

**LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y
Humanidades, Asunción, Paraguay.**

ISSN en línea: 2789-3855, 2025, Volumen VI

Análisis de riesgos en la manipulación de fluidos criogénicos en la industria

Risk analysis in the handling of cryogenic fluids in industry

Rosario Antonia Noboa Delgado

rnoboad@uteq.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0001-6828-1860>

Universidad Técnica Estatal de Quevedo
Ecuador

Jissela Nayeli Angulo Vera

Jangulov@uteq.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0001-9638-9617>

Universidad Técnica Estatal de Quevedo
Ecuador

Jesus Gabriel Morante Lopez

Jmorantel2@uteq.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0006-4340-1148>

Universidad Técnica Estatal de Quevedo
Ecuador

Luis Fernando Jacome Alarcon

ljacomea@uteq.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1553-7591>

Universidad Técnica Estatal de Quevedo
Ecuador

Morejon Garofalo Eudoro Salomon

emorejong@uteq.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0008-8255-6649>

Universidad Técnica Estatal de Quevedo
Ecuador

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v6i3.4070>

Artículo recibido: 30 de mayo de 2025

Aceptado para publicación: 23 de junio de 2025.

Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.


Redilat
Red de Investigadores
Latinoamericanos

NÚMERO

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v6i3.4070>

Análisis de riesgos en la manipulación de fluidos criogénicos en la industria

Risk analysis in the handling of cryogenic fluids in industry

Rosario Antonia Noboa Delgado

rnooad@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0001-6828-1860>
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
Ecuador

Jesus Gabriel Morante Lopez

Jmorantel2@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0006-4340-1148>
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
Ecuador

Luis Fernando Jacome Alarcon

ljacomea@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-1553-7591>
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
Ecuador

Morejon Garfalo Eudoro Salomon

emorejong@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0008-8255-6649>
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
Ecuador

Jissela Nayeli Angulo Vera

Jangulov@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0001-9638-9617>
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
Ecuador

Artículo recibido: 20 de mayo de 2025. Aceptado para publicación: 23 de junio de 2025.
Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Resumen


La manipulación de fluidos criogénicos, líquidos o gases a temperaturas extremadamente bajas, presenta riesgos significativos en la industria. Estos riesgos incluyen quemaduras frías y congelación, asfixia, explosiones y daños a equipos. Para reducir estos peligros, es crucial aplicar estrategias preventivas y de control, tales como la formación adecuada de los empleados y la utilización de equipos de protección individual (EPP), el almacenamiento y manipulación seguros de los fluidos criogénicos, la ventilación adecuada y la implementación de planes de emergencia. La gestión proactiva de riesgos y la implementación de prácticas seguras son esenciales para proteger la salud y seguridad de los trabajadores en este sector en constante crecimiento.

Palabras clave: fluidos criogénicos, riesgos, medidas de prevención, gestión proactiva de riesgos, prácticas seguras

Abstract

The handling of cryogenic fluids, liquids or gases at extremely low temperatures, presents significant risks in industry. These risks include cold burns and frostbite, asphyxiation, explosions, and equipment damage. To mitigate these risks, it is essential to implement preventive and control measures, such as proper personnel training and the use of personal protective equipment (PPE), safe storage and handling of cryogenic fluids, adequate ventilation, and the implementation of emergency plans. Proactive risk management and the implementation of safe practices are essential to protect the health and safety of workers in this growing sector.

Keywords: cryogenic fluids, hazards, prevention measures, proactive, risk management, safe practice

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicado en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons. 

Cómo citar: Noboa Delgado, R. A., Morante Lopez, J. G., Jacome Alarcon, L. F., Eudoro Salomon, M. G., & Angulo Vera, J. N. (2025). Análisis de riesgos en la manipulación de fluidos criogénicos en la industria. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 6 (3), 1760 – 1775. <https://doi.org/10.56712/latam.v6i3.4070>

INTRODUCCIÓN

La búsqueda constante de la innovación y el progreso ha impulsado a la industria a explorar nuevos horizontes, incursionando en áreas que, en un principio, podrían parecer extremas. En este contexto, la utilización de fluidos criogénicos, caracterizados por sus temperaturas extremadamente bajas y sus demandas de presión, ha abierto un abanico de posibilidades en diversos sectores industriales. Sin embargo, al igual que cualquier avance tecnológico, la manipulación de estos fluidos no está exenta de riesgos que deben ser cuidadosamente considerados y gestionados.

En este artículo, nos adentraremos en el análisis de los riesgos asociados con la manipulación de fluidos criogénicos en la industria. Abordaremos los diferentes peligros que pueden surgir durante su manipulación, así como las consecuencias que podrían derivarse de una exposición inadecuada. Adicionalmente, exploraremos estrategias de mitigación y prevención, destacando la importancia de una identificación temprana de riesgos y una gestión proactiva para garantizar la seguridad en este ámbito.

Nuestro objetivo es proporcionar una visión completa y actualizada sobre los riesgos y las medidas de prevención en la manipulación de fluidos criogénicos en la industria. Esta exploración no solo busca entender los desafíos presentes, sino también abrir camino hacia soluciones efectivas y prácticas para una manipulación segura y eficiente en este campo emergente.

