



## Introducción

El hidrógeno es una alternativa limpia al metano, también conocido como gas natural. Es el elemento químico más abundante y se estima que aporta el 75% de la masa del universo. El hidrógeno se puede producir a partir de una variedad de recursos, como el gas natural, la energía nuclear y la energía renovable como la solar y la eólica.

El hidrógeno ha ganado atención como potencial portador de energía limpia debido a que su combustión produce únicamente vapor de agua. Las pilas de combustible utilizan hidrógeno para generar electricidad combinándolo con oxígeno del aire. Sin embargo, desafíos como la producción, el almacenamiento y el transporte eficientes obstaculizan su adopción generalizada. La investigación en curso se centra en métodos sostenibles como la electrólisis alimentada por fuentes renovables. Si se aprovecha eficazmente, el hidrógeno podría desempeñar un papel vital en la reducción de las emisiones de carbono y el avance de un futuro energético más sostenible.

## Lecciones claves a partir de explosiones que involucran al hidrógeno

### Caso 1 – Explosión de Hidrógeno en una planta de generación:

El 8 de enero de 2007, un suministro rutinario de hidrógeno gaseoso (GH<sub>2</sub>) provocó una explosión mortal en la central eléctrica de Muskingum, Ohio. Hacia las 9 a.m. del 8 de enero de 2007, el personal maniobró un remolque tubular hasta su posición en la central eléctrica. El remolque contenía diez cilindros llenos de hidrógeno a 2500 psi (17,2 MPa) que se descargarían en dos recipientes de almacenamiento. Estos tanques pueden contener hasta 15.000 pies cúbicos almacenados a 2.000 psi, equivalente a casi 35 kg de hidrógeno. La entrega era una operación de rutina diaria en la planta, en la que el hidrógeno se usa para enfriar los generadores. Pero lo que pasó ese día fue todo menos rutinario. Después de la falla de un disco de ruptura, el hidrógeno perdió contención por el venteo y rápidamente fugó a la atmósfera bajo un toldo. Poco después la mezcla combustible hizo ignición. La explosión provocó la muerte del conductor del camión de reparto, que murió mientras corría de regreso a su vehículo para apagar el hidrógeno. Diez empleados de la planta cercana también resultaron heridos en el evento y la enérgica explosión destruyó múltiples estructuras en la planta.

### Aprendizajes Claves:

El evento inició con la falla prematura de un disco de ruptura en el tanque de almacenamiento del sitio. Esta falla, por sí misma, no debería haber provocado la explosión. El hidrógeno debería haber escapado a través de un sistema de ventilación adecuado y disiparse el ambiente sobre la cubierta sin causar daño. En su lugar, el gas presurizado provocó que el sistema de ventilación fallara, permitiendo que escapara el hidrógeno. Luego, el gas hidrógeno se acumuló debajo de un toldo mal diseñado antes de encenderse. El equipo de investigación pudo estimar que la cantidad de hidrógeno acumulado antes de la ignición era de 17,7 kg. Puntos adicionales son el disco de ruptura de tamaño incorrecto, falta de gestión de cambio para el mantenimiento del disco, indicios de corrosión en el disco, tuberías de hidrógeno en mal estado, diseño inadecuado de las tuberías de hidrógeno, cubierta de lluvia no diseñada para ventilación de hidrógeno, la explosión se originó debajo del toldo fallando al aprender de incidentes pasados.

