificaciones**
- **Inspección**, prueba y mantenimiento de equipos

- **Formación** del personal
- Relación con **proveedores y suministradores**.
- **Comunicaciones** en la organización y en sus gestores

## **Análisis de Riesgos por Factor Humano**

El análisis de accidentes industriales tristemente célebres muestra una clara lección: en la mayoría de ellos, se asigna un papel crucial a las causas asociadas al error humano.

A pesar de ello, y paradójicamente, el denominado como Factor Humano no ha jugado el papel relevante que le corresponde en los análisis de riesgos hasta hace bien poco. La aparición de metodologías de Análisis de Riesgos por Factor Humano, como el análisis de tareas críticas (SCTA), el Human HAZOP u otras aproximaciones sistemáticas, ha venido a paliar en cierto modo este déficit. Con este tipo de herramientas, la aparente multiplicidad de desviaciones que el ser humano puede introducir en los sistemas queda parametrizada, y el análisis de riesgos se ve completado, de manera que se adopten medidas correctoras y de control (como se muestra en el ejemplo de la **Figura 8**) que lleven a minimizar la probabilidad de que se produzcan comportamientos anómalos (equivocaciones, distracciones, lapsus o violaciones) y, sobre todo, que lleven a minimizar la trascendencia o consecuencias de dichos comportamientos anómalos.

Para ello, es imprescindible conocer los condicionantes reales que pueden llevar a que se produzcan fallos en la operación de las instalaciones (PIF, Performance Influencing Factors, en su versión anglosajona). Los Análisis de Riesgos por Factor Humano analizan de manera sistemática las desviaciones que los operadores pueden introducir en los sistemas, teniendo en cuenta los PIF, evaluando las consecuencias esperables (accidentales o no), considerando las salvaguardas disponibles, y definiendo las medidas correctoras y de control que es preciso introducir. Estas medidas correctoras a introducir, que son la verdadera razón de acometer estos análisis, pueden abarcar implantación de elementos de seguridad de proceso, indicadores, reubicación de equipos o mandos, etc., y no sólo medidas de formación e información o de carácter organizativo.

## **Fiabilidad y mantenimiento**

La integridad de un activo físico representa la capacidad de éste para realizar sus funciones de forma eficaz y eficiente, contribuyendo al cumplimiento de objetivos individuales, colectivos y de grupos de interés, a la vez que se preserva su estado y conservación, salvaguardando en todo momento la seguridad y el medio ambiente.

Esta visión del comportamiento operativo de un determinado equipo, sistema o instalación se fundamenta en la gestión integrada de los siguientes aspectos durante la fase de explotación de los activos de una planta de hidrógeno:

- **Desempeño del activo físico** o nivel de eficacia logrado por un activo en términos de

Disponibilidad (capacidad para atender la demanda de funcionamiento del activo físico), Fiabilidad (capacidad del activo de no dejar de cumplir sus funciones) y Mantenimiento (capacidad de conservar y recuperar la funcionalidad del activo físico ante procesos de degradación o averías).

- **Riesgo asociado a la explotación del activo físico**, entendido como el daño que podría generarse en un cierto intervalo de tiempo como consecuencia de la aparición de averías en él, debe ser gestionado apropiadamente bajo un enfoque proactivo que priorice los enfoques preventivos frente a los comportamientos reactivos y minimice los impactos negativos que pudieran derivarse de dichos fallos
- **Coste incurrido**, que permita la obtención de un beneficio sostenible en el tiempo, generando permanentemente unos ingresos que superen a los costes asociados al desarrollo de las actividades empresariales

La integridad de activos (Asset Integrity) requiere la adopción de estrategias optimizadas de mantenimiento y fiabilidad de los equipos, las infraestructuras y las barreras de seguridad, con herramientas como las que establece la norma ISO 55000 para la optimización de las instalaciones.

Cada instalación y entorno operativo requiere de un proceso de análisis para la definición de las actividades, técnicas, herramientas y secuencia de implantación que resulten más adecuadas en cada caso (**Figura 9**), teniendo en cuenta su realidad operacional, objetivos, intereses, capacidad y recursos, grado de madurez de la organización y plazo disponible.