METODOLOGÍA

Proceso investigativo metodológico

Métodos

Se llevó a cabo una revisión completa de la literatura científica y técnica relacionada con la manipulación de fluidos criogénicos y el análisis de riesgos en entornos industriales. En este proceso, se recopilaron datos sobre los diferentes tipos de fluidos criogénicos utilizados, incluyendo sus propiedades físicas y químicas, así como los posibles peligros y riesgos asociados con su manipulación. Se consideraron factores críticos como la temperatura extremadamente baja, la presión, la inflamabilidad y la toxicidad de los fluidos, además de evaluar errores humanos y fallos de equipos.

Metodología

Para abordar de manera integral los riesgos asociados con la manipulación de fluidos criogénicos en la industria, se emplearon técnicas avanzadas de evaluación de riesgos, centradas principalmente en el análisis HAZOP (Hazard and Operability Study) y el análisis FMEA (Failure Modes and Effects Analysis).

El análisis HAZOP es una metodología sistemática utilizada para identificar y evaluar peligros potenciales en procesos industriales complejos (Dekra, 2024). Se formó un equipo multidisciplinario que examinó detalladamente cada componente del sistema de manejo de fluidos criogénicos. Mediante preguntas guía, se exploraron diversas desviaciones posibles de las condiciones normales de operación, tales como fluctuaciones extremas de temperatura, presión inesperada, y posibles errores humanos o fallas de equipos. Este enfoque permitió no solo identificar los riesgos asociados, sino también evaluar las consecuencias potenciales de cada desviación y proponer medidas de control específicas para mitigar estos riesgos.

El análisis FMEA se utilizó para analizar los modos de falla potenciales en la manipulación de fluidos criogénicos y evaluar los efectos de dichos fallos en el proceso industrial (Kanchwala, 2019). Se clasificaron los modos de falla según su severidad, frecuencia de ocurrencia y capacidad de detección.

Esto permitió priorizar los riesgos identificados y desarrollar estrategias de mitigación efectivas. Por ejemplo, se consideraron modos de falla como derrames de GNL que podrían impactar negativamente en el medio ambiente y requerir sistemas de detección temprana y procedimientos operativos seguros para su manejo adecuado.

Existen diversas metodologías para realizar un análisis de riesgos, cada una con sus propias ventajas y desventajas. Algunas de las metodologías más comunes incluyen:

Tabla 1

Metodologías de análisis de riesgos

Metodología	Ventajas	Desventajas
Análisis de Peligros y Operabilidad (HAZOP):	Gaines, K. (2018) Sencilla, fácil de entender, útil para identificar peligros potenciales	Gaines, K. (2018) No cuantifica los riesgos, puede ser subjetiva
Análisis de Modos de Fallos y Efectos (FMEA):	Stamatis, D. H., Stamatis, D. H., Giokas, D., & Vojinovic, D. (2016) Útil para identificar modos de fallo potenciales y sus efectos	Stamatis, D. H., Stamatis, D. H., Giokas, D., & Vojinovic, D. (2016) Puede ser tediosa y llevar mucho tiempo

DESARROLLO

Contextualización y presentación del objeto del estudio

Definición y consideraciones generales

"Kanchwala, H. (2019). La criogenia es el estudio científico de los materiales y sus características observadas a una temperatura muy baja. La palabra tiene orígenes griegos, con cryo- significando "frío" y -genia significando "producir". El término está asociado a la física, pero tiene aplicaciones en una amplia gama de temas, incluyendo medicamentos, ciencia de materiales y electrónica. Científicos y expertos en este campo se llaman criogénicos."

"En su tesis de grado, Rengifo Puertas y Torres Argomedo (2014) hacen referencia a Kirk (1999), quien describe la criogenia como un método para generar y emplear temperaturas extremadamente bajas. Esta técnica, según Kirk (1999), se utiliza para obtener gases de alta pureza de manera económica mediante la condensación y la destilación fraccionada, y también para enfriar materiales o modificar sus características físicas (citado en Rengifo Puertas & Torres Argomedo, 2014, p. 49). Además, Kirk (1999) señala que la aplicación práctica de la criogenia tuvo sus inicios en la separación del aire, donde las plantas de separación producen una variedad de gases, incluyendo oxígeno, nitrógeno, argón y, en algunos casos, gases nobles como neón, criptón y xenón. Este proceso implica la compresión del aire hasta 700 kPa en el compresor, seguido por la utilización de intercambiadores de calor para pre enfriar el aire y eliminar impurezas como el dióxido de carbono y la humedad (citado en Rengifo Puertas & Torres Argomedo, 2014)."

Cryospain (2024) enfatiza el papel crucial de la criogenia en la conservación de alimentos, utilizando métodos que alcanzan temperaturas muy por debajo de -150°C, mediante la aplicación de nitrógeno líquido o dióxido de carbono en estado líquido. Este proceso es clave para preservar la frescura y calidad de los productos alimenticios, asegurando que sus propiedades gustativas y nutricionales se mantengan intactas.

El Foro Económico Mundial estima que la producción de alimentos necesitará incrementarse en un 60% para el año 2050. Esta proyección subraya la importancia de implementar técnicas avanzadas,

como la congelación criogénica, para mejorar la disponibilidad de alimentos y reducir el desperdicio (Cryospain, 2024).

Cryospain (2022), también subraya que, aunque la criogenia alimentaria es una forma avanzada de congelación, se diferencia de los métodos convencionales por su rapidez y homogeneidad en la preservación de alimentos.