### Caso 2 – Explosión de Compresor de Hidrógeno durante mantenimiento.

El 15 de enero de 2016 se produjo un incendio y una explosión en el edificio de un compresor de gas en Long Lake, Alberta, Canadá. En este incidente hubo dos muertes, un trabajador fue declarado fallecido en el lugar y el segundo falleció en el hospital el 25 de enero de 2016. El edificio del compresor de hidrógeno constaba de dos compresores idénticos con dos etapas, baja presión y alta presión. Los cilindros de la primera etapa estaban ubicados en el lado sur del compresor y la segunda etapa estaba en el lado norte a un nivel más elevado. Después de recibir el permiso de trabajo, el titular del permiso (equipo de mantenimiento) y el operador del proceso realizaron un recorrido y luego se reunieron con sus otros colegas en el taller donde obtuvieron todas las herramientas y las 8 válvulas que requerían cambio, un total de 3 trabajadores de mantenimiento fueron asignados a la tarea, trabajadores 1, 2 y 3. Desde el 11 de enero hasta el 14 el mismo equipo estuvo realizando el trabajo. Como se había pedido al equipo original que investigara el arrastre de crudo en la primera etapa, se prolongó el trabajo de reemplazo de válvulas hasta después del día 14. Se pidió al equipo que trabajara horas extras el día 15 para completar el trabajo y los trabajadores 1 y 2 aceptaron. Un cuarto trabajador de mantenimiento que nunca había trabajado dentro del edificio del compresor de hidrógeno tuvo que unirse al equipo y también había un supervisor suplente ese día. El nuevo equipo sugirió que probablemente el arrastre estaba en la segunda etapa del compresor y acordó verificarlo allí. Después de reemplazar las 8 válvulas y con el trabajo a punto de finalizar, el equipo debatió si tomaban un descanso para tomar café enseguida y drenar luego el exceso de aceite o, drenar el exceso de aceite y terminar temprano el día. El equipo votó a favor de drenar el aceite primero. Cuando el trabajador 2 salía del edificio del compresor de hidrógeno para traer escaleras de mano, observaron que el trabajador 1 se subía a una caja de metal para llegar al punto de drenaje del cilindro en la segunda etapa del compresor. Poco después de que el trabajador 2 saliera del edificio del compresor de hidrógeno, se dieron cuenta de que había habido una explosión y que salía humo del edificio con los trabajadores 1 y 4 todavía dentro.

### Hallazgos claves:

Falta de supervisión competente, no hubo un reconocimiento del sitio de trabajo para el trabajador 4 y el nuevo supervisor, falla en el permiso por desviación del trabajo. No había en sitio una etiqueta con el registro de la apertura de la línea.



El ISC considera que el liderazgo a través de seis elementos funcionales claves es vital para conseguir buenos resultados en seguridad de procesos. Estos elementos son:

- sistemas & procedimientos
- ingeniería & diseño
- aseguramiento
- conocimiento & competencias
- factores humanos
- Cultura

En la sección *¿que puedo hacer?* se puede ver cómo cada elemento juega un papel.

## ¿Qué puedo hacer?

### Gerencia

<span style="color: blue;">●</span> <span style="color: grey;">●</span> <span style="color: yellow;">●</span>	• Asegure que los sistemas de trabajo, como los permisos, especifiquen el trabajo que se va a hacer
<span style="color: yellow;">●</span> <span style="color: green;">●</span> <span style="color: red;">●</span> <span style="color: blue;">●</span>	• Asegure tener las etiquetas de separación de bridas con un documento de registro adecuado.
<span style="color: blue;">●</span> <span style="color: red;">●</span>	• Asegure que el personal está debidamente entrenado, en este caso, en el uso de hidrógeno.
<span style="color: blue;">●</span> <span style="color: grey;">●</span> <span style="color: purple;">●</span> <span style="color: green;">●</span>	• Asegure que los cambios de alcance sean verificados y aprobados antes de iniciar cualquier trabajo.
<span style="color: green;">●</span> <span style="color: blue;">●</span> <span style="color: purple;">●</span>	• Asegure que el personal requerido está entrenado y es competente en los sistemas de permisos.
<span style="color: blue;">●</span> <span style="color: green;">●</span> <span style="color: yellow;">●</span> <span style="color: purple;">●</span>	• Asegure que todo el personal es competente en su rol incluidos quienes reemplazan a los miembros ausentes.
<span style="color: grey;">●</span> <span style="color: yellow;">●</span> <span style="color: blue;">●</span> <span style="color: green;">●</span>	• Cuente en sitio con un proceso (MOC) adecuado para registrar cambios a las operaciones normales.
<span style="color: yellow;">●</span> <span style="color: green;">●</span> <span style="color: purple;">●</span> <span style="color: grey;">●</span>	• Asegure que los análisis de riesgos se revisen y actualicen en intervalos de tiempo adecuados para que reflejen las condiciones reales
<span style="color: yellow;">●</span> <span style="color: green;">●</span> <span style="color: purple;">●</span> <span style="color: blue;">●</span>	• Asegure que haya un programa de inspección riguroso con recomendaciones que se sigan para limitar potenciales impactos de la corrosión.