Por ejemplo, son de gran utilidad y habitualmente empleadas en los sectores industriales Oil&Gas y Energético, y recomendadas por las compañías aseguradoras las siguientes entre otras:

- **Estudios RAM** (Reliability, Availability and Maintainability), para la cuantificación de la probabilidad de potenciales fallos de los equipos, estimando la disponibilidad de la planta de generación de hidrógeno y focalizando las acciones de mantenimiento con una óptima relación coste/beneficio.
- **Estudios RCM** (Reliability Centered Maintenance), persigue la asignación óptima de los recursos disponibles para el Mantenimiento de una instalación, focalizándose en los activos más críticos para la funcionalidad de la instalación y, por tanto, para la continuidad del negocio. RCM determina el tipo y nivel de Mantenimiento que se debe aplicar sobre los equipos en función del riesgo asociado a sus fallos potenciales.
- **Estudios RBI** (Risk Based Inspection), para monitorizar el estado y evolución de los componentes estáticos en la instalación, basándose en la realización de inspecciones para verificar el estado mecánico y de integridad de los equipos en función del riesgo que introduce cada elemento. Prescribe la serie de inspecciones y ensayos con el objetivo de obtener la mayor cantidad posible de información sobre la vida remanente de los elementos y los equipos.

Una adecuada estrategia de integridad de activos y aplicación de sus herramientas incrementará la fiabilidad y disponibilidad de una planta de hidrógeno, minimizando riesgos y garantizando el

retorno de la inversión realizada en su implementación.

## Planificación de emergencias y continuidad del negocio

Adicionalmente y no menos importante un aspecto clave como barrera de seguridad, es la necesaria planificación ante emergencias y continuidad del negocio (**Figura 10**) en la que se establecerá una respuesta organizada de todos los medios humanos y materiales, para limitar las consecuencias en caso de accidente.

En cuanto a la organización y medios humanos es clave establecer las operativas del plan de emergencia, así como los procedimientos de actuación a seguir. En relación a estos últimos, es también práctica recomendada desde el sector asegurador el que se desarrollen e implementen los denominados **Fire Pre Plan** para cada escenario de accidentes en los que se puedan ver involucrado el hidrógeno u otras sustancias como oxígeno, así como en los diferentes equipos de procesos (electrolizadores, compresores, almacenamientos, etc.). En los Fire Pre Plan se detallan, por ejemplo: plano detallado de la zona y alcance de consecuencias, medios contra incendios/emergencias disponibles y a emplear o movilizar, equipos calientes o críticos cercanos afectados, Instrucciones de actuación del personal de operaciones y de los equipos de emergencia.

Asimismo, elementos como los sistemas de detección y las protecciones contra incendios pasivas y activas son aspectos fundamentales en el diseño de las instalaciones y de la respuesta de emergencia. En este sentido, los operadores, deberán considerar los riesgos específicos del hidrógeno en la definición de dichas protecciones y sistemas. La planificación basada en la mejora continua requiere la formación teórica y práctica del personal clave y la realización de ejercicios y simulacros.

Y, por último, en un plano de gestión y operatividad superior a la propia gestión de crisis y Planes de Emergencia, se encuentran los Planes de Continuidad de Negocio que permitirán identificar las potenciales amenazas sobre la operación de la planta y establecer las adecuadas estrategias de continuidad para garantizar la resiliencia de las instalaciones de hidrógeno verde.

## Conclusiones

Se puede observar y concluir que, la aplicación de todas estas herramientas para la identificación, evaluación y gestión de los riesgos en instalaciones de hidrógeno verde permiten concebir instalaciones intrínsecamente seguras, identificar y evaluar los riesgos (el riesgo cero no existe), garantizar su adecuada gestión, minimizar la materialización de accidentes y establecer los mecanismos de respuesta para una mayor disponibilidad de los activos, contribuyendo así a la continuidad del negocio.

Por ello, resulta extraordinariamente importante que los promotores y operadores de proyectos de hidrógeno verde den un lugar preferente a su seguridad y riesgos en todo el ciclo de vida de los proyectos con el soporte de especialistas en los diferentes ámbitos descritos.

En este sentido, que los objetivos de la Comisión y de los promotores de proyectos se cumplan depende, entre otros factores, de la creación de una industria del hidrógeno verde segura y fiable y en la que la aparición de 'showstoppers' se vea minimizada por una gestión solvente y experimentada, que sea percibida así por las partes interesadas.

**Autores:**

**Gabriela Reyes Delgado.**

**Jefe del Departamento de Seguridad Industrial de INERCO.**

**Juan Santos Remesal.**

**Director de la División de Seguridad Industrial de INERCO.**

**Pablo Navarro González.**

**Director Gerente de INERCO Prevención de Riesgos.**