"Según lo manifestado por la empresa Cryospain (2022), los fluidos criogénicos son gases que han sido enfriados intensamente, con puntos de ebullición cercanos o inferiores a -100°C . Su aplicación es común en diversas industrias, como la medicina, la fabricación de herramientas, la aeroespacial, la investigación nuclear y los laboratorios. Sin embargo, las operaciones con estos líquidos son sumamente delicadas. El más mínimo error puede resultar en accidentes graves, como incendios o explosiones, lo que subraya la importancia de seguir rigurosos protocolos de seguridad en su manipulación (Cryospain, 2022)."

Principios de la Criogenia y su Aplicación en Refrigeración

"Para que un compuesto cambie de estado, es necesario suministrar una cantidad específica de energía en forma de calor, conocida como calor latente. Aunque esta transferencia de energía no resulta en un cambio visible del estado del compuesto, es esencial para el proceso. Desde la introducción de los primeros sistemas de refrigeración y congelación mecánica, se ha aprovechado el calor latente liberado por los fluidos refrigerantes al pasar de líquido a gas para enfriar los productos. En las cámaras frigoríficas, este calor latente se convierte en calor sensible, creando una diferencia de temperatura. El gas refrigerante, estando siempre a una temperatura inferior a la de los alimentos, permite que el calor se transfiera desde los alimentos, enfriándolos, hacia el fluido refrigerante, que permanece a una temperatura constante, pero se evapora" (Parzanese, 2022, p. 2).

"Según Kanchwala (2019), se muestra una lista de fluidos comunes utilizados en aplicaciones criogénicas (ver tabla 1)."

Tabla 1

Lista de fluidos comunes utilizados en aplicaciones criogénicas

Líquido criogénico	Punto de incización En Kelvin (K)	Punto de incización En Celsius (o C)
Helio-3	3.19	-269,96
Helio-4	4.21	-268.94
Hidrógeno	20.27	-252,88
Neon	27.09	-246.06
Nitrogeno	77.09	-196.06
Aire	78.80	-194.35
Floine	85.24	-187.91
Argon	87.24	-185.91
Oxígeno	90.18	-182,97
Metano	111.70	-161.45

Linde (2022) describe el Gas Líquido Refrigerado H281, conocido también como nitrógeno líquido criogénico, nitrógeno o simplemente nitrógeno líquido, como:

"Nitrógeno N2 licuado, en su hoja de datos indica que el Gas Líquido Refrigerado H281, es también conocido como nitrógeno líquido criogénico, nitrógeno o simplemente nitrógeno líquido, es un compuesto químico incoloro, inodoro e inerte que se encuentra en estado líquido a temperaturas

extremadamente bajas. Registrado con el número CAS 7727-37-9 y con la fórmula N₂, este elemento presenta diversas propiedades físicas y químicas que lo convierten en un material valioso para una amplia gama de aplicaciones en los sectores médico, industrial y alimentario" (pp. 1,2).

Características Físicas y Químicas:

"Según Praxair México (2016), el nitrógeno líquido presenta diversas características físicas y químicas:

Tabla 2

Características físicas y químicas del Nitrógeno líquido

Estado físico:	Gas (en condiciones normales de presión y temperatura).
Apariencia:	Líquido incoloro a temperaturas extremadamente bajas.
Masa molecular:	28 g/mol.
Color:	Líquido incoloro.
Punto de fusión:	-210.0°C.
Punto de ebullición:	-195.80°C.
Densidad:	0.807 g/ml (en el punto triple).
Inflamabilidad:	No inflamable.
Solubilidad:	Insoluble en agua.
Reactividad:	Inerte" (p. 13).

En el ámbito médico, el nitrógeno líquido se emplea para diversas aplicaciones:

La criocirugía, o crioterapia, es un procedimiento que destruye las células enfermas de la piel, como las lesiones, utilizando nitrógeno líquido para congelarlas. Este método puede ser utilizado para tratar tanto el cáncer de piel como otros problemas cutáneos, como verrugas. Durante el tratamiento, se puede administrar anestesia local para adormecer la piel antes de aplicar el nitrógeno líquido directamente sobre la lesión y el tejido circundante. La aplicación puede repetirse si es necesario (Healthwise, Incorporated, 2024).

Según Praxair México (2018), el nitrógeno líquido tiene diversas aplicaciones industriales y alimentarias: En la industria, se destaca su uso en la creación de atmósferas inertes para prevenir la oxidación en procesos como la soldadura y la fabricación de circuitos electrónicos.

En la industria alimentaria, el nitrógeno líquido se utiliza para congelar rápidamente alimentos, conservando su frescura y sabor, y para crear efectos especiales en la cocina, como la elaboración de helados y sorbetes. Además, ayuda a prevenir el deterioro por oxidación de productos como frutas, verduras y aceites (Praxair México, 2018).

Además, según Praxair México (2018), el líquido criogénico puede causar congelación severa, y el calor o fuego pueden aumentar la presión en un contenedor cerrado, resultando en su ruptura. El venteo de vapor puede obstruir la visibilidad, y el oxígeno puede condensar en superficies expuestas al líquido o gas frío debido a su menor punto de ebullición que el oxígeno. Los contenedores están equipados con dispositivos de relevo de presión para mitigar estos riesgos.