### Ingeniero de Procesos/Supervisor

<span style="color: green;">●</span> <span style="color: purple;">●</span> <span style="color: yellow;">●</span>	• Asegúrese de seguir las guías de la compañía y los procedimientos operativos para proteger a los trabajadores.
<span style="color: purple;">●</span> <span style="color: grey;">●</span>	• Realice regularmente verificaciones en el sitio de trabajo para asegurar que los controles están allí y funcionan.
<span style="color: yellow;">●</span> <span style="color: green;">●</span> <span style="color: red;">●</span>	• Diseñe tuberías de venteo que soporten la presión y las fuerzas de empuje asociadas a los relevos.
<span style="color: purple;">●</span> <span style="color: yellow;">●</span> <span style="color: red;">●</span>	• Asegure que se hagan análisis de riesgos y se documenten los cambios de alcance de trabajo. Los cambios deben revisarse para asegurar que las condiciones son adecuadas para el trabajo que se va a realizar.
<span style="color: red;">●</span> <span style="color: grey;">●</span> <span style="color: purple;">●</span> <span style="color: green;">●</span>	• Asegure que la planta está diseñada para permitir shutdown de emergencia si un incidente ocurre.
<span style="color: blue;">●</span> <span style="color: green;">●</span> <span style="color: yellow;">●</span> <span style="color: red;">●</span>	• Al emitir un permiso de trabajo, asegure que se identifiquen todos los peligros específicos de la tarea y que se implementen controles para manejarlos asegurando que quienes están involucrados están familiarizados con los peligros y los controles.
<span style="color: yellow;">●</span> <span style="color: blue;">●</span> <span style="color: grey;">●</span> <span style="color: green;">●</span>	• Asegure que los aislamientos están documentados y realice recorridos para verificar que son correctos y se han probado. Que las etiquetas donde se ha roto el proceso estén colocadas en su sitio.
<span style="color: green;">●</span> <span style="color: yellow;">●</span> <span style="color: blue;">●</span> <span style="color: grey;">●</span> <span style="color: purple;">●</span>	• Tenga charlas diarias breves para asegurar que los equipos de trabajo están al tanto del alcance de los trabajos y anímelos a auditar los trabajos, incluyendo al staff y los contratistas que están en sitio.

### Operador

<span style="color: yellow;">●</span> <span style="color: blue;">●</span> <span style="color: green;">●</span> <span style="color: grey;">●</span>	• Asegure que en toda la planta se aísla como lo requiere el sistema de permisos de trabajo – realice chequeos diarios o por turnos.
<span style="color: yellow;">●</span> <span style="color: green;">●</span> <span style="color: blue;">●</span>	• Tenga buenas prácticas de orden, limpieza y mantenimiento.
<span style="color: yellow;">●</span> <span style="color: grey;">●</span> <span style="color: purple;">●</span> <span style="color: green;">●</span>	• Realice verificaciones regulares de todos los trabajos para asegurar que se realizan como es requerido y siguiendo los controles de permisos de trabajo. Haga auditorías si es necesario.
<span style="color: yellow;">●</span> <span style="color: grey;">●</span> <span style="color: purple;">●</span> <span style="color: green;">●</span> <span style="color: blue;">●</span>	• Realice inspecciones/empalmes pre y post turno con los contratistas de Mantenimiento sobre el trabajo completado para asegurar que las entregas de turno sean precisas y estén al día.
<span style="color: yellow;">●</span> <span style="color: grey;">●</span> <span style="color: green;">●</span> <span style="color: purple;">●</span>	• Pare el trabajo y reporte cualquier desviación al Sistema de permisos, incluyendo miembros adicionales al equipo de trabajo.
<span style="color: purple;">●</span> <span style="color: yellow;">●</span> <span style="color: grey;">●</span> <span style="color: green;">●</span>	• Asegure que los empalmes son suficientes y que se hacen documentando todas las actividades.