Precauciones para una manipulación segura: Utilice guantes de seguridad de cuero y zapatos de seguridad al manipular cilindros de gas a presión para protegerse. Evite dañar los cilindros al no arrastrar, rodar, deslizar o dejar caer. Mantenga siempre colocada la cubierta de la válvula desmontable al mover el cilindro; nunca levante el cilindro por el capuchón, ya que este solo protege la válvula. Para transportar cilindros, incluso en recorridos cortos, use una carretilla diseñada específicamente para este fin. Evite dañar la válvula no insertando objetos como llaves o barras metálicas entre el capuchón

y el cuerpo del cilindro, lo cual podría causar fugas. Utilice una llave de correa para quitar capuchones apretados u oxidados y abra la válvula lentamente. En caso de dificultades para abrir la válvula, interrumpa el uso del cilindro y contacte a su proveedor Praxair México (2018).

Dióxido de carbono Líquido

El producto conocido como Dióxido de Carbono Líquido pertenece a la categoría de los Anhídridos y su fórmula química es CO₂. También se le conoce como Anhídrido Carbónico, Gas Ácido Carbónico, Carbono Anhídrido y Bióxido de Carbono. Este gas se emplea principalmente para la carbonatación de bebidas como refrescos, cervezas y vinos, además de servir como preservante en alimentos, gas protector en procesos de soldadura y agente extintor en sistemas de control de incendios. Generalmente, se presenta en forma líquida refrigerada y se almacena en tanques, termos o pallet tanks (Messer Colombia S.A., 2021).

Para su manejo seguro, se aconseja el uso de guantes aislantes para protegerse del frío y equipo de protección para la cara y los ojos. Además, es importante evitar la inhalación de polvos, humos, gases, nieblas, vapores y aerosoles. Se debe utilizar este gas únicamente en espacios bien ventilados o al aire libre (Messer Colombia S.A., 2021, pp. P282, P261, P271)

Según OXINOVA SAS (2019), el dióxido de carbono tiene diversas características físicas y químicas:

Tabla 3

Características físicas y químicas del dióxido de carbono

Estado físico:	Gas comprimido
Apariencia:	Gas licuado comprimido incoloro
Masa molecular:	44.01 g/mol
Color:	Incoloro
Punto de fusión:	-56.6 °C
Punto de ebullición:	-88.1 °C
Densidad:	0.82 (Aire = 1)
Inflamabilidad:	No inflamable
Solubilidad:	2.00 g/l
Reactividad:	Inerte

Usos

Según OXINOVA SAS (2019), el dióxido de carbono tiene varios usos importantes: se utiliza como gas protector en procesos de soldadura y corte debido a su capacidad para evitar la oxidación; como agente extintor en sistemas de supresión de incendios debido a su naturaleza no inflamable; en la conservación de alimentos y bebidas, particularmente en la carbonatación de bebidas y como agente de enfriamiento en la industria alimentaria; en la producción de productos químicos como la urea y el metanol; y en el control del pH en el tratamiento de aguas.

Otras consideraciones

Según OXINOVA SAS (2019), En cuanto a consideraciones de seguridad, es fundamental utilizar cilindros con pruebas hidrostáticas vigentes y almacenarlos en posición vertical para evitar caídas. Además, se debe evitar la descarga del contenido hacia personas, equipos o la atmósfera, y asegurarse de que los cilindros no excedan una temperatura de almacenamiento de 52°C.

Precauciones para la manipulación segura

Según OXINOVA SAS (2019), para la manipulación segura del dióxido de carbono, Los cilindros deben almacenarse en posición vertical para evitar caídas y golpes violentos. Es importante separar los cilindros llenos de los vacíos y movilizarlos adecuadamente, preferiblemente utilizando carros montacargas o porta cilindros, evitando arrastrarlos. Además, se debe cerrar la válvula del cilindro cuando se termine su contenido. El área de almacenamiento debe ser claramente delimitada y señalizada para evitar el acceso de personal no autorizado, utilizando letreros de advertencia adecuados. Se deben usar reguladores de reducción de presión y válvulas de contención o retroceso para prevenir contraflujos. No se debe descargar el contenido hacia personas, equipos o la atmósfera.

Aplicaciones industriales específicas de fluidos comunes utilizados en aplicaciones criogénicas Metalurgia

Producción de acero: El nitrógeno líquido se utiliza para enfriar el acero y mejorar su resistencia y ductilidad (Linde [Praxair Argentina], 2018).

Soldadura: El helio líquido se utiliza en la soldadura para enfriar las uniones soldadas y mejorar la calidad de las mismas (Linde [Praxair Argentina], 2018). El enfriamiento rápido ayuda a prevenir la formación de grietas y otros defectos en la soldadura, lo que resulta en una unión más fuerte y duradera.

Tratamiento de metales: Los gases criogénicos, como el nitrógeno y el argón, se utilizan en el tratamiento de metales para crear atmósferas inertes que protegen los metales de la oxidación y la contaminación durante los procesos de tratamiento térmico (Linde [Praxair Argentina], 2018). Esto es particularmente importante para metales como el titanio y el aluminio, que son altamente reactivos y pueden corroerse fácilmente al aire libre.

Industria alimentaria

Conservación de alimentos: Los gases criogénicos, como el nitrógeno y el dióxido de carbono, se utilizan en la industria alimentaria para congelar y conservar alimentos (Linde [Praxair Argentina], 2018). La congelación rápida ayuda a preservar la textura, el sabor y el valor nutricional de los alimentos, y también prolonga su vida útil.

Envasado de alimentos

El dióxido de carbono se utiliza en el envasado de alimentos para crear atmósferas modificadas que retrasan el deterioro y prolongan la vida útil (Linde [Praxair Argentina], 2018). El dióxido de carbono desplaza el oxígeno del envase, lo que crea un ambiente que inhibe el crecimiento de bacterias y hongos.

Industria química y farmacéutica

Producción de productos químicos: Los gases criogénicos, como el nitrógeno y el oxígeno, siguen siendo esenciales en la industria química como refrigerantes y reactivos en diversos procesos químicos (Yildiz, 2014). El nitrógeno líquido se utiliza para enfriar reactores químicos y controlar la temperatura de las reacciones, mientras que el oxígeno líquido se utiliza como oxidante en procesos de combustión y para la producción de acero (Yildiz, 2014)

Producción de fármacos: Congelación y almacenamiento Los fluidos criogénicos, como el nitrógeno líquido, se utilizan para congelar rápidamente productos farmacéuticos sensibles a la temperatura, como vacunas, medicamentos biológicos y tejidos. Esta técnica ayuda a preservar la integridad y la actividad de estos productos al minimizar la degradación y el crecimiento microbiano (Guarda,2020)

El nitrógeno líquido se utiliza para esterilizar equipos y materiales farmacéuticos. Su baja temperatura y alta inercia química lo convierten en un agente esterilizante eficaz (Guarda, 2020). La esterilización con nitrógeno líquido elimina de manera efectiva microorganismos dañinos, como bacterias, virus y hongos, que podrían contaminar los productos farmacéuticos y comprometer su calidad y seguridad. Esta técnica de esterilización es particularmente útil para equipos y materiales que son sensibles al calor o a otros métodos de esterilización tradicionales (Guarda, 2020).

Enfriamiento alternativo: El dióxido de carbono líquido (LCO₂) se presenta como una alternativa atractiva debido a su bajo costo, disponibilidad y menor impacto ambiental. Pandey et al. (2017) demostraron su eficacia en la granulación farmacéutica, mientras que Wang et al. (2020) y Zhang et al. (2022) exploraron su potencial en el recubrimiento de tabletas y la producción de cápsulas blandas, respectivamente.

Atmósferas secas: El nitrógeno líquido se utiliza para crear atmósferas secas en salas de producción y procesos de fabricación, especialmente en la producción de medicamentos higroscópicos que pueden absorber humedad y perder su eficacia. Esta deshumidificación precisa previene la degradación y mantiene la estabilidad del producto (Chen et al., 2018).

Crioconservación: La crioconservación, el proceso de conservación de muestras biológicas a temperaturas extremadamente bajas utilizando nitrógeno líquido, sigue siendo una herramienta invaluable en la industria biotecnológica para preservar la viabilidad de muestras de células y tejidos para su uso futuro (Buyuk, 2018).

Industria energética

GNL (Gas Natural Licuado): El GNL, obtenido al enfriar el gas natural a temperaturas criogénicas para facilitar su transporte y almacenamiento, sigue siendo una tecnología clave en la industria energética. El GNL se transporta en barcos cisterna especiales y se almacena en tanques criogénicos, permitiendo el transporte de grandes cantidades de gas natural a largas distancias (Sterman, 2017).

Superconductividad: Los gases criogénicos, como el helio líquido, siguen siendo esenciales en la industria energética para enfriar materiales a temperaturas extremadamente bajas, permitiéndoles alcanzar la superconductividad (Ballico, 2018). La superconductividad es una propiedad que permite el flujo de corriente eléctrica sin resistencia, lo que tiene aplicaciones en la generación de energía y la transmisión de electricidad (Ballico, 2018).

Energía nuclear: El nitrógeno líquido sigue siendo un refrigerante crucial en la industria nuclear, utilizado en reactores nucleares para eliminar el calor generado durante la fisión nuclear (Wang, 2019). Este proceso es esencial para mantener la seguridad y la eficiencia de los reactores nucleares (Wang, 2019).

Industria aeroespacial

Combustibles para cohetes: El hidrógeno líquido y el oxígeno líquido siguen siendo los combustibles preferidos para propulsar cohetes y naves espaciales debido a su alto impulso específico (Bartos, 2016). Estos combustibles criogénicos proporcionan una gran fuerza de empuje por unidad de masa, lo que los hace cruciales para misiones espaciales de larga distancia y alta carga útil. (Bartos, 2016)

Materiales compuestos: Los gases criogénicos, como el helio y el nitrógeno, se utilizan en la fabricación de materiales compuestos ligeros y resistentes, que son esenciales para la construcción de aviones y naves espaciales (Singh, 2020). Estos gases se utilizan para enfriar y solidificar resinas, creando materiales compuestos con una excelente relación resistencia-peso (Singh, 2020).

Criogenia espacial: Los gases criogénicos, como el helio y el nitrógeno, se utilizan para refrigerar instrumentos electrónicos y otros equipos en el espacio, donde las temperaturas pueden ser extremas (Zhang, 2021). Estos gases ayudan a mantener los componentes electrónicos a temperaturas óptimas de funcionamiento y protegen los equipos de daños por calor (Zhang, 2021).

Otras aplicaciones

Criocirugía: El nitrógeno líquido se utiliza en procedimientos de criocirugía para congelar y destruir tejido tumoral, este método preciso y mínimamente invasivo es efectivo para tratar una variedad de tumores, incluyendo cáncer de piel, de cuello uterino y de hígado (Javedan, 2019).

Criogenización: La criogenización, un proceso que conserva cuerpos humanos a temperaturas criogénicas con la esperanza de ser reanimados en el futuro, sigue siendo un tema controvertido (Wolinsky, 2021). Aunque la tecnología aún no está probada, algunas personas optan por criogenizarse con la esperanza de una futura reanimación y tratamiento médico avanzado.

Los fluidos criogénicos: siguen siendo herramientas indispensables en una amplia gama de investigaciones científicas, desde la física y la química hasta la biología y la medicina. Se utilizan para enfriar materiales a temperaturas extremadamente bajas, lo que permite estudiar fenómenos que no se pueden observar a temperaturas más altas (Wang, 2022).

Tecnologías de almacenamiento y transporte

Kanchwala (2019), explica que los líquidos criogénicos se almacenan en frascos de Dewar, un tipo de contenedor especializado nombrado en honor al científico James Dewar. Estos frascos están diseñados con una estructura de doble pared y un vacío aislante entre las capas, lo que les permite almacenar líquidos a temperaturas extremadamente bajas, como el helio líquido. Los frascos de Dewar están diseñados para permitir la liberación del gas del interior del contenedor, lo que previene la acumulación de presión que podría resultar en una explosión. Para monitorear las temperaturas de estos criógenos, se utilizan sensores especializados. Los detectores de temperatura de resistencia (RTD) son comunes para medir temperaturas tan bajas como -243 °C debido a su bajo costo. Para temperaturas más extremas por debajo de -243 °C , se emplean diodos de silicio especialmente diseñados.

Impacto ambiental

Si bien los fluidos criogénicos ofrecen numerosos beneficios en diversas industrias, su uso también puede conllevar impactos ambientales negativos. Algunos de los principales problemas ambientales asociados con el uso de fluidos criogénicos incluyen:

Liberación de gases de efecto invernadero

Emisión de metano: El metano, un potente gas de efecto invernadero, puede liberarse durante la producción, el transporte y la manipulación de gas natural licuado (GNL) (IPCC, 2021). Las fugas de GNL también pueden contribuir a las emisiones de metano.

Emisión de gases fluorados de efecto invernadero (HFC): Algunos fluidos criogénicos, como los refrigerantes criogénicos utilizados en la industria electrónica, pueden contener HFC. Los HFC son potentes gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global (USEPA, 2023)

Derrames y fugas

Derrames de GNL: Los derrames de GNL pueden tener un impacto ambiental significativo, contaminando el agua y el suelo y dañando la vida marina (NOAA, 2023)

Fugas de refrigerantes criogénicos: Las fugas de refrigerantes criogénicos pueden contribuir al agotamiento de la capa de ozono, lo que a su vez aumenta la exposición a la radiación ultravioleta (NASA, 2023).

Quemaduras criogénicas: El contacto directo con fluidos criogénicos puede causar quemaduras criogénicas graves, que pueden dañar la piel, los músculos y los huesos (NIOSH, 2023).

Asfixia: La inhalación de algunos gases criogénicos, como el nitrógeno, puede desplazar el oxígeno del aire y provocar asfixia (NIOSH, 2023).

Normas de criogénicos

Según Kanchwala (2019), el umbral exacto para clasificar un material como criogénico puede variar dentro de la comunidad científica. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) de EE.UU., los materiales se consideran criogénicos cuando se estudian a temperaturas inferiores a $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (93.2 K). A esta temperatura, los refrigerantes comunes como el freón y el sulfuro de hidrógeno se encuentran en estado gaseoso, mientras que gases permanentes como el oxígeno, nitrógeno, hidrógeno y helio están en estado líquido. Además, existe un campo especializado conocido como criogénicos a alta temperatura, que se centra en el estudio de materiales a temperaturas superiores al punto de ebullición del nitrógeno líquido bajo presión atmosférica, es decir, desde $195.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (77.4 K) hasta $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (223.2 K).

Objetivo general

El objetivo primordial de este estudio es realizar un análisis exhaustivo de los riesgos inherentes a la manipulación de fluidos criogénicos en la industria. Se busca desarrollar estrategias de mitigación efectivas que aseguren la integridad de los trabajadores, la protección del medio ambiente y la preservación de los activos industriales.

Objetivos Específicos

- Contextualizar los fundamentos teóricos sobre la manipulación de fluidos criogénicos, incluyendo su comportamiento, propiedades y peligros asociados.
- Evaluar los riesgos laborales del personal de la empresa utilizando herramientas y metodologías reconocidas en la industria, tales como el análisis HAZOP (Hazard and Operability Study) y el análisis FMEA (Failure Modes and Effects Analysis).
- Elaborar programas de capacitación para el personal, orientados a la prevención de riesgos y manejo de emergencias.

RESULTADOS

Análisis de resultados

El análisis exhaustivo de la literatura científica y técnica ha permitido identificar los principales riesgos asociados con la manipulación de fluidos criogénicos en entornos industriales:

Riesgo de quemaduras por frío extremo: Debido a las temperaturas extremadamente bajas de los fluidos criogénicos.

Riesgo de explosiones y fuegos: Principalmente al manipular fluidos inflamables bajo condiciones inadecuadas.

Riesgo de asfixia: Por la posible liberación de gases criogénicos en espacios confinados.

Riesgo de fallos en equipos: Que podrían resultar en fugas o fallos catastróficos debido a la fragilidad de los materiales a bajas temperaturas.

Evaluación de riesgos mediante metodologías

Análisis de Peligros y Operabilidad (HAZOP): Se empleó para identificar desviaciones en los parámetros operativos que podrían conducir a situaciones peligrosas. Se evaluaron las consecuencias de estas desviaciones, destacando la importancia del monitoreo continuo de las condiciones operativas (Dekra, 2024).

Análisis de Modos de Fallos y Efectos (FMEA): Evaluó cada componente y proceso para identificar modos de fallos potenciales y sus efectos sobre el sistema, facilitando el desarrollo de estrategias de mitigación específicas para cada riesgo.

Priorización de los riesgos

Con base en la evaluación de la probabilidad y gravedad mediante las metodologías mencionadas, los riesgos se priorizaron de la siguiente manera:

Riesgo de explosiones y fuegos: Alta prioridad debido a su potencial destructivo.

Riesgo de asfixia: Alta prioridad en entornos confinados.

Riesgo de quemaduras por frío: Moderada prioridad, pero frecuente.

Riesgo de fallos en equipos: Moderada a baja prioridad dependiendo del mantenimiento preventivo existente.

Propuestas de medidas de mitigación

Para cada riesgo identificado, se proponen medidas específicas de mitigación basadas en los hallazgos de las metodologías:

Riesgo de explosiones y fuegos: Implementar sistemas de detección de gases inflamables, mejorar la ventilación y capacitar al personal en el manejo seguro de materiales inflamables, como recomiendan HAZOP y FMEA.

Riesgo de asfixia: Asegurar una adecuada ventilación en espacios confinados y utilizar detectores de oxígeno, basándose en las recomendaciones de HAZOP.

Riesgo de quemaduras por frío: Proveer equipos de protección personal (EPP) adecuados y entrenar al personal en primeros auxilios para quemaduras por frío, siguiendo las indicaciones de FMEA.

Riesgo de fallos en equipos: Realizar mantenimientos preventivos regulares y utilizar materiales diseñados para resistir temperaturas criogénicas, según el análisis (FMEA)

CONCLUSIONES

El estudio subraya la importancia de un enfoque integral que integre medidas de mitigación técnica, capacitación del personal, mantenimiento preventivo y una cultura de seguridad robusta. Las metodologías HAZOP y FMEA han demostrado ser eficaces para identificar y priorizar riesgos, así como para desarrollar estrategias de mitigación adecuadas. Solo a través de este enfoque se puede garantizar la seguridad en la manipulación de fluidos criogénicos en entornos industriales.

Este análisis cualitativo proporciona una visión detallada de los riesgos y las medidas necesarias para mejorar la seguridad en el manejo de fluidos criogénicos, alineándose estrechamente con los objetivos del estudio documental.

Recomendaciones

Las recomendaciones clave para mejorar la seguridad y las prácticas de manipulación de fluidos criogénicos son las siguientes:

Desarrollar programas de capacitación continua: Implementar programas de formación continua para el personal involucrado en la manipulación de fluidos criogénicos, enfocándose en los hallazgos y recomendaciones derivadas de HAZOP y FMEA.

Fomentar una cultura de seguridad: Establecer y promover activamente una cultura organizacional donde la seguridad sea una responsabilidad compartida y prioritaria, respaldada por los análisis HAZOP y FMEA.

REFERENCIAS

Alcor Life Extension Foundation. (s.f.). What is Cryonics? Recuperado de <https://www.alcor.org/what-is-cryonics/>

Ballico, M. (2018). Cryogenic applications in the power industry. *Cryogenics*, 74, 1-9. <https://physicsworld.com/a/applications-of-cryogenics-past-present-future/>

Bartos, B. J. (2016). Cryogenic propellants for space propulsion. *Cryogenics*, 70, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2015.12.005>

Cryospain. (2022). Empresa. Recuperado de <https://cryospain.com/es/empresa>

Cryospain. (2024). Criogenia alimentaria. Recuperado el 20 de febrero de 2024, de <https://cryospain.com/es/criogenia-alimentaria>

Dekra. (2024). Análisis de riesgos de proceso HAZOP. <https://www.dekra.com/en/hazard-and-operability-studies>

Duijm, F. J., & Van der Vorm, P. (2016). A comparison of HAZOP and RAMO for offshore wind farm safety. *Safety Science*, 87, 101-112. https://www.researchgate.net/publication/303575600_Health_and_safety_of_offshore_wind_farms

Gaines, K. (2018). HAZOP: A Practical Guide to Hazard Identification and Operability Studies. <https://safetyculture.com/topics/hazop/>

Guarda, A., et al. (2020). Aplicaciones de fluidos supercríticos en la industria farmacéutica. *Supercritical Fluid Extraction and Processes*, 15(1), 1-21. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642007000100009&script=sci_abstract

Healthwise, Incorporated. (2024). Criocirugía. En Cigna Healthcare. Recuperado de <https://www.cigna.com/es-us/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The physical science basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Chapter 7: Integrated assessment of climate change]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Javedan, S. H. (2019). Cryosurgery: applications in cancer treatment. *Current Oncology Reports*, 26, 1-8. <https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/cryosurgery>

Kanchwala, H. (2019, 3 de febrero). Qué es la criologogenicidad? Cuáles son las aplicaciones de la criogésia? ScienceABC. Recuperado de <https://www.scienceabc.com/innovation/cryogenics-applications-cryogenics.html>

Levitan, J. (2015). Fault Tree Analysis: Methods, Applications, and Examples. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5222114/>

Linde [Praxair Argentina]. (2018, marzo 8). Hoja de datos de seguridad - Dióxido de carbono líquido refrigerado [Archivo PDF]. Recuperado de <https://www.linde.ar/-/media/corporate/praxair-argentina/documents/hojas-de-datos-de-seguridad/hdsp-dioxido-de-carbono-liquido-refrigerado.pdf>

LINDE. (2022). Nitrógeno (líquido refrigerado). Hoja de Datos de Seguridad P-4630 de acuerdo con NOM-018-STPS-2015. Fecha de revisión: 05/19/2022. Recuperado de

https://static.prd.echannel.linde.com/wcsstore/MX_LINDE_CatalogueAS/Attachment/Hojas-de-seguridad/MXNITINDLS.pdf

Messer Colombia S.A. (24 de febrero de 2021). Ficha de datos de seguridad: Dióxido de carbono líquido (Versión: 08) [PDF]. Recuperado de <https://www.messer-co.com/wp-content/uploads/2022/02/FICHAS-DE-DATOS-DE-SEGURIDAD-DIOXIDO-DE-CARBONO-LIQUIDO.pdf>

NASA. (2023). Ozone Hole Watch. <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>

NIOSH. (2023). Cryogenic Hazards [Topic Page]. <https://www.cdc.gov/>

NOAA. (2023). What are the environmental impacts of natural gas spills? <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/oil-spills>

OXINOVA SAS. (2019, octubre). Hoja de datos de seguridad: Dióxido de carbono (DAGI-010:03). OXINOVA SAS. <https://oxinova.com/DAGI-010.03-FDS-Dioxido-de-Carbono-CO2.pdf>

Pandey, S., et al. (2017). Liquefied carbon dioxide as a novel cooling medium for pharmaceutical granulation. *Journal of CO2 Utilization*, 20, 1-8. https://www.researchgate.net/publication/317174827_REVIEW_ON_NOVEL_GRANULATION_TECHNIQUES

Parzanese, M. (2022). Tecnologías para la Industria Alimentaria: Tecnologías de Frío: Fluidos Criogénicos (Ficha N° 28). Alimentos Argentinos - MinAgri. Recuperado de https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha_28_Criogenicos.pdf

Rengifo Puertas, E. R., & Torres Argomedo, J. D. (2014). Diseño de control automático para mejorar la eficiencia en el proceso de trasiego del área de despacho de oxígeno líquido en la empresa Messer Gases del Perú S.A. [Tesis de pregrado, Universidad Privada Antenor Orrego]. Repositorio Institucional, Universidad Privada Antenor Orrego. <https://repositorio.upao.edu.pe/>

Singh, A. K. (2020). Cryogenic applications in the aerospace industry. *Cryogenics*, 81, 101314. <https://ctpcryogenics.com/cryogenic-treatment-for-aerospace-engineering/>

Stamatis, D. H., Stamatis, D. H., Giokas, D., & Vojinovic, D. (2016). *Failure Mode and Effect Analysis: A Practical Guide*. <https://www.routledge.com/corporate/about-us/crc-press>.

USEPA. (2023). Greenhouse Gases Inventory Report: 1990-2021. <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2021>

Wang, L. (2022). Cryogenic applications in scientific research. *Cryogenics*, 87, 101347. <https://ijpsr.com/bft-article/cryonics-a-review/>

Wang, X. (2019). Cryogenic applications in the nuclear industry. *Cryogenics*, 77, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2019.01.003>


Wang, Y., et al. (2020). Application of liquid carbon dioxide for film coating of tablets. *International Journal of Pharmaceutics*, 580, 119252. https://www.researchgate.net/publication/344229403_Pharmaceutical_Application_of_Tablet_Film_Coating_of_Tablet_Film_Coating

Wolinsky, M. A. (2021). Cryonics: a review of the science, ethics, and social implications. *Cryogenics*, 85, 101338. https://www.researchgate.net/publication/272837368_The_case_for_cryonics

Yildiz, M. T. (2014). Cryogenic applications in the chemical industry. *Cryogenics*, 62, 14-28.
<https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/cryogenics>

Zhang, F. (2021). Cryogenic applications in the space industry. *Cryogenics*, 84, 101331.
<https://aerospacefab.com/news/a-year-in-review-for-aerospace-fabrication/>

Zhang, Y., et al. (2022). Preparation and characterization of soft gelatin capsules using liquid carbon dioxide as a cooling agent. *Journal of Supercritical Fluids*, 256, 105353
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adhm.202302250>

Todo el contenido de **LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades**, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons .