

GUÍA
TÉCNICA



Nociones de seguridad de procesos



Nociones de seguridad de procesos

Autora

María Camila Suárez Paba

Doctora en Ingeniería, bajo el programa de Ingeniería de la Seguridad Humana de la Universidad de Kioto, Japón. Con Maestría en Ingeniería Química de la Universidad de los Andes y pregrado en ingeniería química de la Universidad de América. Se ha desempeñado como docente, conferencista e investigadora. Conocimiento y experiencia en seguridad de procesos, análisis y evaluación de riesgos y gestión del riesgo de desastres, entre otros. Manejo de temas asociados a riesgo tecnológico y riesgo Natech (eventos de origen natural que desencadenan accidentes industriales). Experiencia en formulación y desarrollo de proyectos de investigación a nivel nacional e internacional asociados a dichas temáticas.



Esta guía fue desarrollada por el Consejo
Colombiano de Seguridad
Todos los derechos reservados
2024

Nota legal: el contenido de esta publicación está protegido por derechos de autor. Queda prohibida su reproducción total o parcial con fines comerciales y/o de divulgación masiva sin la previa autorización expresa y por escrito del Consejo Colombiano de Seguridad. En caso de utilizar parte del contenido para fines académicos, se debe incluir una referencia adecuada que identifique claramente la fuente, indicando el título de la publicación, el autor, el año de publicación y el Consejo Colombiano de Seguridad como la entidad editora de la publicación [o editora de la publicación y titular de los derechos de autor]. Para solicitudes de reproducción comercial, comuníquese al correo publicaciones@ccs.org.co.

Presidenta Ejecutiva

Adriana Solano Luque

Consejo Editorial

Diana Carolina Forero Buitrago
Lizeth Viviana Salamanca Galvis
Jacqueline Mesa Sierra
Johan Andrés García Meneses
Carolina Antolínez Figueroa

Comunicaciones CCS

Diana Carolina Forero Buitrago
Lizeth Viviana Salamanca Galvis
Alexandra Rojas Campos
Andrés Felipe Roa Cuevas

Revisión técnica

Rafael Amaya Gómez
Johan Andrés García

Corrección de estilo

Diana Carolina Forero Buitrago

Concepto gráfico, diseño y diagramación

Juan Carlos Soriano Hernández

Centro de Diseño CCS

Germán Bonil Gómez
Diego Andrés Chisco Arias
Andrés Méndez Medina
Juan Ricardo Mendoza Plazas
Daniel Ricardo Murillo Hernández
Yudy Katherine Ramírez Martínez
Juan Carlos Soriano Hernández
Jaime Alberto Valero Vergel

Fotografía

Shutterstock.com
Archivo particular

Consejo Técnico

Armando Agudelo Fontecha
Carlos Ignacio Correa
Clara Inés Cárdenas
Diego Hernán Pérez
Felipe Muñoz
Héctor Gutiérrez Pulido
Jorge Arturo Isaza
Nelcy Blanco
Patricia Canney
Ricardo Vásquez



Contenido

Listado de figuras	4
--------------------	---

Listado de tablas	4
-------------------	---

Capítulo 1: Introducción a la seguridad de procesos	6
---	---

1.1.	Conceptos básicos sobre seguridad de procesos	7
1.1.1.	¿Cómo se diferencia la Seguridad de Procesos de la Seguridad Industrial?	8
1.1.2.	Principios en peligrosidad de sustancias	11
1.2.	Dinámica accidental	13
1.2.1	Tipos de causas	14
1.2.2	Tipos de consecuencias	15
1.2.3	Escenarios Natech	16
1.3.	Accidentes ocurridos en el mundo y sus lecciones aprendidas	17

Capítulo 2: Gestión de seguridad de procesos	23
--	----

2.1.	Correlación de la gestión de seguridad de procesos con el programa de prevención de accidente mayor en Colombia y con el SG-SST	24
2.2.	Valoración de riesgos	25
2.2.1.	¿Qué es la identificación del riesgo?	26
2.2.2.	¿En qué consiste el análisis y la evaluación de riesgos?	26
2.2.3.	¿Cómo se aborda el tratamiento del riesgo en la seguridad de procesos?	28
2.3.	Algunas técnicas/métodos para la identificación y análisis de riesgos	30
2.4.	Toma de decisiones para seleccionar técnicas de análisis y evaluación de riesgos	34

CAPÍTULO 3: Cultura de seguridad de procesos	36
--	----

3.1	Indicadores de desempeño y métricas en seguridad de procesos	37
3.1.1	Tipos de métricas de gestión de seguridad de procesos	40

Glosario	42
----------	----

Referencias	44
-------------	----



Listado de figuras

Figura 1. Ejemplo del enfoque de la salud y seguridad en el trabajo	8
Figura 2. Ejemplo del enfoque de la seguridad de procesos	9
Figura 3. Límites de inflamabilidad del monóxido de carbono (CO)	11
Figura 4. Pentágono de explosión	12
Figura 5. Secuencia de tres pasos en los accidentes industriales	13
Figura 6. Dinámica accidental de un accidente industrial por pérdida de contención o energía	13
Figura 7. Clasificación de causas y consecuencias de un evento accidental por pérdida de contención o de energía	14
Figura 8. Estructura de un árbol de eventos	16
Figura 9. Comparación de características entre accidente tecnológico y evento Natech	17
Figura 10. Pilares del sistema de gestión de seguridad de procesos basado en riesgos	24
Figura 11. Correlación entre SG-SST-PSM-PPAM	24
Figura 12. Proceso de gestión del riesgo según norma ISO 31000	25
Figura 13. Identificación de riesgos	26
Figura 14. Fases del análisis de riesgo	27
Figura 15. Aproximaciones del análisis de riesgo	27
Figura 16. Explicación del concepto ALARP	29
Figura 17. Ciclo del tratamiento del riesgo	30
Figura 18. Técnicas de identificación del riesgo	31
Figura 19. Técnicas para el análisis de riesgo	32
Figura 20. Tipos de información de entrada y datos resultantes en un análisis de riesgos	34
Figura 21. Criterios para seleccionar las herramientas o técnicas de identificación y análisis del riesgo	35
Figura 22. Principios clave para el desarrollo, evaluación y mejora continua de la cultura de seguridad de procesos	37
Figura 23. Modelo del queso suizo	38
Figura 24. Pirámide de seguridad de procesos	40

Listado de tablas

Tabla 1. Paralelo entre los enfoques de la seguridad industrial (o SST) y la seguridad de procesos	9
Tabla 2. Dosis letal 50 - Rangos de clasificación	12
Tabla 3. Registros de eventos según origen y actividad	15
Tabla 4. Registro por tipo de evento	15
Tabla 5. Algunos eventos accidentales ocurridos a lo largo de la historia y sus lecciones aprendidas	18
Tabla 6. Descripción de algunas técnicas para la identificación del riesgo	31
Tabla 7. Descripción de algunas técnicas para el análisis del riesgo	33
Tabla 8. Aspectos por considerar de las métricas con enfoque en los niveles de severidad de la pirámide de seguridad de procesos	41
Tabla 9. Métricas de actividad y resultado	41



GUÍA TÉCNICA

**Nociones de seguridad
de procesos**





Capítulo 1

Introducción a la seguridad de procesos

Hace algunos años la concepción de “seguridad” se asociaba con la prevención de accidentes laborales, centrándose en la protección personal de los trabajadores. Sin embargo, eventos accidentales como Flixborough (Reino Unido, 1974) o Deepwater Horizon (Golfo de México, 2010) han demostrado la necesidad de tener un enfoque más amplio que involucre el proceso en sí, reconociendo la posibilidad de eventos como incendios, explosiones o dispersiones tóxicas, que pueden generar pérdidas de vidas humanas, económicas o del proceso productivo. Bajo este enfoque, denominado prevención de pérdidas, las plantas de procesos industriales deben propender por hacer las cosas bien desde el principio y concebir un diseño, construcción y operación segura, para limitar la ocurrencia de eventos críticos y reducir las afectaciones de su posible materialización.

Es así como desde 1960 se ha destacado la necesidad de garantizar el funcionamiento seguro de las plantas de proceso. Así mismo, se ha evidenciado que, para garantizar la seguridad de plantas industriales, se requiere el uso de herramientas tecnológicas apropiadas que suministren información adecuada para soportar la toma de decisiones en torno a la seguridad, al diseño y operación del proceso. Como resultado, progresivamente se desarrolló y adoptó en toda la industria un cambio de paradigma hacia una visión más holística e integrada de la seguridad de los procesos productivos. Particularmente, la industria química, petroquímica y de petróleos manejan sustancias peligrosas, como material inflamable, explosivo o (eco)tóxico, por lo que requieren mayores esfuerzos para garantizar un entorno seguro de sus operaciones y de sus trabajadores.

Derivado de lo anterior, actualmente la seguridad tiene el mismo grado de importancia que la producción y se ha convertido en una disciplina científica que incluye teorías y prácticas altamente técnicas y complejas, principalmente abordadas y desarrolladas por ingenieros dedicados a la seguridad de procesos. Es así como la seguridad de procesos se define como un marco disciplinado para administrar la integridad de los sistemas y procesos operativos que manejan sustancias peligrosas mediante la aplicación de buenos principios de diseño, ingeniería y prácticas operativas (CCPS, 2023). Entendiendo que los esfuerzos se centran en la reducción de riesgos asociados con el manejo, procesamiento, transporte o almacenamiento de materiales peligrosos que pueden desencadenar una pérdida de material o energía con la potencialidad de resultar en incendios, explosiones o liberaciones tóxicas.

Se entiende entonces que la seguridad de procesos tiene un enfoque preventivo, que utiliza como herramienta el análisis de escenarios accidentales probables, mediante la identificación de peligros, análisis y evaluación de riesgos, el posible tratamiento de los riesgos y el diseño de nuevas herramientas ingenieriles para evitar pérdidas asociadas a la posible materialización de esos escenarios. Por lo tanto, constituye una práctica fundamental que requiere el involucramiento de todos los empleados, desde los operarios hasta los gerentes de la compañía, para una implementación exitosa y evitar así que los peligros inherentes al proceso causen accidentes catastróficos.



1.1. Conceptos básicos sobre seguridad de procesos

La seguridad de procesos también puede definirse más ampliamente como el área de la ingeniería encargada de elaborar y aplicar herramientas, técnicas y tecnologías que permitan prevenir pérdidas y afectación al personal, la comunidad, propiedad y ambiente, asociadas a las fallas de diseño, mantenimiento u operación de los procesos productivos. Estas fallas pueden ocasionar la liberación

no controlada de sustancias peligrosas y energía (Muñoz Giraldo et al., 2015).

Su énfasis en la prevención de pérdidas está directamente asociado con una cultura de seguridad sólida y robusta, lo que implica que exista claridad sobre los conceptos, herramientas y aproximaciones utilizadas para fortalecer la seguridad de las instalaciones industriales. Por lo tanto, es importante que se entiendan los conceptos básicos para evitar confusiones. A continuación, se detallan algunos de ellos:

Accidente	Un evento que puede causar (o ha causado) un daño significativo a los trabajadores, el medio ambiente, la propiedad y la comunidad circundante.	(Crowl & Louvar, 2002)
Consecuencia	El resultado indeseable de un evento de pérdida, generalmente medido en los efectos sobre la salud y la seguridad, los impactos ambientales, la pérdida de propiedad y los costos de interrupción del negocio.	(Crowl & Louvar, 2002)
Cultura de seguridad de procesos	El conjunto común de valores, comportamientos y normas en todos los niveles en una instalación o en una organización más amplia que afecta la seguridad del proceso.	(Crowl & Louvar, 2002)
Escenario	Descripción de los eventos que pueden resultar en un accidente o incidente. La descripción debe contener la información relevante para definir las causas raíz.	(Crowl & Louvar, 2002)
Evento de seguridad de procesos	Un evento que es potencialmente catastrófico, es decir, un evento que involucra la liberación/pérdida de contención de materiales peligrosos que pueden tener consecuencias ambientales y de salud a gran escala.	(CCPS, 2023)
Falla	El final de la habilidad de una entidad (por ejemplo, equipo, sistema, infraestructura, etc.) para desarrollar una función requerida.	(Muñoz Giraldo et al., 2015)
Gestión de la seguridad de procesos (PSM)	Un sistema de gestión que se centra en la prevención, la preparación, la mitigación, la respuesta y la restauración de emisiones catastróficas de sustancias químicas o energía de un proceso asociado con una instalación.	(CCPS, 2023)
Inflamable (sustancia)	Una sustancia que se puede quemar con una llama si es mezclado con un comburente u oxidante gaseoso (por ejemplo, oxígeno) y luego se enciende.	(CCPS, 2023)
Peligro	Condición química o física que tiene el potencial de causar daño a las personas, la propiedad o el medio ambiente.	(CCPS, 2023)
Pérdida de contención primaria (LOPC)	Una liberación no planificada o no controlada de material de contención primaria, incluidos materiales no tóxicos y no inflamables (por ejemplo, vapor condensado caliente, nitrógeno, CO ₂ comprimido o aire comprimido).	(CCPS, 2023)
Riesgo	Medida de lesión humana, daño ambiental o pérdida económica en términos tanto de la probabilidad del accidente como de la magnitud de la pérdida o daño (consecuencia).	(CCPS, 2023)
Seguridad o prevención de pérdidas	Prevención de accidentes mediante el uso de tecnologías apropiadas para identificar los peligros de una planta química y eliminarlos antes de que ocurra un accidente.	(CCPS, 2023)
Sustancia o material peligroso	Un elemento, compuesto, mezcla o proporción que, en virtud de sus propiedades químicas o físicas, representa algún tipo de peligro físico, tóxico o (eco) tóxico. También se incluyen sustancias que normalmente no son consideradas peligrosas, pero que bajo ciertas condiciones reaccionan con otras sustancias (por ejemplo, reacciones fuera de control) o bajo ciertas condiciones de operación (presión y temperatura).	(Muñoz Giraldo et al., 2015)



1.1.1. ¿Cómo se diferencia la Seguridad de Procesos de la Seguridad Industrial?

Las infraestructuras industriales, bien sean de procesamiento, almacenamiento o transporte, están sujetas a una gran variedad de peligros. Estos pueden estar relacionado al proceso en sí, por lo que se pueden relacionar peligros de tipo mecánico, operacional o de las propiedades físico-químicas de las sustancias involucradas, como toxicidad o inflamabilidad. Otros ejemplos vienen de la misma dinámica industrial, la cual involucra equipos en movimiento, superficies calientes o equipos eléctricos en una disposición o área específica expuesta a amenazas de origen natural y a errores humanos. En cualquier caso, tanto los trabajadores como la población circundante están expuestos a estos peligros que pueden afectarlos directa o indirectamente de forma negativa. Bien sea desde una perspectiva personal en el caso de lesiones en el desarrollo de su trabajo, como en los efectos desencadenados por eventos como incendios, explosiones o liberaciones tóxicas.

Uno de los elementos clave que es necesario abordar, cuando hablamos de seguridad, es la diferencia que existe entre las definiciones y aproximaciones de la seguridad industrial, también conocida como Seguridad y Salud en el Trabajo (SST) y la seguridad de procesos (safety, en inglés). Esto cobra relevancia en un contexto como el colombiano donde la Seguridad y Salud en el Trabajo son más reconocidos que la Seguridad de Procesos y suelen abordarse indistintamente, sin tener en cuenta el enfoque que cada una de estas aproximaciones tiene, las cuales, si bien son complementarias, no son intercambiables.

La SST se encarga de anticipar, reconocer, evaluar y controlar los riesgos que puedan afectar la seguridad y la salud en los espacios laborales (MinTrabajo, 2023). Para ello, plantea el uso de elementos de protección personal (EPP) como cascos, guantes, botas y demás elementos, prácticas y protocolos que le permitan al trabajador desarrollar sus actividades en condiciones seguras (ver Figura 1). Por lo tanto, el énfasis principal está orientado a la seguridad de los trabajadores.

Figura 1. Ejemplo del enfoque de la salud y seguridad en el trabajo



Fuente: Shutterstock.

Es así como la Seguridad y Salud en el Trabajo (Muñoz Giraldo et al., 2015) :

- Se preocupa por prevenir y mitigar las pérdidas mediante la preservación y protección tanto de personas durante el desarrollo de sus actividades, como de otros bienes físicos en el lugar de trabajo.
- Se encarga principalmente de monitorear el lugar de trabajo y desarrollar recomendaciones.
- Se le conoce como la seguridad personal.

Cabe destacar que a pesar de que la SST se centra en el bienestar y salud del trabajador, también contempla una co-

relación con la seguridad intrínseca del proceso, de manera que se aporte a la seguridad de los sistemas productivos.

La seguridad de procesos, por su parte, está enfocada en la seguridad de la instalación industrial y su proceso productivo, de manera que se enfoca en la prevención de pérdidas derivadas de la potencial liberación de sustancias químicas peligrosas, a través de la identificación de peligros, la evaluación técnica y el diseño de nuevas características de ingeniería para evitar dichas pérdidas en la instalación (Crowl & Louvar, 2002). A diferencia de la SST, su enfoque está más alineado con la “salud” del proceso productivo y la continuidad de negocio. La figura 2 presenta el enfoque de esta aproximación.



Figura 2. Ejemplo del enfoque de la seguridad de procesos



Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede afirmar que la seguridad de procesos (Muñoz Giraldo et al., 2015):

- Es una disciplina enfocada en el manejo de la integridad de los sistemas operativos y de los procesos que manejan sustancias peligrosas, donde se aplican principios de buenas prácticas de ingeniería (por ejemplo, diseño, mantenimiento, operación).
- Se enfoca en la prevención y control de eventos con el potencial de liberar sustancias peligrosas y energía.

- Tales liberaciones pueden resultar en efectos tóxicos, incendios, explosiones, que pueden provocar muertes, heridos, daño a la propiedad, daño ambiental y pérdida de producción.

En términos generales, la seguridad y salud en el trabajo busca evitar que ocurra una fatalidad, mientras que la seguridad de procesos busca evitar que ocurra una catástrofe. La Tabla 1 presenta una comparación más detallada entre las dos aproximaciones

Tabla 1. Paralelo entre los enfoques de la seguridad industrial (o SST) y la seguridad de procesos

Seguridad industrial	Seguridad de procesos
1. Aplicable a todos los escenarios del lugar de trabajo y cualquier industria.	1. Aplicable principalmente a industrias como la química, petroquímica o de energía (alto riesgo) o a cualquier industria que contenga materiales peligrosos.
2. Eventos con una severidad baja y una probabilidad de ocurrencia alta.	2. Eventos con una severidad alta y una probabilidad de ocurrencia baja.
3. Busca prevenir una serie de incidentes ¹ que afecten a los trabajadores.	3. Busca prevenir un incidente catastrófico.
4. Debe ser nutrida de los gerentes, supervisores, personal operativo y expertos en seguridad industrial (por ejemplo, transporte de sustancias peligrosas, elementos eléctricos).	4. Debe ser nutrida por los directivos, facilitadores de toma de decisiones, personal operativo y expertos de seguridad de procesos (por ejemplo, accidente mayor).

Fuente: adaptado de Muñoz Giraldo et al., 2015.

¹ Un evento, situación o condición que resulta, o podría resultar (Causa Potencial), directa o indirectamente en un accidente o incidente. Fuente: CCPS. (2023). CCPS Process Safety Glossary | AIChE. Retrieved 26-02 from <https://www.aiche.org/ccps/resources/glossary?title=I#views-exposed-form-glossary-page>



Para tener en cuenta...

En este momento podrían surgir preguntas sobre la necesidad de contemplar estos dos enfoques y reconocer sus diferencias. Es clave tener esto presente, tomando como punto de referencia lo ocurrido en el accidente de la plataforma *offshore* Deep Water Horizon (Golfo de México).

En la noche del 20 de abril de 2010 ocurrió una fuga de gas y una posterior explosión e incendio en la plataforma petrolera, lo que provocó la muerte de 11 personas, 17 heridas, cinco millones de barriles derramados en el Golfo de México y una pérdida total de la plataforma. La secuencia de eventos parte del hecho de que²:

- Las actividades de exploración habían terminado y la tripulación iba a abandonar el pozo para que una instalación de producción pudiera extraer los hidrocarburos.
- El personal malinterpretó los resultados de la integridad del cemento necesario para el abandono, removiendo la columna del fluido de perforación.
- A medida que se retiraba este fluido de perforación, también se dirigían hidrocarburos hacia la plataforma, provocando un escape.
- La tripulación activó el BOP (Blowout Preventer) para sellar el pozo, sin embargo, no pudo evitar el flujo de hidrocarburos hacia la plataforma. La capacidad del separador de lodo-gas fue superada y como resultado se tuvo el piso de la plataforma lleno de lodo de perforación y de gas.
- Los hidrocarburos encontraron una fuente de ignición, provocando una explosión y un incendio.



Imagen tomada de la Guardia Costera de los EE. UU. del evento de Deep Water.

Fuente: <https://www.dco.uscg.mil/Portals/9/OCSNCOE/Casualty-Information/DWH-Macondo/DWH-Fire-Boats.jpg?ver=UIG2hbe6w1BLb4SCvw62Xg%3d%3d>

Dentro de las conclusiones obtenidas en el reporte del accidente se encontró que la gerencia tenía como principal interés la seguridad personal y desatendió la seguridad del proceso. Esto se puede demostrar a través de las declaraciones de Transocean (texto traducido)³:

“A pesar de la trágica pérdida de vidas en el Golfo de México, logramos un registro estadístico de seguridad ejemplar, medido por nuestra tasa total de incidentes registrables y nuestra tasa de gravedad potencial total”.

“Según lo medido por estos estándares, registramos el mejor año en desempeño en seguridad en la historia

de nuestra empresa, lo que refleja nuestro compromiso de lograr un entorno libre de incidentes, todo el tiempo y en todas partes”.

Esto demuestra que estaban enfocados en que los empleados no se vieran afectados durante el desarrollo de sus funciones, mas no de que las condiciones fueran propicias para una catástrofe como la que ocurrió en 2010, donde se priorizó la producción sobre la seguridad, no se atendieron los procedimientos de mantenimiento ni se tenía una información actualizada para soportar la toma de decisiones.

² **Fuente:** CSB (2014), Investigation Report Volume 1. Explosion and fire at the Macondo Well, US Chemical Safety Board, Report No. 2010-10-I-OS

³ **Fuente:** Financial Times (2011), Transocean awards bonuses ‘for safety’ in 2010, Disponible en: <https://www.ft.com/content/e2b81ec4-5cca-11e0-ab7c-00144feab49a>



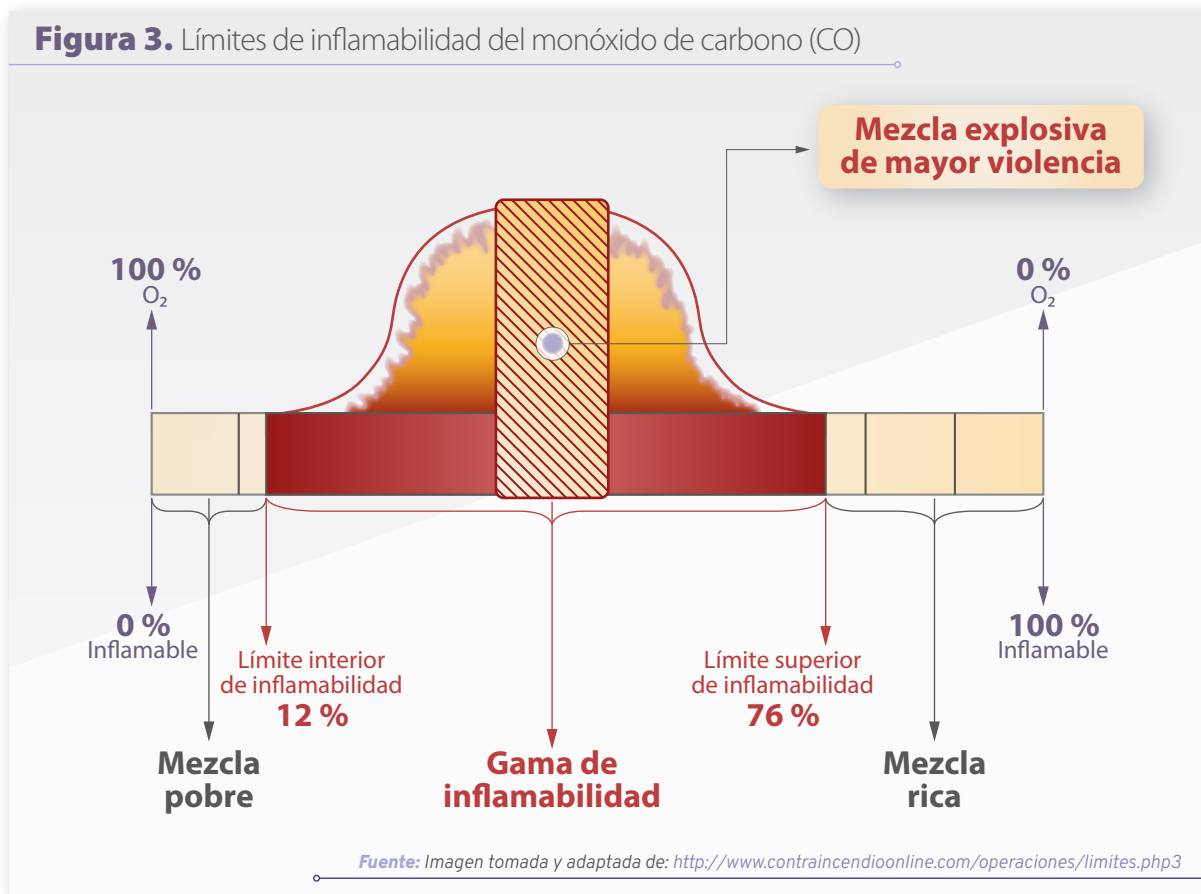
1.1.2. Principios en peligrosidad de sustancias

Hasta el momento ha sido claro que la seguridad de procesos tiene como punto focal la gestión de sustancias peligrosas con el fin de no desencadenar eventos críticos como incendios, explosiones o dispersiones tóxicas. En este sentido, es necesario que se tengan herramientas básicas que permitan la identificación del nivel de peligrosidad de estas sustancias, por lo que, a continuación, se presentan conceptos básicos en torno a inflamabilidad, toxicidad y explosividad de sustancias y cómo identificar dichos niveles de peligrosidad.

Para comenzar, es necesario mencionar que para que haya una propagación de una llama se necesitan tres componentes fundamentales: un material oxidante como el oxígeno, un combustible como la gasolina y una fuente de ignición

como una chispa o una superficie caliente. Lo que usualmente se denomina el triángulo de fuego. Lo que no se conoce en gran medida es que para que haya dicha propagación de llama, el combustible debe estar dentro de unos rangos de concentración (superior e inferior), dentro de los cuales la sustancia mezclada con el aire es inflamable, es decir, puede llevar a cabo la reacción de combustión (i.e., puede quemarse en presencia de oxígeno), los cuales se llaman límites de inflamabilidad. Estos límites son importantes porque si el combustible tiene una concentración por encima (o por debajo) del límite superior (inferior), entonces no hay suficiente oxígeno (combustible) para poder quemarse. Por ejemplo, los límites del metano son concentraciones de 5 % y 15 % mezcladas con aire, lo que usualmente se monitorea en minas subterráneas para no tener una mezcla inflamable y un potencial incendio o explosión.

Figura 3. Límites de inflamabilidad del monóxido de carbono (CO)



Dependiendo de cómo es la dinámica y el entorno de una mezcla inflamable, puede ocurrir también un escenario de explosión, los cuales se pueden dividir entre detonaciones y deflagraciones, dependiendo si su onda de choque es mayor o menor a la velocidad del sonido. Para ello, las condiciones donde la mezcla es inflamable también definen unos límites donde una sustancia es explosiva. Lo interesante sobre estos límites es que se pensaría que la fuerza resultante de una

explosión sería mayor para una más alta cantidad de combustible, pero en realidad su pico se encuentra a la mitad de ambos límites⁴. Otro elemento por destacar en cuanto a explosiones es que no se limitan a sustancias en estado líquido o gaseoso, sino que también incluyen material particulado o polvo. Para este último caso se requiere que el material particulado este disperso y que esté confinado, como se ilustra en la siguiente figura.

⁴ Fuente: Sirisawatand et al, (2012). Learning Equipment for the Flammability Limits of Liquefied Petroleum Gas. American Journal of Applied Science, Vol. 9, No. 8



Figura 4. Pentágono de explosión



Finalmente, en términos de toxicidad se debe mencionar que cada sustancia tiene propiedades que definen la dosis en la cual una persona o individuo podría verse afectado al estar expuesto. Dentro de estos elementos se encuentran la DL50 o CL50, correspondiente a la dosis y concentración letal al 50 %, respectivamente. Estos parámetros se definen como la dosis o concentración necesaria para matar a la

mitad de un conjunto de animales expuestos luego de un tiempo dado. Estas pruebas son indicadores que se pueden complementar, con umbrales de exposición industrial como el TLV (valor límite umbral), TWA (promedio de tiempo ponderado) o STEL (límite de tiempo de exposición corta) que definen condiciones máximas de exposición desde una perspectiva ocupacional⁵.

Tabla 2. Dosis Letal 50 - Rangos de clasificación

DL50	Clasificación
<5 mg/kg	Extremadamente tóxico
5-50 mg/kg	Altamente tóxico
50-500 mg/kg	Moderadamente tóxico
500-5,000 mg/kg	Ligeramente tóxico
5000-15,000 mg/kg	Prácticamente no tóxico
>15,000 mg/kg	Relativamente inofensivo

Fuente: ERHIRHIE et al. (2018).

Es importante mencionar que las propiedades de inflamabilidad, explosividad o toxicidad son intrínsecas a cada sustancia y se ven afectadas por diferentes condiciones de operación como la temperatura o presión. Dependiendo

del estado de la sustancia, composición y condiciones del entorno (por ejemplo, humedad o velocidad del viento) puede llevarse a cabo distintas dinámicas accidentales, tal como se describe a continuación.

⁵ Fuente: ARL SURA (2023). Términos de uso común, disponible en: <https://www.arlsura.com/index.php/component/content/article?id=624>



1.2. Dinámica accidental

Una de las afirmaciones que suele realizar la industria de procesos es que las plantas industriales son muy seguras comparadas con otras actividades cotidianas en las cuales suelen presentarse un mayor número de fatalidades y con mayor frecuencia (por ejemplo, manejar un vehículo). Sin embargo, siempre existe la posibilidad de que se presente un accidente de proporciones catastróficas en las instalaciones industriales dadas las características del proceso que pueden incluir, entre otros factores, altas temperaturas, altas presiones y el uso de sustancias químicas peligrosas.

Aunado a lo anterior, el crecimiento en tamaño y complejidad de las instalaciones industriales a nivel mundial ha llevado a que exista un mayor potencial de afectaciones, tanto humanas como económicas. Estas pueden desencadenarse

por la pérdida de contención de una sustancia química y la posterior materialización de un incendio, una explosión o una nube tóxica, pero también pueden darse por retrasos en la puesta en marcha de la operación o por el tiempo de inactividad de la misma (Mannan, 2014).

Es así como resulta relevante considerar y analizar cuáles pueden ser las dinámicas accidentales derivadas de la pérdida de contención de una sustancia química peligrosa. Conocer sus causas y consecuencias es fundamental para proponer medidas preventivas y mitigativas acordes con los potenciales escenarios que se pueden materializar en una instalación industrial. La consideración de las causas y fuentes del riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que puedan ocurrir permite relacionar las amenazas y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales y sus probabilidades (Ley 1523, 2012).

Figura 5. Secuencia de tres pasos en los accidentes industriales



Bajo este panorama, se entiende que la mayoría de los accidentes en la industria siguen una secuencia de tres pasos, tal como se muestra en la Figura 5. Primero, con la ocurrencia de un evento iniciador, que representa el comienzo de una situación potencial de peligro, como en el caso de la presencia de

una fuente de ignición con un material inflamable. En segundo lugar, se encuentran eventos que generan una propagación que puede potenciar o mitigar las consecuencias del evento y, por último, eventos finales. La dinámica accidental se puede observar con mayor detalle en la Figura 6.

Figura 6. Dinámica accidental de un incidente industrial por pérdida de contención o energía



En Colombia, este tipo de escenarios accidentales en la industria de procesos y el riesgo asociado se

definen como riesgo tecnológico o accidente tecnológico.

Riesgo tecnológico	Accidente tecnológico
<p>Daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos mayores generados por el uso y acceso a la tecnología, originados en sucesos antrópicos, naturales, socio-naturales y propios de la operación.</p> <p>Se excluyen de su alcance I) los riesgos asociados a la seguridad informática y gestión de información, con excepción de las instalaciones operativas, II) los establecimientos, las instalaciones o zonas de almacenamientos militares, III) los riesgos asociados a las radiaciones ionizantes que tienen su origen en sustancias, IV) las armas o agentes de destrucción masiva y V) los riesgos asociados a los agentes biológicos, con excepción de las instalaciones operativas (UNGRD, 2013, 2017).</p>	<p>Eventos generados por el uso y acceso a la tecnología, originados por eventos antrópicos, naturales, socio-naturales y propios de la operación. Comprende fugas, derrames, incendios y explosiones asociados a la liberación súbita de sustancias y/o energías con características de peligrosidad (UNGRD, 2017).</p>

1.2.1 Tipos de causas

Las causas de los accidentes industriales pueden ser variadas y se pueden agrupar en cinco categorías: **1)** fallas técnicas u operacionales, **2)** fallas mecánicas, **3)** error humano, **4)** amenazas naturales y **5)** sabotaje (ver Figura 7). Las causas de la pérdida de contención de sustancias químicas peligrosas dependen de varios factores, entre ellos, la edad de construcción de la planta, su ubicación, la consistencia de los programas de mantenimiento y una cultura robusta de seguridad de procesos.

El informe de las 100 mayores pérdidas en la industria de hidrocarburos (Marsh JLT Specialty, 2020) resume las pérdidas asociadas a daños en la infraestructura de la industria de extracción, transporte y procesamiento de hidrocarburos entre 1974 y 2019. Evidencia que en los pri-

meros 10 años de operación de una planta, la mayoría de las pérdidas son causadas por fallas operacionales, mientras que, a medida que pasa el tiempo, aquellas plantas con más de 30 años de operación registran que el 65 % de sus fallas están relacionadas con la integridad mecánica de la misma (Marsh JLT Specialty, 2020). Además, se ha identificado que el error humano, la pérdida de personal experimentado y un intercambio limitado de lecciones aprendidas hacen que aumente el riesgo en la planta o el activo (SPHERA, 2022).

En Colombia, por ejemplo, cifras del Consolidado anual de emergencias de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres muestran que entre 2004 y 2016 se reportaron 6477 eventos asociados al derrame de hidrocarburos, donde el 3,2 % tuvo como causa una amenaza natural o socio-natural (UNGRD, 2018).

Figura 7. Clasificación de causas y consecuencias de un evento accidental por pérdida de contención o de energía



Fuente: elaboración propia.



Teniendo en cuenta lo anterior, una buena práctica dentro de la seguridad de procesos es identificar los peligros y las causas raíz de un posible evento accidental. Para ello, es importante que se analicen las fuentes de riesgo que podrían desencadenar dicho escenario en el sistema bajo análisis, contemplando tanto condiciones normales de operación como condiciones inesperadas o anormales (Muñoz Giraldo et al., 2015). A manera de ejemplo, se presenta la recopilación obtenida desde principios de siglo hasta 1992 de acuerdo con la base de datos MHIDAS, donde se resaltan los sistemas de transporte como el terrestre por ferrocarril o por tuberías, equipos de plantas de procesos, como recipientes presurizados o tuberías de procesos, y equipos de almacenamiento a presión atmosférica o contenedores móviles.

Tabla 3. Registros de eventos según origen y actividad

Origen	Registros	Total [%]
Origen general conocido	5992	97,2
Origen general desconocido	176	2,8

Actividad	Registros	Total [%]
Transporte	2341	39,1
Plantas de proceso	1469	24,5
Plantas de almacenamiento	1044	17,4
Carga/descarga	494	8,2
Doméstico/Comercial	348	5,8
Almacenamiento de sólidos	225	3,8
Almacenamiento de residuos	71	1,2

Fuente: ERHIRHIE et al. (2018).



1.2.2 Tipos de consecuencias

Las consecuencias de un accidente industrial están asociadas con el impacto que causan sobre un blanco de interés, es decir, sobre las personas, el medio ambiente o la infraestructura cercana. Por lo anterior, de acuerdo con lo presentado en la Figura 7, las consecuencias se clasifican en: **1)** afectación a personas, **2)** afectación ambiental, **3)** pérdidas socioeconómicas y **4)** daño reputacional. Dentro de cada una de estas categorías se puede especificar la afectación según la severidad de las consecuencias. Por ejemplo, para determinar la afectación a personas suelen evaluarse el número de heridos y/o fatalidades. Sin embargo, este constituye el último elemento de la cadena de sucesos accidentales. Para llegar allí, la pérdida de contención de la sustancia química peligrosa ha tenido que generar previamente un escenario de incendio, explosión, contaminación de suelo o acuíferos por derrames, o la formación de una nube tóxica.

Con relación a estos escenarios, los incendios son los más comunes, seguidos de las explosiones y las nubes tóxicas. Sin embargo, son estas últimas las que pueden causar un mayor número de fatalidades debido a la gran área que pueden llegar a afectar. Respecto a las pérdidas económicas, las explosiones son aquellas que puedan causar mayores pérdidas en una instalación industrial.

Tabla 4. Registro por tipo de evento

Nota: los porcentajes no suman 100 % por la posibilidad de eventos concatenados.

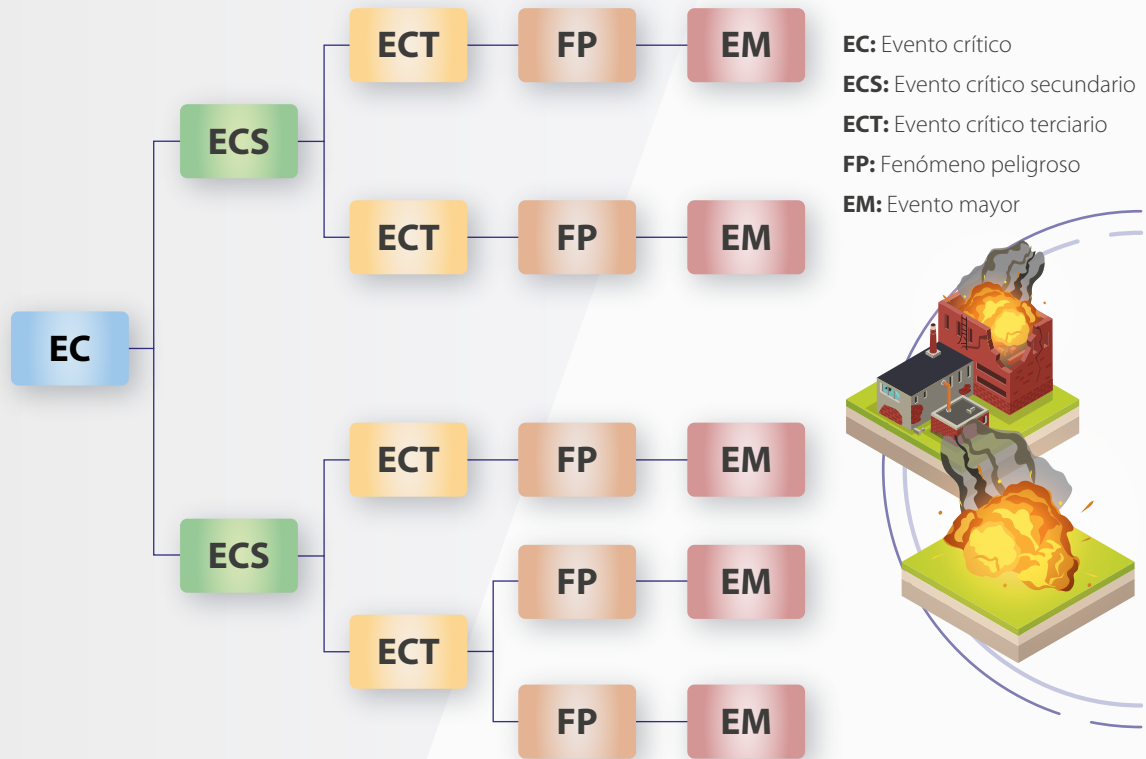
Origen	Registros	[%]
Escape	3022	51
Incendio	2603	44
Explosión	2133	36
Nube de gas	719	12,1

Fuente: (Casal et al., 1999).

Una forma de identificar estos escenarios es utilizando los árboles de eventos. Un buen punto de partida son los árboles genéricos desarrollados por MIMAH (Delvosalle et al., 2004), los cuales se pueden modificar según el escenario bajo análisis. Estos árboles se enfocan en describir las consecuencias asociadas a la materialización de un accidente o evento crítico (EC) y cuáles son los fenómenos peligrosos (FP) asociados a estas consecuencias; es decir, los sucesos finales que pueden generar la afectación, como los incendios, las explosiones, los derrames o las nubes tóxicas. También es viable considerar que a pesar de que se dé una liberación de material peligroso no se tengan consecuencias ni fenómenos peligrosos asociados. Esto ocurre cuando las barreras de mitigación son efectivas. Para mostrar la estructura de estos árboles de eventos, se presenta la siguiente figura.



Figura 8. Estructura de un árbol de eventos



EC: Evento crítico
ECS: Evento crítico secundario
ECT: Evento crítico terciario
FP: Fenómeno peligroso
EM: Evento mayor

Fuente: adaptado de Delvosalle et al., 2006.

Como se observa, el último eslabón de la cadena de sucesos son los eventos mayores (EM), definidos como los posibles efectos sobre un blanco, es decir, sobre las personas, el medio ambiente o la infraestructura. Los EM están directamente asociados a los fenómenos peligrosos y se manifiestan en términos de radiación térmica, sobrepresión, proyectiles, efectos tóxicos o contaminantes.

Desde el punto de vista de la seguridad de procesos, es importante traducir esos hallazgos del análisis de las posibles consecuencias de un evento crítico en términos prácticos para soportar la toma de decisiones. Por lo tanto, suele llevarse a cabo un proceso de evaluación del riesgo, de manera tal que se puedan comparar los resultados con unos estándares establecidos (empresariales, nacionales o internacionales) y soportar así la toma de decisiones, para priorizar las acciones a implementar. Dado que los árboles de eventos también permiten incluir la información respecto a probabilidad de ocurrencia de los eventos críticos contemplados (siempre y cuando se cuente con dicha información) resulta una herramienta muy útil para determinar qué tan factible es que se presente el escenario analizado.

Su utilidad, por lo tanto, se enmarca en lo establecido por la legislación colombiana, donde se pueden estimar los daños y las pérdidas potenciales, y comparar sus resultados con criterios de seguridad establecidos, con el propósito de definir tipos de intervención y alcance de la reducción del

riesgo y preparación para la respuesta y la recuperación (Ley 1523, 2012).

1.2.3 Escenarios Natech

Una de las causas de un evento accidental en la industria son las amenazas naturales, tal como se presentó en la Figura 7. Este tipo de escenarios ha recibido especial atención en las últimas décadas, aproximadamente desde 1960, dada la envergadura de las consecuencias que han generado en diferentes países y su capacidad de afectar grandes extensiones del territorio (Suárez-Paba et al., 2019). Sin embargo, fue solo hasta 1994 que los accidentes industriales que involucran la liberación de sustancias químicas peligrosas y que son desencadenados por amenazas naturales recibieron el nombre de Natech (Showalter & Myers, 1994).

El interés por entender, investigar, analizar y gestionar este tipo de escenarios ha ido incrementando a nivel mundial debido a que existe evidencia de que su frecuencia de ocurrencia y la severidad de sus consecuencias ha ido incrementando con los años (Cruz et al., 2004; Lindell & Perry, 1996; Rasmussen, 1995; Sengul et al., 2012; Showalter & Myers, 1994; Young et al., 2004). Además, dada su estrecha relación con eventos hidrológicos y meteorológicos, asociados a su vez con el cambio climático, se ha generado una preocupación internacional por gestionar este tipo de riesgo eficazmente (Luo et al., 2021; OECD, 2003, 2015, 2020, 2022).



Teniendo en cuenta lo anterior, es importante que se entienda la diferencia entre un evento accidental en la industria, también llamado accidente tecnológico, derivado de una falla operacional, técnica, mecánica o error humano y un

evento Natech, cuya causa raíz siempre debe ser una amenaza natural (tales como un sismo, inundación, tsunami, movimiento en masa, descarga eléctrica, entre otros). La siguiente figura presenta esta diferencia.



1.3. Accidentes ocurridos en el mundo y sus lecciones aprendidas

Los accidentes en la industria son cada vez más frecuentes a nivel mundial. Esto puede deberse a diversos factores, entre los que se incluyen un aumento global de la industrialización, diversificación de los riesgos, riesgos emergentes a causa de las nuevas tecnologías (como las energías alternativas), además de una mayor exposición de las infraestructuras ante fenómenos amenazantes. Diversas bases de datos (NRC, ARIA, eMARS, MHIDAS, TAD IChemE, CONCAWE, eNatech, entre otras) han recolectado información sobre estos accidentes, ya sea de carácter tecnológico o Natech. La importancia de estos registros es que permiten nutrir las lecciones aprendidas, de manera que se puedan fortalecer los mecanismos de reducción del riesgo y se tengan industrias mejor y más preparadas ante eventos accidentales que ya han ocurrido en otros lugares del mundo.

Para mostrar un panorama global, se presentan a continuación una serie de eventos (Tabla 5), en el que se

describe brevemente lo ocurrido y se destacan las lecciones aprendidas asociadas. Es conveniente destacar que la materialización de algunos de estos eventos ha tenido repercusiones importantes, desde un punto de vista normativo.

Del mismo modo, han surgido iniciativas de sistemas de gestión de riesgos que buscan prevenir y controlar la ocurrencia de este tipo de accidentes. Estas incluyen, entre otras, la Directiva Seveso I (Directiva 82/501/EEC), adoptada en 1982 a raíz del accidente ocurrido en Seveso, Italia en 1976. La creación, por parte de la Asociación Americana de Ingenieros Químicos (AIChE), del Centro de Seguridad de Procesos Químicos (CCPS por sus siglas en inglés), derivada de la ocurrencia del accidente en Bhopal en 1984 y la creación en Estado Unidos de OSHA (Occupational Safety and Health Administration) en 1970, constituida como una administración con amplia autoridad en temas de seguridad, estándares de salud y aseguramiento de condiciones y lugares de trabajo más seguros (Muñoz Giraldo et al., 2015).



Tabla 5. Algunos eventos accidentales ocurridos a lo largo de la historia y sus lecciones aprendidas

Ubicación del evento	Descripción	Lecciones aprendidas
<p>Flixborough, Inglaterra 1974 <i>(Cameron & Raman, 2005; Crowl & Louvar, 2002)</i></p>	<p>Una falla repentina en una tubería de conexión entre reactores provocó la vaporización de unas 30 toneladas de ciclohexano. La nube de vapor se dispersó por la planta, encontrando una fuente de ignición desconocida tan solo 45 segundos luego de la liberación, lo que generó una explosión y un posterior incendio que tardó 10 días en apagarse por la gran cantidad de sustancias químicas peligrosas almacenadas.</p> <p>La planta fue completamente destruida, 28 trabajadores fallecieron y 36 resultaron heridos. Se afectaron 1821 casas cercanas, 167 tiendas y fábricas, y 53 civiles resultaron heridos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se le dio mayor prioridad a la seguridad de procesos en el Reino Unido. • Resaltó la importancia de la ubicación y protección de los cuartos de control en plantas de proceso. • Condujo a la creación del Comité Asesor sobre Riesgos Mayores (ACMH). • Introdujo la evaluación de consecuencias y el análisis de riesgo.
<p>Seveso, Italia 1976 <i>(Atherton & Gil, 2008; Cameron & Raman, 2005; Crowl & Louvar, 2002)</i></p>	<p>Se generó una fuga en una planta química en el norte de Italia, la cual producía compuestos intermedios para las industrias de cosméticos y farmacéutica. Los productos incluían el 2,4,5-triclorofenol, compuesto tóxico utilizado para la síntesis química de herbicidas.</p> <p>La liberación de la nube de vapor tóxico se dio por la rotura de un disco de la vasija del reactor. La nube contenía varios componentes y subproductos del proceso, incluidos 2,4,5-triclorofenol, etilenglicol, fenoles clorados y también contenía 2,3,7,8-tetracloro-dibenzo-para-dioxina (TCDD).</p> <p>La nube de dioxina contaminó un área densamente poblada de unos 6 km de la planta por efectos de la dirección del viento. Como consecuencia, aproximadamente 3300 animales murieron, cerca de 78.000 más fueron sacrificados y se reportaron 200 casos de enfermedad de la piel (cloracné).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Impulsó la creación de la Directiva Seveso de la Comunidad Europea, un nuevo sistema de regulación sobre el control de riesgos de accidentes industriales mayores que involucran sustancias peligrosas, denominado "Directiva del Consejo 82/501/CEE sobre los riesgos de accidentes graves de ciertas actividades industriales". • Resaltó la importancia del aprendizaje derivado de la captura sistemática de información de accidentes e incidentes.
<p>Bhopal, India 1984 <i>(Cameron & Raman, 2005; Crowl & Louvar, 2002; IChemE, 2022)</i></p>	<p>En una planta de producción de pesticidas, en cuyo proceso el isocianato de metilo (MIC) (compuesto extremadamente peligroso, reactivo, tóxico, volátil e inflamable) era un compuesto intermedio, un tanque de almacenamiento que contenía una gran cantidad de MIC se contaminó con agua u otra sustancia. Esto generó una reacción química exotérmica, que calentó el MIC a una temperatura por encima de su punto de ebullición. Como resultado, los vapores viajaron a través de un sistema de alivio de presión hasta un sistema de depuración y antorcha instalado para consumir el MIC en caso de un escape. Sin embargo, los sistemas de depuración y antorcha no estaban funcionando.</p> <p>Como consecuencia, se liberaron aproximadamente 25 toneladas de vapor tóxico de MIC. La nube tóxica se extendió a la ciudad adyacente, hirió a cerca de 200.000 civiles y generó >2000 fatalidades.</p> <p>Ningún trabajador de la planta resultó afectado así como ningún equipo de la planta resultó dañado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Visibilizó la necesidad de que los reguladores se aseguren de que las empresas manufactureras sean responsables de los costos de limpieza por contaminación y de remediación del sitio cuando finalice la producción. • Se promulgó en la India la Ley de seguro de responsabilidad pública en 1991, con el fin de brindar alivio inmediato a cualquier persona afectada por un accidente mientras manipula sustancias peligrosas. • Estados Unidos promulgó una Ley de Preparación para Emergencias y Derecho a Saber de la Comunidad en respuesta al desastre de Bhopal y la explosión e incendio de la refinería de Phillips Pasadena, Texas en 1989. • La seguridad de procesos ganó un reconocimiento absoluto como una práctica estándar y como resultado muchas iniciativas regulatorias se implementaron a nivel mundial.



Ubicación del evento	Descripción	Lecciones aprendidas
<p>Hamlet, Carolina del Norte, Estados Unidos. 1991 <i>(IChemE, 2022)</i></p>	<p>En una planta procesadora de pollo se presentó una falla en una tubería de alimentación de aceite hidráulico de alta presión, debido a un mantenimiento inadecuado. Esta línea alimentaba una banda transportadora que, a su vez, alimentaba una freidora. Se generó una liberación de aceite presurizado que se atomizó y vaporizó en superficies calientes. Este estalló en una bola de fuego al entrar en contacto con las llamas en la freidora.</p> <p>Se desencadenó un gran incendio que se extendió rápidamente, produciendo grandes cantidades de humo denso, el cual combinaba aceite de soya y pollo quemados, así como el humo derivado del derretimiento del aislamiento de la torre. Adicionalmente, varias tuberías de gas en el techo hicieron ignición y posteriormente explotaron.</p> <p>Como resultado de este accidente, 25 personas perdieron la vida, 54 quedaron heridas con consecuencias como pérdida de visión, quemaduras, enfermedades respiratorias y estrés postraumático.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se evidenció que las áreas de cocción o preparación de alimentos deben estar separadas de otras áreas de proceso. • Expuso la importancia de utilizar materiales no combustibles para la construcción de edificaciones industriales y que las particiones internas deben tener una resistencia al fuego clasificada por tiempo. • Debido a que hubo un financiamiento inadecuado para los inspectores de seguridad de OSHA, mientras que inspectores avícolas del USDA visitaron diariamente la instalación sin identificar las amenazas del proceso, se evidenció la necesidad de que los inspectores de diversas áreas reciban capacitación articulada sobre la identificación de peligros.
<p>Villette-sur-Aube, Francia 2000 <i>(European Commission, 2014)</i></p>	<p>Tormentas eléctricas cerca de una refinería de azúcar provocaron que la empresa dejara de cargar camiones. Como consecuencia, un operador cerró la válvula de fondo del tanque utilizado para las operaciones de carga. Cerca de 10 minutos después, un rayo impactó en el techo de uno de los tanques de almacenamiento de alcohol y provocó una explosión.</p> <p>El techo del tanque se proyectó hacia arriba y volvió a caer dentro del tanque. Se produjo un incendio. El fuego no se extendió más allá del tanque y el caparazón permaneció intacto, pero el impacto creó grietas en la válvula inferior del tanque. Nadie resultó herido en el accidente, pero los daños causados se estimaron en más de 2,3 millones de euros.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • El tanque no estaba equipado con parallamas en las ventilaciones, a pesar de que un estudio de evaluación de riesgo de rayos, 18 meses antes del accidente, había recomendado la presencia de parallamas en las ventilaciones y válvulas de respiración en los tanques. • Los rayos son un peligro común en los tanques de almacenamiento sobre el suelo y deben abordarse en los análisis de riesgos (estos constituyen escenarios Natech). • Un simulacro del Plan de Respuesta Interna realizado dos meses antes y basado en un escenario comparable que involucraba a uno de estos tanques sirvió para facilitar la intervención real.
<p>Louisville, Kentucky, Estados Unidos 2003 <i>(IChemE, 2022)</i></p>	<p>Se presentó una falla catastrófica en un tanque de mezcla de alimentación del secador por aspersión, en una planta que fabricaba colorante de caramelo apto para uso alimentario. Este se generó debido a una sobrepresión y ruptura del tanque por calentamiento prolongado del contenido, el cual tenía la línea de ventilación obstruida por mantenimiento inadecuado. Esto ocasionó que la cabeza superior del tanque se separara en la costura de soldadura, generando una explosión que llevó a que el tanque fuera propulsado aproximadamente 91 m, antes de aterrizar en una vía férrea utilizada por terceros para el transporte de mercancías.</p> <p>Se generaron efectos dominó, puesto que la estructura del secador por aspersión fue derribada, empujando un tanque de almacenamiento de amoníaco acuoso fuera de sus cimientos, lo que produjo la liberación de 11,8 ton de la solución de NH₃ al 29,4 % en volumen.</p> <p>Las consecuencias incluyen una fatalidad, la evacuación de 26 residentes vecinos y una orden de refugiarse en el lugar de residencia para, al menos, 1500 personas debido a la nube de vapor tóxico de amoníaco.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Enfatizó en que los sistemas de presión deben someterse a un análisis de peligros del proceso (PHA) para garantizar sistemas de control apropiados que permitan evitar sobrepresiones que puedan llevar a eventos catastróficos. • Debido a que este tanque había sido utilizado en otras plantas y trasladado e instalado en el caso de análisis, se resalta que los equipos reacondicionados deben someterse a inspecciones completas de aptitud para el servicio y a una revisión de seguridad previo a su puesta en marcha.



Ubicación del evento	Descripción	Lecciones aprendidas
<p>Port Wentworth, Georgia, Estados Unidos 2008 <i>(CSB, 2009a, 2009b)</i></p>	<p>En la planta Imperial Sugar, de refinación y envasado de azúcar, se produjo una gran explosión e incendio, debido a acumulaciones masivas de azúcar combustible y polvo de azúcar en los pisos y superficies elevadas en los edificios de empaque.</p> <p>Las investigaciones del accidente indican que la acumulación del azúcar y el polvo de azúcar encontraron un cojinete sobrecalentado en la cinta transportadora de acero, lo que se convirtió en fuente de ignición. Violentas bolas de fuego brotaron de la instalación durante más de 15 minutos, debido a que el azúcar derramado y el polvo de azúcar acumulado continuaban alimentando los incendios. Además, las nubes de polvo estimularon una reacción en cadena de explosiones secundarias. Como consecuencia, las llamas y escombros estallaron sobre los edificios y silos de empaque.</p> <p>El sistema de rociadores contra incendios falló porque las explosiones rompieron las tuberías de agua. Además, la notificación inmediata a los trabajadores para evacuar en caso de emergencia fue inadecuada, no se habían realizado simulacros de evacuación y había poca visibilidad por pérdida de electricidad y por el polvo en la instalación. Como resultado, se generaron 14 fatalidades y 38 heridos, de los cuales 14 tuvieron quemaduras graves y potencialmente mortales. Los principales incendios en los edificios se extinguieron al día siguiente; sin embargo, los incendios del silo continuaron ardiendo sin llama durante siete días antes de que finalmente se extinguieran.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Generó un aumento en la concientización sobre los peligros del polvo combustible. • Resaltó la necesidad de tener programas de capacitación sobre Sistemas de gestión de seguridad y salud que incluyan las características del polvo combustible, su energía de ignición y la concentración mínima explosiva. • Fomentó la implementación de mejores prácticas para minimizar la acumulación de polvo, especialmente en superficies elevadas, y prácticas seguras de limpieza. • Recalcó la importancia de la intención anunciada de OSHA de publicar una normativa integral para reducir o eliminar los riesgos de incendio y explosión de polvos y polvos combustibles.
<p>Norte de Ucrania 1986 <i>(Atherton & Gil, 2008)</i></p>	<p>Mientras en la central eléctrica de Chernóbil se realizaba una parada por mantenimiento rutinario del reactor No. 4, se decidió aprovechar para hacer pruebas en este. Una serie de malas prácticas llevaron a que efectos térmicos extremos provocaran una falla del revestimiento alrededor de las barras de combustible y la ruptura de los tubos de refrigerante. El vapor a alta presión que entraba en la vasija del reactor levantó la tapa de acero. La reacción del agua y el vapor con el revestimiento de circonio alrededor de las barras de combustible y el moderador de grafito generó una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono, que se encendió y provocó una explosión que levantó el techo de hormigón del edificio del reactor.</p> <p>El incendio tardó 10 días en extinguirse; mientras tanto, una columna de radionucleidos llegó a la atmósfera superior desde donde se dispersó por la mayor parte de Europa occidental por el patrón climático predominante. Esto generó más de 30 fatalidades y la evacuación de 135.000 personas por los altos niveles de radiación en el ambiente.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Generó el nacimiento del concepto de la cultura de Seguridad de Procesos. • Resaltó la importancia de la gestión del cambio en los sistemas de gestión de seguridad de procesos. • Destacó la relevancia de contar con capacitación sobre la implementación de buenas prácticas, protocolos y desarrollo de procedimientos operativos formales, de todo el personal involucrado en la operación.



Ubicación del evento	Descripción	Lecciones aprendidas
<p>Mildford Haven, Reino Unido 1994 <i>(Atherton & Gil, 2008; Krausmann et al., 2017)</i></p>	<p>Una explosión de nube de vapor semiconfinada ocurrió en una refinería en el Reino Unido, por la caída de un rayo durante una tormenta eléctrica.</p> <p>Los rayos causaron una serie de pérdidas de energía en toda la refinería, provocando el disparo repetido de bombas y enfriadores; en consecuencia, el levantamiento de las válvulas de seguridad de presión de la columna de crudo generó alteraciones en un sistema de antorcha con complicaciones de integridad mecánica que continuó en servicio pese a los problemas conocidos. Como consecuencia, los vapores inflamables fueron liberados y encendidos por la caída de un rayo.</p> <p>Los hechos liberaron cerca de 20 toneladas de hidrocarburos inflamables a la atmósfera desde la tubería de salida del tambor extractor de antorcha en la unidad de craqueo catalítico fluidizado (FCCU).</p> <p>La nube de vapores inflamables se encendió a unos 110 metros de la salida del tambor de bengalas y se estimó que la fuerza de la explosión era equivalente a 4 toneladas. Esto fue seguido por incendios que tardaron dos días y medio en extinguirse.</p> <p>Dentro de las consecuencias por la onda explosiva se incluyen: 26 personas heridas, daños en las ventanas y techos de edificios a una ciudad a 3 km de distancia y 10 % de pérdida de la capacidad de refinación del Reino Unido por 4,5 meses. La reconstrucción de la refinería tuvo un costo estimado de 76 millones de dólares.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Resaltó la importancia de garantizar que se empleen los estándares de ingeniería adecuados en el sitio. • Destacó la necesidad de tener protocolos escritos derivados de análisis de riesgos previos, donde las acciones correctivas sean completadas. La ubicación y seguimiento de las acciones de cualquier revisión o estudio es una parte integral de ese proceso. • Llevó a los responsables de HSE a formular recomendaciones para la prevención y mitigación de accidentes, asociadas a espacios de capacitación para que el personal maneje mejor los eventos no planificados y se desempeñe de forma adecuada en condiciones de alto estrés; reconfiguración de alarmas para facilitar la distinción entre críticas para la seguridad y operativas.
<p>Mar del Norte, Reino Unido 1988 <i>(IChemE, 2022)</i></p>	<p>La plataforma Piper Alpha estaba en proceso de mantenimiento, por lo cual se había desactivado una bomba de condensado de reserva para reinyectar gas condensado en una línea de exportación de petróleo; la válvula de seguridad (PSV) fue retirada, instalando temporalmente conjuntos de bridas ciegas en las conexiones de tubería abiertas. Posteriormente, la bomba de condensado en funcionamiento falló. Los niveles de líquido en el sistema de separación de gas/líquido estaban aumentando y eventualmente provocarían un cierre total de la plataforma si no se revertía.</p> <p>Los operadores del turno de la noche no tenían información completa sobre el estado actual del mantenimiento y tomaron la decisión de volver a energizar y encender la bomba de reserva. Esto generó una liberación de gas condensado, la cual, posteriormente, encontró una fuente de ignición y explotó. Además, se generó la rotura de una tubería de aceite que desencadenó un incendio. Se generó un efecto dominó, por la rotura posterior de tres líneas de gas de alta presión, creando un evento de gran magnitud. El humo y las llamas en el exterior del módulo de alojamiento imposibilitaron la evacuación en helicóptero o bote salvavidas, por lo que se generaron 167 fatalidades.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Destacó la legislación de seguridad en alta mar debe establecer objetivos para fomentar la innovación y la mejora continua en la integridad de la instalación. • Visibilizó la importancia de que las plataformas cuenten con documentos que contengan la investigación de casos de seguridad que incluyan la gestión de riesgos mayores, su evacuación y rescate seguro del personal, de manera que sean compartidos con las autoridades. • Resaltó la necesidad de que las plataformas marinas (<i>offshore</i>), cuenten con sistemas de alerta para proteger a sus trabajadores, incluyendo sistemas de detección de gas e incendios, sistemas de protección contra incendios y explosiones y que contengan refugios seguros temporales.



Ubicación del evento	Descripción	Lecciones aprendidas
<p>Kocaeli, Turquía 1999 <i>(Girgin, 2011; Krausmann et al., 2017; Steinberg & Cruz, 2004)</i></p>	<p>El terremoto de Kocaeli, de magnitud 7.4 Mw, generó graves afectaciones en la refinería de Tüpras en Korfez. Esta refinería representaba, aproximadamente, 1/3 del petróleo de Turquía y era un proveedor importante para gran parte de la industria de la zona. Como consecuencia del sismo, se generaron múltiples emisiones de materiales peligrosos. Particularmente, tres incendios: 1) en un almacén de productos químicos, 2) en una planta procesamiento de crudo y 3) en una granja de tanques de nafta. En este último, cuatro tanques de almacenamiento de nafta de techo flotante se incendiaron simultáneamente después del terremoto. Los incendios fueron causados por chispas resultantes del contacto de metal con los sellos metálicos y las paredes del tanque, debido al rebote de los techos flotantes contra el interior.</p> <p>El terremoto también causó daños en una conexión de brida en uno de los tanques, lo que provocó una fuga de nafta en el sistema de drenaje interno de zanja abierta de la refinería. El fuego en el techo se extendió a la conexión de la brida y a través del sistema de drenaje a dos tanques de nafta a unos 200 m de distancia.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Reevaluación de sistemas de techo flotante para limitar el contacto entre metales durante un sismo. • Reforzamiento de tanques de almacenamiento para evitar deformaciones por fuerzas laterales inducidas por la salpicadura de líquido. • Visibilizó, aún más, la necesidad de contar con diseño estructural resistente a terremotos, tanto de sistemas como de equipos de proceso (debidamente anclados o reforzados) para mitigar grandes pérdidas industriales. • Evidenció que el ordenamiento territorial y la planificación del uso del suelo son elementos primordiales para restringir el desarrollo industrial en zonas de fallas sísmicas activas y así limitar las consecuencias de accidentes industriales.
<p>Chiba, Japón 2011 <i>(Krausmann & Cruz, 2013)</i></p>	<p>El Gran Terremoto y Tsunami del Este de Japón de 2011 afectó a los parques industriales de las prefecturas de Iwate, Miyagi, Ibaraki y Chiba y provocó emisiones de materiales peligrosos, incendios y explosiones. Uno de los eventos Natech ocurridos se dio en la prefectura de Chiba. Específicamente, un tanque de almacenamiento de GLP estaba en mantenimiento, lleno de agua, cuando ocurrió el sismo, el peso generó la fractura de los soportes del tanque, su posterior flexión y el colapso del tanque de GLP. Esto llevó a la rotura de las tuberías conectadas al tanque y la liberación de GLP. Por la incapacidad de los operarios de cerrar la válvula, se generó una dispersión e ignición de nubes de vapor, explosiones BLEVE y efectos dominó.</p> <p>Los incendios y explosiones de la refinería de petróleo Cosmo dañaron por completo 17 tanques de gas licuado de petróleo, generaron cinco bolas de fuego y causaron daños a las propiedades cercanas; además, provocó seis heridos y la evacuación de más de 1000 residentes que vivían cerca de la refinería.</p> <p>Adicionalmente, parte de la instalación cerró durante más de un año, mientras se llevaron a cabo los trabajos de reconstrucción.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Como una medida de mitigación, se han reforzado los soportes de los tanques esféricos de GLP para mejorar su resistencia ante posibles sismos. • La reconstrucción de la granja de tanques consideró mayores distancias entre los tanques de almacenamiento, reduciendo así el número de tanques. • Evidenció que los canales de comunicación y acceso deben ser mejorados para soportar una respuesta efectiva y más rápida durante un evento accidental, considerando que los teléfonos pueden no funcionar y las vías de acceso pueden estar bloqueadas o destruidas.

Fuente: elaboración propia.

Como se observa a través de los ejemplos mostrados en la Tabla 5, la industria en general, sin importar los procesos productivos que lleve a cabo, ha presenciado la materialización de accidentes tecnológicos y Natech, con consecuencias negativas tanto para las empresas como para sus trabajadores, la comunidad y el ambiente. Estos eventos han llevado a liberaciones de materiales peligrosos y otros, que no se percibían tan peligrosos, pero que han

causado consecuencias severas, han promovido cambios en la regulación, cambios de paradigma y de percepción del riesgo. Estos accidentes constituyen la base para enriquecer las lecciones aprendidas, de manera que no se vuelvan a presentar situaciones iguales y similares, reduciendo así el riesgo de desastre o eventos catastróficos y permitiendo robustecer los sistemas de gestión de la seguridad de los procesos.





Capítulo 2

Gestión de seguridad de procesos

Como se presentó en el capítulo anterior, la ocurrencia de diversos eventos accidentales en la industria de procesos ha desencadenado en el surgimiento de iniciativas desde un aspecto regulatorio o normativo, buscando impulsar sistemas de gestión y soporte para evitar que se repitan este tipo de accidentes. Un ejemplo de ello es la norma de Gestión de Seguridad de Procesos de Productos Químicos Altamente Peligrosos (29 CFR 1910.119), emitida por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA por sus siglas en inglés), la cual busca garantizar lugares de trabajo seguros y saludables.

Es así como la gestión de seguridad de procesos (Process Safety Management - PSM por sus siglas en inglés), al orientarse hacia la reducción de los riesgos de accidentes, pretende estimular un mejor desempeño en los procesos industriales. Específicamente, PSM se conoce como una gestión integrada que aborda los riesgos de los procesos

productivos, asociados a la posible liberación de materiales peligrosos, mediante medidas de seguridad requeridas para evitar dichas liberaciones accidentales. Más explícitamente, desde una perspectiva basada en riesgos, se define como “un sistema de gestión que se centra en la prevención, la preparación, la mitigación, la respuesta y la restauración de emisiones catastróficas de sustancias químicas o energía de un proceso asociado con una instalación” (CCPS, 2023). Bajo esta visión, el Centro de Seguridad de Procesos Químicos (CCPS, por sus siglas en inglés) creó un marco para ayudar a las organizaciones y empresas a diseñar e implementar efectivamente sistemas para la gestión de la seguridad de procesos, denominado Seguridad de Proceso Basada en Riesgos (Risk Based Process Safety - RBPS por sus siglas en inglés) (CCPS, 2007).

Esta aproximación se fundamenta en cuatro pilares, tal como se presenta en la Figura 10.



Figura 10. Pilares del Sistema de Gestión de Seguridad de Procesos Basado en Riesgos



Es importante resaltar que el sistema de gestión RBPS se enfoca en los peligros mayores y en los riesgos más altos, de forma tal que se distribuyan los recursos en aquellos escenarios de mayor relevancia para las operaciones.

2.1. Correlación de la gestión de seguridad de procesos con el programa de prevención de accidente mayor en Colombia y con el SG-SST

El Programa de Prevención de Accidentes Mayores en Colombia se emitió en octubre de 2021, como una adición al Capítulo 12, Título 4, de la Parte 2, Libro 2 del Decreto 1072 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo, denominado como el Decreto 1347 de 2021, que tiene como objeto “adoptar el Programa de Prevención de Accidentes Mayores - PPAM, para contribuir a incrementar los niveles de seguridad de las instalaciones clasificadas de que trata este capítulo, con el fin de proteger a los trabajadores, la

población, el ambiente y la infraestructura, mediante la gestión del riesgo”.

El Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST), establecido mediante la Ley 1562 de 2012, por la cual se modifica el sistema de riesgos laborales y se dictan otras disposiciones en materia de salud ocupacional, busca “(...) mejorar las condiciones y el medio ambiente de trabajo, así como la salud en el trabajo, que conlleva la promoción y el mantenimiento del bienestar físico, mental y social de los trabajadores en todas las ocupaciones”.

Y como se mencionó en la sección introductoria de este capítulo, la finalidad de la Gestión de Seguridad de Procesos es la de proteger a los trabajadores, proporcionando lugares de trabajo seguros y saludables, así como la de reducir los riesgos de accidentes asociados a la liberación de sustancias químicas peligrosas, buscando estimular un mejor desempeño en los procesos industriales.

Figura 11. Correlación entre SG-SST-PSM-PPAM



Bajo este panorama, como se muestra en la Figura 11, se entiende que las tres aproximaciones buscan proteger a los trabajadores como primera medida, el PSM busca además reducir el riesgo en las instalaciones industriales y desde un punto de vista más holístico, el Programa de Prevención de Accidentes Mayores - PPAM busca también la protección de la población vecina, el ambiente y la infraestructura, considerando así las interdependencias e interacciones de las instalaciones industriales con el entorno.

2.2. Valoración de riesgos

Un sistema de gestión de seguridad de procesos basado en riesgo, como se presentó en la Figura 10, debe entender los peligros y los riesgos de la organización y de la operación, para gestionarlos eficazmente. Por lo tanto, se nutre de un conocimiento del proceso, asociado a documentación e información actualizada y ordenada que soporta el proceso de identificación de peligros y análisis de riesgos. Este proceso constituye el elemento principal del segundo pilar

del sistema de gestión RBPS (ver Figura 10) y abarca todas las actividades involucradas en la operación, en su ciclo de vida, abordando la incertidumbre implícita del riesgo y ayudando a comprenderlo, de manera que pueda gestionarse y mantenerse dentro de los niveles de tolerancia de la organización (CCPS, 2007).

Para tal fin, la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés), publica la norma ISO 31000, la cual brinda los principios, directrices y procesos genéricos para la gestión del riesgo (ISO, 2009). Esta norma está sujeta a ser actualizada permanentemente para responder a las necesidades y exigencias actuales, de manera que su versión más reciente data del año 2018. Es así como la norma ISO 31000:2018 establece como proceso para la gestión del riesgo, el presentado en la Figura 12. Como se observa, este proceso se compone de varios elementos: **1) Establecimiento del contexto, 2) Valoración del riesgo, 3) Tratamiento del riesgo, 4) Seguimiento y revisiones y 5) Comunicación y consulta constantes.**



Particularmente, la valoración del riesgo se define como el proceso global de identificación, análisis y evaluación del riesgo (ISO, 2009). Este también se puede definir como un proceso sistemático para valorar el impacto, ocurrencia y consecuencias de las actividades humanas que tienen características peligrosas (Marhaviolas et al., 2011). Más explícitamente, el Decreto 2157 lo define como el proceso que incluye la identificación del riesgo, el análisis del riesgo

y la evaluación del riesgo, concordante con el análisis y evaluación del riesgo en la Ley 1523 de 2012, para estimar daños y pérdidas potenciales, (...) con el propósito de definir tipos de intervención mediante la reducción del riesgo o del manejo del desastre (Decreto 2157, 2017). A continuación, se describen cada uno de los elementos que componen el proceso de valoración del riesgo, a saber: la identificación, el análisis y la evaluación.



2.2.1. ¿Qué es la identificación del riesgo?

Se define como el proceso para encontrar, reconocer y describir los riesgos de una organización (ISO 31000, 2018). Este proceso permite la identificación de fuentes de peligro, amenazas y causas raíz de potenciales eventos accidentales, bajo condiciones normales y anormales de operación

en todas las etapas del ciclo de vida del proceso (Villalba Hernández et al., 2015).

Para tal fin, las organizaciones deben contar con información veraz, confiable y actualizada que permita contemplar las incertidumbres inherentes a los sistemas bajo estudio, para lo cual la ISO 31000:2018 sugiere contemplar, entre otros, los siguientes aspectos:



Se entiende, entonces, que la identificación del riesgo es un proceso de vital importancia para poder hacer una gestión de los riesgos presentes en la instalación industrial y los posibles escenarios accidentales que se pueden materializar, asociados al proceso productivo y sus características, equipos, sustancias químicas utilizadas, controles y sistemas, que puedan llevar a consecuencias no deseadas. Por lo tanto, depende en gran medida de un equipo interdisciplinario con experiencia, que cuente con la información necesaria para identificar las fuentes y/o causas raíz que puedan materializar las consecuencias no deseadas en los blancos de interés, es decir, las personas, el medio ambiente y la infraestructura, que a su vez se puede traducir en pérdida de vidas, heridos, impacto ambiental, mala reputación para la organización e impactos económicos.

Como resultado de este proceso de identificación de riesgos, se pueden obtener listados exhaustivos de los riesgos encontrados, posibles eventos, causas y consecuencias asociadas a los escenarios contemplados (IEC 31010, 2019).

2.2.2. ¿En qué consiste el análisis y la evaluación de riesgos?

Otro de los elementos que compone la valoración de riesgos es el análisis de riesgos. Bajo la perspectiva de la Gestión del Riesgo de Desastres en Colombia, este último se define como el proceso de comprender la naturaleza del riesgo para determinar el nivel del mismo; es la base para la evaluación de riesgos y las decisiones sobre las medidas de reducción y preparación para la respuesta (UNGRD, 2017). El análisis de riesgo puede llevarse a cabo desde diferentes aproximaciones, sean estas cualitativas,

semi-cuantitativas o cuantitativas. Cuando se refiere a un análisis cuantitativo, se puede definir como el desarrollo de un estimado del riesgo basado en una evaluación ingenieril y técnicas matemáticas que combinan la estimación de las consecuencias de un evento accidental con la probabilidad de ocurrencia asociada (AICHE & CCPS, 2000; Crowl & Louvar, 2011; Ecopetrol & Uniandes, 2015; Marhavalas et al., 2011; Tixier et al., 2002). Es importante resaltar que, desde esta perspectiva, el riesgo se define como la combinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento crítico y la severidad de sus consecuencias.

El análisis de riesgos se compone de cuatro fases, tal como se muestra en la Figura 12. En la primera de ellas se define el escenario que se desea estudiar, la secuencia de eventos y el contexto de este, utilizando los resultados de la identificación del riesgo. En la segunda fase se identifican las fuentes de peligro o las amenazas para la operación o proceso analizado, examinando también los factores que pueden afectar las consecuencias y su probabilidad de materialización. La tercera fase consiste en seleccionar los escenarios posibles, teniendo en cuenta la viabilidad de su materialización, es decir, qué tan factible es su ocurrencia. Finalmente, la cuarta fase se enfoca en estimar la posibilidad de ocurrencia del evento seleccionado, mediante diversas técnicas y/o metodologías como diagramas lógicos (por ejemplo, árboles de falla y/o árboles de eventos), comúnmente utilizados para determinar las probabilidades de ocurrencia del escenario bajo análisis. En esta última fase, también se analizan las consecuencias del evento seleccionado, estimando así su severidad e impacto en las personas, el medio ambiente y la infraestructura.



Figura 14. Fases del análisis de riesgo



Es así como el análisis de riesgos puede ser abordado desde diferentes aproximaciones, según el tipo y calidad de información del escenario que se esté analizando, los intereses del analista de riesgo, el conocimiento del sistema, la fase

en que se encuentre el proyecto y/o activo a ser analizado y el tipo de decisiones que se derivarán de sus resultados. Estas deben ser seleccionadas bajo los principios de sistematicidad, repetibilidad, exhaustividad y auditabilidad.

Figura 15. Aproximaciones del análisis de riesgo



Finalmente, es importante recordar que para la aplicación de aproximaciones cuantitativas o semicuantitativas se deben implementar primero métodos cualitativos. De estos últimos se deriva una lista priorizada de escenarios probables que requieren mayor nivel de análisis, bien sea por su incertidumbre o por la severidad de sus consecuencias. Del 100 % de los escenarios identificados en instancias cualitativas, un 10 % es estudiado mediante aproximaciones semicuantitativas y un 1 % pasa a instancias de análisis cuantitativo (Muñoz et al., 2014).

Se entiende, entonces, que un análisis cuantitativo del riesgo solo se implementa cuando los análisis cualitativos o semicuantitativos no son suficientes y se requiere información más detallada para un mayor entendimiento del riesgo y su gestión eficaz. Es así como la cuantificación del riesgo tiene como principal objetivo proporcionar la información necesaria para soportar la toma de decisiones, basadas en el principio de costo-beneficio, según los niveles de tolerabilidad y aceptabilidad del riesgo en la organización.

Luego de estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento accidental y sus consecuencias, mediante cualquiera de las aproximaciones existentes, se tiene la información necesaria para llevar a cabo la evaluación del riesgo. Este se define como el proceso de comparación de los resultados de análisis de riesgos con criterios de aceptabilidad y/o tolerabilidad del riesgo establecidos (a nivel organizacional, sectorial, nacional o internacional) para determinar si su magnitud se encuentra dentro de los límites permitidos. Este resultado soporta la toma de decisiones en cuanto a las medidas de reducción del riesgo a implementar (ISO, 2009), permitiendo priorizar aquellos escenarios que requieren un tratamiento inmediato debido a que los niveles de riesgo sobrepasan los límites de aceptabilidad.

Particularmente, para Colombia se cuenta con la Resolución 0559 del 24 de junio de 2022 "Por la cual se adoptan valores nacionales de riesgo máximo individual accidental para instalaciones fijas y, en especial, las instalaciones fijas clasificadas de acuerdo con el Decreto 1347 de 2021 y se dictan otras disposiciones". Este criterio nacional se establece con el objetivo de "Adoptar valores nacionales de riesgo máximo individual accidental por fuera del sitio (*off-site*), para instalaciones fijas clasificadas" (Resolución 0559, 2022). Es así como, de acuerdo con dicha Resolución, se establecen los siguientes valores de riesgo máximo individual accidental para Colombia:

- **Instalaciones fijas clasificadas nuevas:** uno por diez a la menos cinco (1×10^{-5}) fatalidades/año.
- **Instalaciones fijas clasificadas existentes:** uno por diez a la menos cuatro (1×10^{-4}) fatalidades/año.

Estos criterios permiten soportar la toma de decisiones en las organizaciones, en cuanto a la gestión del riesgo en instalaciones fijas, puesto que permite una estimación de los niveles de riesgo según los criterios nacionales. Una vez realizada la comparación de los resultados del análisis de riesgo con los criterios de aceptabilidad y/o tolerabilidad, el proceso de evaluación permite identificar aquellos es-



cenarios con un mayor nivel de riesgo, los cuales requieren intervención o tratamiento. También, orienta la toma de decisiones en cuanto a la necesidad de llevar a cabo análisis más detallados o simplemente puede resaltar la pertinencia de los controles existentes dado un bajo nivel de riesgo del escenario analizado. Por lo tanto, el resultado de este proceso es un ranking de escenarios, priorizados según sus niveles de riesgo, de mayor a menor.

2.2.3. ¿Cómo se aborda el tratamiento del riesgo en la seguridad de procesos?

El tratamiento del riesgo es un proceso que busca reducir los niveles de riesgo de los escenarios priorizados. Más explícitamente, involucra la implementación de medidas para modificar los riesgos que sobrepasan los niveles aceptables. Para entender mejor esta perspectiva, es necesario referirse al concepto ALARP (As Low as Reasonably Practicable), es decir, "tan bajo como sea razonablemente posible". Este concepto se refiere a un proceso para reducir los riesgos y potenciales consecuencias derivadas de la ocurrencia de escenarios accidentales a un nivel que sea técnicamente factible sin un costo excesivo (HSE, 2023). El principio estipula que los responsables del riesgo deben reducir los riesgos de muerte y lesiones para los trabajadores y miembros del público a niveles que sean "tan bajos como sea razonablemente posible" (Jones-Lee & Aven, 2011).

La aceptabilidad del riesgo se refiere a la disposición de la sociedad para afrontar los riesgos de una actividad y aceptar que está preparada para asumílos en el momento que se materialicen (Resolución 0559, 2022); mientras que la tolerabilidad del riesgo hace referencia a la voluntad de la sociedad de vivir con un riesgo, con el fin de asegurar ciertos beneficios, en la confianza de que vale la pena correr ese riesgo siempre que esté adecuadamente monitoreado (Cameron & Raman, 2005).



La Figura 16 muestra que la zona ALARP se encuentra dentro de los límites del nivel de riesgo mínimo y máximo; es decir, dentro de las zonas de riesgo aceptable e inaceptable. De esta forma, la zona ALARP lleva a los tomadores de decisiones a considerar diversos factores para determinar las medidas requeridas para tratar el riesgo, de acuerdo con los criterios de aceptabilidad y tolerabilidad de la organización.

Es evidente que cualquier escenario analizado, cuyo nivel de riesgo sea inaceptable, debe ser inmediatamente tratado para llevarlo a niveles más bajos, ya sea en la zona ALARP o en la zona de riesgo aceptable. Por su parte, escenarios cuyo nivel de riesgo sea aceptable no requieren intervención sino un monitoreo para verificar que los controles sigan siendo efectivos.

Figura 16. Explicación del concepto ALARP



Para complementar, cuando se quiere determinar si un riesgo es ALARP o no, se deben considerar los siguientes parámetros (Cameron & Raman, 2005):

1. Costo-beneficio: ¿quién gana el beneficio y quién paga el costo?
2. ¿Es técnicamente posible reducir aún más el riesgo?
3. Los problemas éticos: el riesgo puede ser bajo, pero ¿es correcto?
4. Principio de precaución: ¿tenemos suficiente información para tomar la decisión?
5. ¿Qué sucede si no hacemos nada para reducir el riesgo?
6. ¿Qué pasa si no procedemos?

Se evidencia, entonces, que la aplicación del concepto ALARP no se limita a un análisis costo-beneficio de las medidas de tratamiento del riesgo, sino que debe también contemplar otros aspectos, como: quiénes son las partes interesadas relevantes en el proceso de toma de decisiones, quién o quiénes son los generadores del riesgo y cuáles son los criterios de tolerabilidad (Cameron & Raman, 2005).



Figura 17. Ciclo del tratamiento del riesgo



Finalmente, es importante mencionar que el tratamiento del riesgo, tal como lo estipula la norma ISO 31000, es un proceso cíclico que incorpora los elementos de la Figura 17, donde el objetivo es tener siempre niveles de riesgo dentro de los criterios de aceptabilidad / tolerabilidad, bajo el principio de costo-beneficio.

2.3. Algunas técnicas/métodos para la identificación y análisis de riesgos

Existe una gran diversidad de métodos y herramientas para la identificación y el análisis del riesgo. Su aplicabilidad depende de varios factores, como la cantidad, calidad y el tipo de información disponible, el conocimiento del sistema a ser evaluado y su complejidad, la experticia de los analistas y las aproximaciones que se quieran abordar.

A continuación, se presentan algunas de las técnicas más utilizadas tanto para la identificación como para el análisis de riesgos, de acuerdo con la norma ISO 31010. Esto incluye una breve descripción de cada una de ellas y su aplicabilidad. Su implementación pretende contribuir al entendimiento del riesgo y la consideración de su incertidumbre intrínseca en los procesos que conforman la valoración del riesgo. Cabe mencionar que, en ocasiones, puede requerirse la implementación de una o más técnicas, o una combinación de ellas.

Es así como las técnicas de identificación del riesgo requieren del conocimiento y la experiencia de diversos

actores, los cuales deben considerar (IEC 31010, 2019):

- Qué incertidumbre existe y cuáles podrían ser sus efectos.
- Qué circunstancias o problemas (tangibles o intangibles) tienen el potencial de consecuencias futuras.
- Qué fuentes de riesgo están presentes o podrían desarrollarse.
- Qué controles existen y si son efectivos.
- Qué, cómo, cuándo, dónde y por qué pueden ocurrir eventos y consecuencias.
- Lo que sucedió en el pasado y cómo esto podría relacionarse razonablemente con el futuro.
- Qué aspectos humanos y factores organizacionales podrían aplicarse.

Estas técnicas se pueden agrupar según su aproximación en 1) aquellas que permiten la identificación del riesgo y 2) técnicas para determinar las fuentes, causas e impulsores del riesgo; en algunos casos, estas últimas también pueden implementarse para el análisis de riesgo, toda vez que son complementarias. A continuación, se presentan estos métodos; algunos se describen con más detalle en la Tabla 6.



Figura 18. Técnicas de identificación del riesgo



Tabla 6. Descripción de algunas técnicas para la identificación del riesgo

Nombre	Descripción	Aplicación
Listas de chequeo	Técnica simple para identificar riesgos habituales en un proceso, que utiliza una lista de verificación, basada en el conocimiento histórico, entrevistas, revisiones de documentación e inspecciones de campo.	Puede ser aplicada a cualquier actividad o sistema, incluyendo problemas de equipos y factores humanos, aunque suele utilizarse para análisis detallados o de alto nivel, incluidos análisis de causa raíz y para la inspección de sistemas o equipos críticos.
Análisis de modo y efecto de falla (FMEA)	Técnica que identifica las formas en que los componentes, sistemas o procesos pueden fallar en cumplir con su intención de diseño y sus consecuencias en un sistema. Existen varios tipos dependiendo del tipo de proceso que se lleva a cabo.	Tiene diversos usos, entre ellos: <ul style="list-style-type: none"> • Identificación de modos y efectos del error humano. • Base para la planificación de mantenimiento de los sistemas físicos. • Mejora del diseño de procedimientos y procesos. • Brinda información para análisis de árbol de fallas.
Análisis de riesgos y operabilidad (HAZOP)	Proceso general de identificación de peligros, para definir posibles desviaciones del desempeño previsto, utilizando un sistema basado en palabras guía ("No", "Alto", "Bajo", "En vez de", "Inverso") en conjunto con parámetros físicos como presión, temperatura, nivel, entre otros.	Se aplica para analizar sistemas de procesos químicos, sistemas y operaciones complejas, sistemas mecánicos y electrónicos, entre otros.
Listas de chequeo	Técnica simple para identificar riesgos habituales en un proceso que utiliza una lista de verificación, basada en el conocimiento histórico, entrevistas, revisiones de documentación e inspecciones de campo.	Puede ser aplicada a cualquier actividad o sistema, incluyendo problemas de equipos y factores humanos, aunque suele utilizarse para análisis detallados o de alto nivel, incluidos análisis de causa raíz y para la inspección de sistemas o equipos críticos.
Técnica estructurada ¿Qué pasa si...?	Es una técnica de lluvia de ideas estructurada, donde un grupo de personas con experiencia en el proceso estudiado realizan preguntas acerca de eventos no deseados a través de palabras guía (momento, cantidad, etc.) combinadas con frases como "¿qué pasa si?" o "¿cómo podría?".	Aplica a sistemas, elementos de planta, procedimientos y organizaciones en general. Se utiliza para examinar las consecuencias de los cambios y el riesgo que se modifica o crea.

Fuente: adaptado de IEC 31010, 2019; Marhavilas et al., 2011.



Independiente de las técnicas que se utilicen para la identificación de riesgos, debe tenerse siempre un abordaje metódico e iterativo, de manera que se logre la exhaustividad y la eficiencia (IEC 31010, 2019).

En cuanto a las técnicas para el análisis del riesgo, existen diversas aproximaciones, dentro de las que se encuentran: 1) técnicas para determinar las fuentes, las causas y los impulsores del riesgo; 2) técnicas de análisis de controles, 3) técnicas para comprender las consecuencias y la probabi-

lidad, 4) técnicas para analizar dependencias e interacciones y 5) técnicas que proporcionan una medida del riesgo (IEC 31010, 2019). Por lo anterior, existe una gran variedad de posibilidades, dependiendo del objetivo del análisis. En la siguiente ilustración se presentan las diferentes técnicas disponibles, según las aproximaciones 1 a 5 mencionadas anteriormente. La Tabla 7 presenta una descripción más detallada de algunas de ellas. Sin embargo, si se requiere una explicación exhaustiva, se sugiere consultar la norma ISO 31010:2019.

Figura 19. Técnicas para el análisis de riesgo



1. Técnicas para determinar las fuentes, las causas y los impulsores del riesgo

- Enfoque cindínico
- Método Ishikawa
- Análisis de causa raíz



2. Técnicas de análisis de controles

- Análisis de corbatín
- Análisis de riesgo y puntos críticos de control (HAZOP)
- Análisis de protección de capas (LOPA)



3. Técnicas para comprender las consecuencias y la probabilidad

- Análisis bayesiano
- Redes bayesianas
- Análisis de impacto del negocio
- Análisis de árbol de eventos
- Análisis de árbol de fallas
- Análisis causa-consecuencia
- Análisis Markov
- Simulación Montecarlo



4. Técnicas para analizar dependencias e interacciones

- Mapeo causal
- Análisis de impacto cruzado



5. Técnicas que proporcionan una medida del riesgo

- Evaluación de riesgos toxicológicos
- Análisis de impacto de la protección de datos
- Valor en riesgo (VaR)
- Valor en riesgo condicional (CVaR)



Fuente: adaptado de IEC 31010.



Tabla 7. Descripción de algunas técnicas para el análisis del riesgo

Nombre	Descripción	Aplicación
Análisis de causa raíz	Se centra en analizar las pérdidas de activos debido a varios tipos de fallas, identificando la causa raíz. Se aplica con mayor frecuencia a la evaluación de grandes pérdidas, pero también se puede usar para analizar pérdidas de manera más global que permitan determinar las mejoras a implementar.	Se aplica en diversos contextos, incluyendo: <ul style="list-style-type: none"> • Investigaciones de accidentes y SST. • Sistemas tecnológicos relacionados con la confiabilidad y el mantenimiento; sistemas complejos con aplicación en gestión del cambio, gestión de riesgos y análisis de sistemas.
Análisis de corbatín	Técnica gráfica que puede considerarse una combinación de un árbol de fallas con un árbol de eventos. Considera las barreras preventivas y mitigativas del sistema analizado.	Se utiliza para mostrar una gama de posibles causas y consecuencias del evento crítico analizado. Sobre todo, cuando el enfoque se centra en las barreras o controles existentes.
Análisis de riesgo y puntos críticos de control (HACCP)	Busca identificar elementos que pueden influir en la calidad de un producto. Su objetivo es garantizar que los riesgos se minimicen mediante controles en el proceso, por lo que identifica peligros y establece controles para mantener la calidad, confiabilidad y seguridad de un producto.	Se aplica para analizar sistemas de procesos químicos, sistemas y operaciones complejas, sistemas mecánicos y electrónicos, entre otros.
Análisis de protección de capas (LOPA)	Un análisis de capas de protección o LOPA es una forma simplificada de análisis de riesgo. En este análisis se cuantifican la frecuencia de ocurrencia, la severidad de las consecuencias y la probabilidad de falla de las capas de protección independientes por órdenes de magnitud.	Puede ayudar a determinar: ¿qué tan seguro es un sistema?, ¿es suficientemente seguro de acuerdo con los criterios definidos por la compañía?, ¿cuenta con la cantidad de capas de protección necesarias para cumplir con el criterio de riesgo definido?, ¿es la reducción de riesgo necesaria en cada capa de protección?
Análisis de árbol de eventos	Es una técnica que muestra gráficamente las posibles consecuencias, dada la ocurrencia de una falla (puede ser de un equipo o por un error humano).	Permite identificar varios eventos que pueden ocurrir en procesos complejos dada una falla. Se puede utilizar en cualquier etapa del ciclo de vida de un proceso. Se puede utilizar cualitativamente para idear escenarios potenciales y estimar la influencia de los controles en el resultado, o cuantitativamente para determinar la aceptabilidad de los controles.
Análisis de árbol de fallas	Técnica deductiva que permite identificar y representar pictóricamente los factores causales que pueden llevar a la ocurrencia de un evento no deseado.	Se aplica de forma cualitativa para identificar las posibles causas de falla del evento no deseado o cuantitativamente para calcular la probabilidad de este, siempre que se conozcan las probabilidades de los eventos causales. Aplica para etapas de diseño, fase de operación y para analizar una falla que ha ocurrido.
Mapeo causal	Técnica que utiliza un diagrama de red donde se capturan percepciones individuales en forma de cadenas de argumentos que crean caminos de razonamiento causal en el mapa, para representar eventos, causas y efectos y sus relaciones.	Permite identificar vínculos e interacciones entre riesgos, partiendo de la ocurrencia de un evento y revelando factores desencadenantes, consecuencias y dinámicas. Se pueden usar para capturar una apreciación integral y sistémica de los escenarios, brindando información relevante para el análisis cuantitativo de riesgo. Útiles para soportar el desarrollo de programas de tratamiento integrado del riesgo.
Valor en riesgo	Medida financiera de riesgo que utiliza una distribución de probabilidad asumida de pérdidas en una condición de mercado estable, para calcular el valor de una pérdida que podría ocurrir con una probabilidad específica dentro de un tiempo definido.	Se utiliza en el sector financiero para determinar un indicador de posible pérdida en una cartera de activos financieros durante un período de tiempo específico dentro de un nivel de confianza determinado.

Fuente: adaptado de IEC 31010, 2019; Marhaviis et al., 2011.



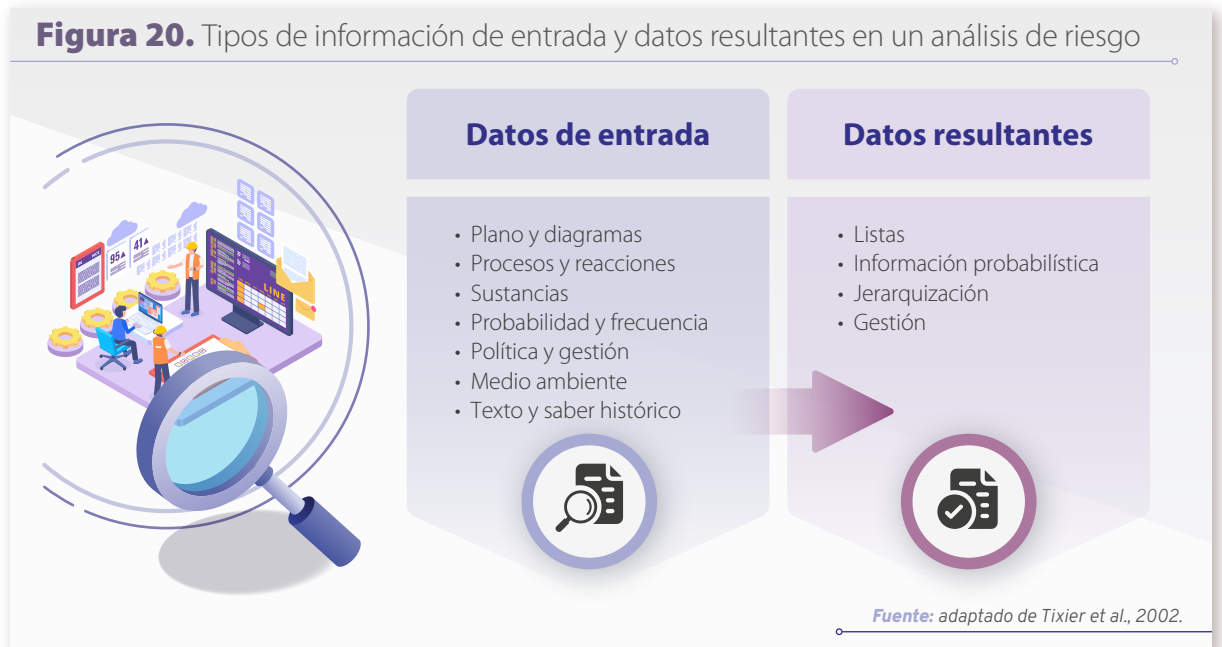
Finalmente, la diversidad de técnicas y aproximaciones existentes responde a un desarrollo industrial importante, que a su vez conlleva una diversificación de los tipos de riesgo, motivo por el cual se han desarrollado metodologías y herramientas para la identificación, análisis y evaluación de estos riesgos desde diferentes perspectivas. Para ello, una visión prospectiva resulta fundamental, con el objetivo de prevenir escenarios accidentales y evaluar su impacto potencial en las personas, el ambiente y los equipos de proceso o la infraestructura, permitiendo que se propongan medidas de prevención o protección (Tixier et al., 2002).

2.4. Toma de decisiones para seleccionar técnicas de análisis y evaluación de riesgos

Desde el punto de vista de la seguridad de procesos, históricamente los operadores y las organizaciones han tratado inicialmente de cuantificar las afectaciones y las consecuencias de los accidentes potenciales, antes de comprender por qué y cómo podrían ocurrir. Es por esta razón que la gran mayoría de las técnicas y/o métodos existentes son deterministas; es decir, que se enfocan en los productos, los equipos de proceso y la cuantificación de las consecuencias para diferentes blancos de interés (i.e.

personas, medio ambiente, equipos). Por su parte, existen en menor proporción los métodos probabilísticos que se basan en la determinación de la probabilidad o frecuencia de ocurrencia de situaciones peligrosas o en la ocurrencia de un potencial accidente. Cabe mencionar que el enfoque de los métodos probabilísticos está en la probabilidad de falla de los equipos o sus componentes, por lo que suelen utilizarse, por ejemplo, para realizar análisis sobre una parte específica de una planta. Los métodos determinísticos y aquellos métodos combinados, es decir determinísticos y probabilísticos, se utilizan para analizar todo el establecimiento industrial (Tixier et al., 2002).

Si bien es cierto que la gran variedad de metodologías de identificación y análisis de riesgo brinda a los analistas la posibilidad de escoger la metodología que más se ajuste a sus necesidades, esta selección también debe ir de la mano de la información de entrada con la que cuenta la empresa y/o instalación industrial, al igual que de la información de salida esperada. Por lo tanto, previo a la selección de una metodología se debe tener claridad sobre la información que se tiene y los resultados esperados. La Figura 20 presenta los tipos de información de entrada y los datos resultantes.



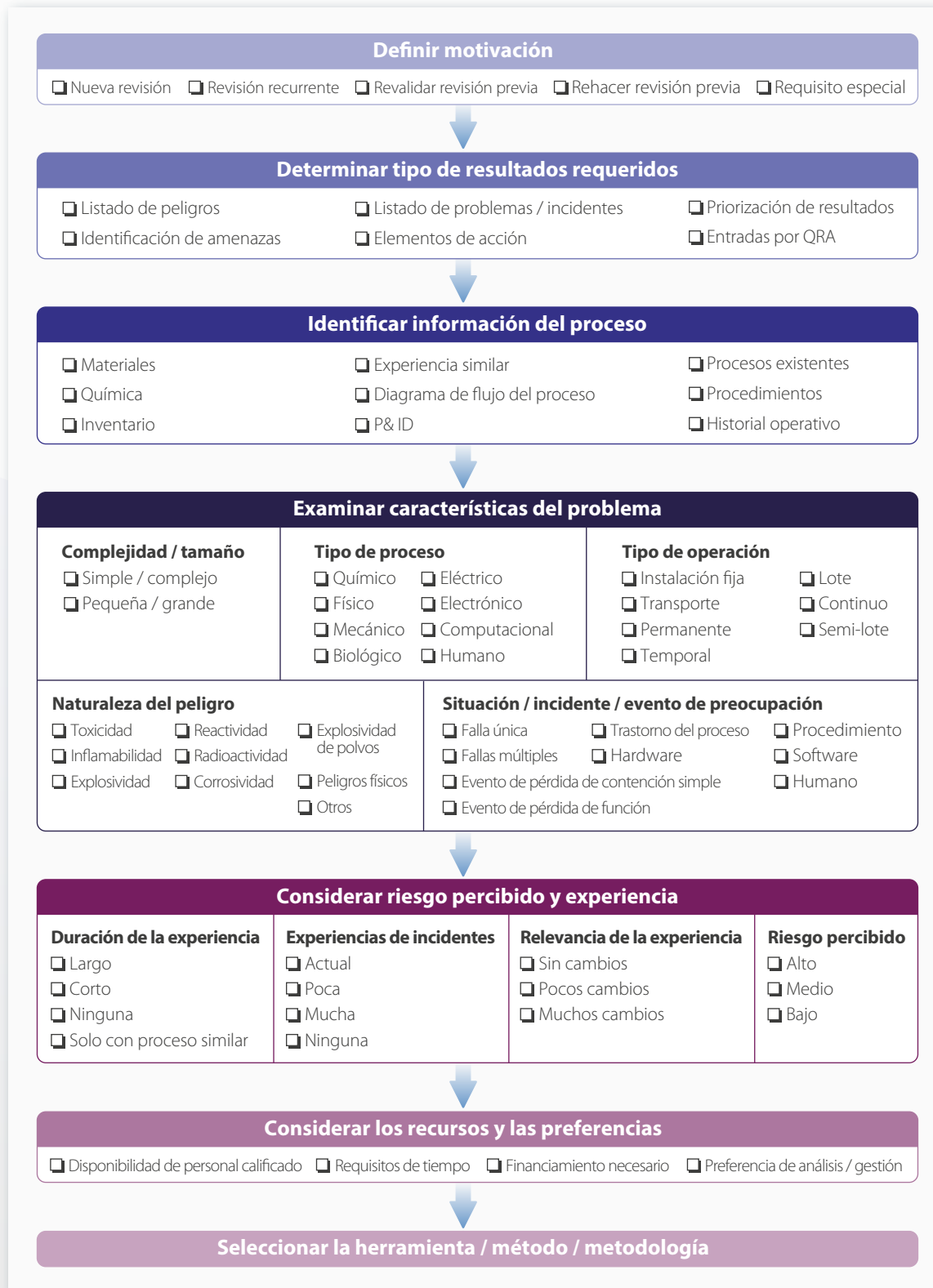
Dada la diversidad de las técnicas y metodologías disponibles para llevar a cabo el proceso de valoración de riesgos, es indispensable contar con una herramienta que soporte la toma de decisiones, tal como el diagrama que se presenta en la Figura 21, el cual pretende apoyar la selección de la metodología más adecuada, teniendo en cuenta diversos criterios.

El esquema presenta un orden general para considerar los diversos factores que podrían influir en qué herramienta de identificación o análisis de riesgos utilizar para un estudio determinado. Ciertamente, los factores relacionados con la

motivación y el tipo de resultados deben ser los más importantes para toda organización. Estos factores establecen el punto de partida para satisfacer la necesidad de una mayor comprensión del riesgo. La información disponible, las características del problema y el riesgo percibido pueden tener diversos grados de importancia, dependiendo de la cultura de la organización y/o de la instalación. Finalmente, la cantidad de recursos necesarios para apoyar a un equipo de analistas de riesgos debe ser el último factor considerado en la selección de la herramienta, aunque este determina la selección entre alternativas de análisis por lo demás iguales. (CCPS, 2008).



Figura 21. Criterios para seleccionar las herramientas o técnicas de identificación y análisis del riesgo



Fuente: (CCPS, 2008).





Capítulo 3

Cultura de seguridad de procesos

El concepto de la Cultura de Seguridad se desencadenó luego de la ocurrencia del desastre de Chernóbil en 1986, con el propósito de lograr una conciencia tanto individual como organizacional de los parámetros de gestión de seguridad (Muñoz Giraldo et al., 2015). En la actualidad, la cultura de seguridad de procesos es uno de los pilares fundamentales del marco para la gestión de la seguridad de procesos basada en riesgo (RBPS) (CCPS, 2007), tal como se mencionó en el Capítulo 2.

Como se explicó en la Figura 10, este marco se fundamenta en cuatro pilares: el primero de ellos es el compromiso con la seguridad de procesos. Este pilar se compone, a su vez, de cinco elementos, dentro de los que se encuentra la Cultura de seguridad de procesos, la cual se define como la “combinación de valores y comportamientos grupales que determinan la forma en que se gestiona la seguridad de procesos” (CCPS, 2016).

Parte de la esencia de una cultura sólida de seguridad de procesos es que se tengan valores acentuados que se reflejen en las acciones de la organización y de sus miembros, incluyendo gerentes, trabajadores y operarios. Adicionalmente, esta robustez implica que los nuevos miembros de una organización respalden dichos valores para sumar a una cultura de seguridad de procesos firme (CCPS, 2007).

Esta, por lo tanto, busca brindar a sus miembros los valores necesarios para comprender la importancia de seguir los procedimientos y protocolos establecidos y moldear sus actitudes, teniendo como objetivo prevenir la ocurrencia de eventos accidentales en la operación. La cultura de seguridad de procesos requiere, por lo tanto, de esfuerzos de largo plazo, donde se precisa un compromiso por parte de todos los miembros de la organización o empresa para mantenerla vigente y eficaz en el tiempo.

Para lograrlo es necesario tener en cuenta los principios clave que se presentan en la Figura 22, los cuales buscan un desarrollo, evaluación y mejora continua de la cultura de seguridad de procesos (CCPS, 2007). Como se observa, no solo se requiere mantener una práctica adecuada y desarrollar e implementar una cultura confiable, sino que esta también debe ser monitoreada para poder determinar los elementos que funcionan y los que representan una oportunidad de mejora. Por lo tanto, es importante que las organizaciones cuenten con métricas de seguridad de procesos que les permitan analizar las estadísticas de su gestión y mejorarlas cuando sea necesario o mantener aquellas buenas prácticas que están fortaleciendo el sistema de gestión. Con esto en mente, la siguiente sección presenta algunos indicadores de desempeño y métricas en seguridad de procesos.



Figura 22. Principios clave para el desarrollo, evaluación y mejora continua de la cultura de seguridad de procesos



3.1 Indicadores de desempeño y métricas en seguridad de procesos

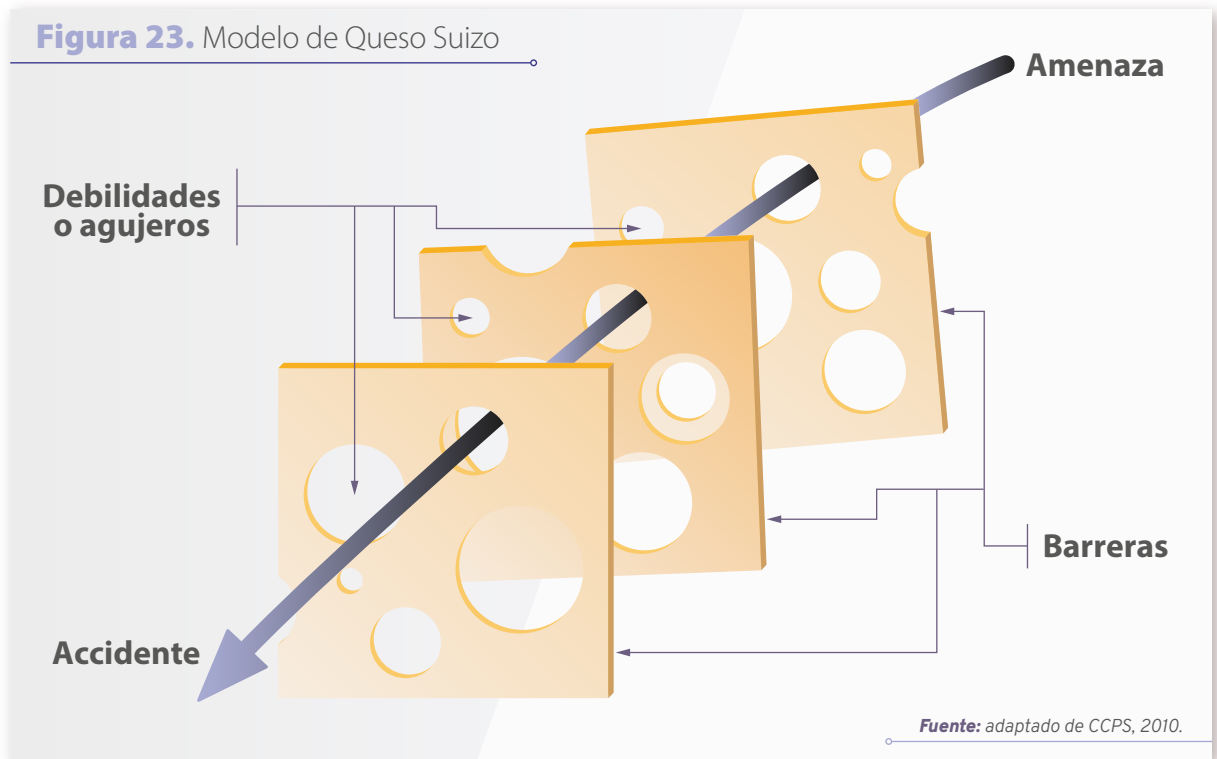
Como se ha mencionado, las organizaciones deben contar con una cultura de seguridad de procesos que permita gestionar los riesgos de manera eficaz y oportuna. En este marco, la gestión de seguridad de procesos se define como un "sistema de gestión que se centra en la prevención, preparación, mitigación, respuesta y restauración de emisiones catastróficas de productos químicos o energía, de un proceso asociado con una instalación industrial" (CCPS,

2011). Un sistema de seguridad de procesos busca mantener operaciones fiables de manera que debe identificar y medir todos los factores, variables y acciones que puedan desviar al proceso de su operación segura. Para ello, las organizaciones deben contar con métricas que permitan identificar incidentes menores, casi accidentes (es decir, incidentes sin pérdidas), comportamientos inseguros, aquellos incidentes que superen los umbrales establecidos por la compañía o que podrían generar accidentes catastróficos (CCPS, 2010). La medición y las métricas de desempeño son una parte crítica del sistema RBPS.



Los incidentes de seguridad de procesos suelen ser causados por múltiples fallas que convergen dando como resultado una pérdida de contención de materiales peligrosos o de energía. Una analogía típicamente utilizada para explicar esta aproximación es el Modelo del Queso Suizo, que se presenta a continuación, en el que se representan las diferentes barreras físicas, operacionales u organizacionales con el ánimo de contener amenazas expuestas. Como el queso gruyere, estas barreras tienen debilidades que están

representadas por agujeros, los cuales no tienen ni el mismo tamaño ni están ubicados en la misma posición. Sin embargo, se pueden dar las condiciones para que estos agujeros se alineen y lleven el flujo de peligro a la materialización de un evento accidental. Esta analogía permite también identificar los eventos que logran materializarse, como indicadores retrospectivos (*lagging*), mientras que al detectar a tiempo una falla del sistema, representada por un orificio del queso, se denomina una métrica prospectiva (*leading*).



Por lo anterior, las métricas de seguridad de procesos buscan identificar las desviaciones del sistema, los agujeros que permiten identificar las no conformidades dentro de los sistemas operativos

antes de que puedan desencadenarse y resultar en un incidente grave (CCPS, 2010), pero también parten de una base de lecciones aprendidas y retorno de experiencia de eventos pasados.

Para tener en cuenta

Cada compañía tiene diferentes indicadores de tipo reactivos (prospectivos) y activos; sin embargo, hay elementos que son comunes y buscan hacer un conteo de eventos pasados o de condiciones inseguras.

Tomando en cuenta los indicadores reactivos, se pueden implementar ejemplos como fallas en los sistemas de protección, la cantidad de pérdidas de contención (liberación de material) peligroso, el reporte e investigación de incidentes pasados. Si se contempla lo dispuesto por la CCPS en sus guías (CCPS, 2011), se puede incluir, además, cantidades umbrales sobre las cuales se debe hacer el reporte. Para el caso de Colombia, se puede hacer uso de los eventos reportados en la plataforma Ventanilla Integral de Trámites Ambientales (Vital) del sector ambiente.

Con respecto a los indicadores activos, se pueden abordar diferentes aspectos, desde inspecciones, mantenimientos o monitoreo implementado de las operaciones.

Esto quiere decir que se incluye si se han cumplido las auditorías programadas, si se ha seguido con el cronograma de inspección y si han hecho modificaciones al mismo en caso de encontrar condiciones indeseables. Otros ejemplos de este tipo de indicadores es el tiempo en el que sistemas de seguridad no estuvieron disponibles o si se ha realizado un correcto entrenamiento tanto a empleados como contratistas en la instalación.

Tanto los indicadores reactivos (*lagging*) como los activos (*leading*) reflejan la "salud" o "nivel de adecuación" de la instalación en relación con qué ha ocurrido en el pasado y qué se puede contemplar en el futuro dado las condiciones actuales. Estos indicadores también son relevantes en el sentido que permiten hacer comparaciones con otras empresas o industrias y, de esta manera, buscan soportar decisiones en cuanto a inversión en seguridad.



Es así como las métricas de seguridad de procesos proporcionan una herramienta para analizar el desempeño de una organización desde un punto de vista reactivo y prospectivo, es decir, teniendo en cuenta las situaciones actuales y los escenarios futuros que pueden presentarse, de manera que se puedan implementar las medidas correctivas necesarias. Es, por lo tanto, importante que una organización cuente con un sistema de monitoreo constante, incluyendo, actividades, comportamientos de gerentes, ingenieros y operarios, especificaciones operativas, capacitaciones, gestión de cambios, entre otros, para reducir la probabilidad de que se produzcan fallas importantes en el sistema, que puedan conllevar a la ocurrencia de incidentes y/o accidentes. De esta forma, las organizaciones pueden obtener una mirada de las buenas prácticas y las oportunidades de mejora, lo que repercute en una mejora continua de la seguridad de sus operaciones (CCPS, 2011).

Bajo la anterior perspectiva, la seguridad de procesos tiene como objetivo, a través de sus métricas, identificar fallas, brechas o condiciones de riesgo y corregirlas antes de que contribuyan a un incidente con graves consecuencias para la organización. Es por esta razón que el monitoreo del desempeño de una organización permite tener sistemas de gestión confiables con un gran potencial de retorno, el cual se traduce en competitividad, mayor eficiencia, confiabilidad y calidad de sus productos, rentabilidad, buena reputación y operaciones seguras. La minuciosidad de las métricas en seguridad de procesos permite un flujo constante y confiable de información para los encargados de evaluar el desempeño de la organización, identificando amenazas que pueden ser difícilmente evidenciadas, como,

por ejemplo, la corrosión interna de un equipo, siendo una herramienta útil para soportar la toma de decisiones en cuanto a la gestión de la seguridad de los procesos.

Cabe mencionar que no necesariamente una organización con un historial de baja o nula accidentalidad o cuyos incidentes hayan sido menores está libre de la ocurrencia de incidentes en el futuro. Por ello, es importante que las empresas no caigan en la complacencia o exceso de confianza y cuenten siempre con mecanismos de medición de su desempeño. En este proceso, tanto la recopilación de la información correcta como el enfoque del monitoreo son fundamentales para tener una visión más holística de las desviaciones del proceso. Es decir, que la mejora continua de la seguridad de procesos requiere de una visión de toda la empresa para poder lograr una priorización de acciones que conlleven a fortalecer el desempeño de la organización. Bajo esta óptica, las métricas en la industria sirven como un criterio de desempeño para que las agencias reguladoras, gobiernos y las comunidades conozcan los esfuerzos que se realizan para disminuir la materialización de accidentes o la falta de estos. Así, un desempeño deficiente de la industria, como se mostró en el capítulo 1, lleva al desarrollo de políticas y regulaciones que aborden dichas problemáticas (CCPS, 2010).

Teniendo en cuenta lo anterior, establecer una cultura de seguridad de procesos que implemente un sistema integral de métricas ayudará a fortalecer la intolerancia ante las desviaciones en la operación. Para ello, la mejora continua es esencial y se fundamenta en el ciclo de Planificar-Hacer-Verificar-Actuar, el cual sigue estos pasos:

1. Definir lo que se quiere lograr (establecer objetivos).
2. Desarrollar y ejecutar el plan de mejora.
3. Hacer un seguimiento de lo que se hace y de lo bien que se hace.
4. Identificar oportunidades para mejorar el plan y/o la ejecución y hacer los cambios apropiados.
5. Continuar con el ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar hasta alcanzar el nivel aceptable de desempeño y mantener el desempeño deseado.

Las métricas seleccionadas adecuadamente que se ajustan a los objetivos detallados de una organización identificarán los éxitos y señalarán las debilidades del sistema. El ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar es un modelo útil para mejorar continuamente el desempeño del sistema de gestión de seguridad de procesos y las métricas que sustentan el sistema (CCPS, 2010). Por lo anterior, la selección del tipo y número de indicadores resulta esencial para garantizar la evaluación eficaz del rendimiento de la organización, de manera que se tenga un conocimiento completo de la operación, se tomen decisiones basadas en las buenas prácticas y en las desviaciones del proceso y no se caiga en un exceso de confianza injustificado. A continuación, se presentan los diferentes tipos de métricas existentes y sus enfoques.



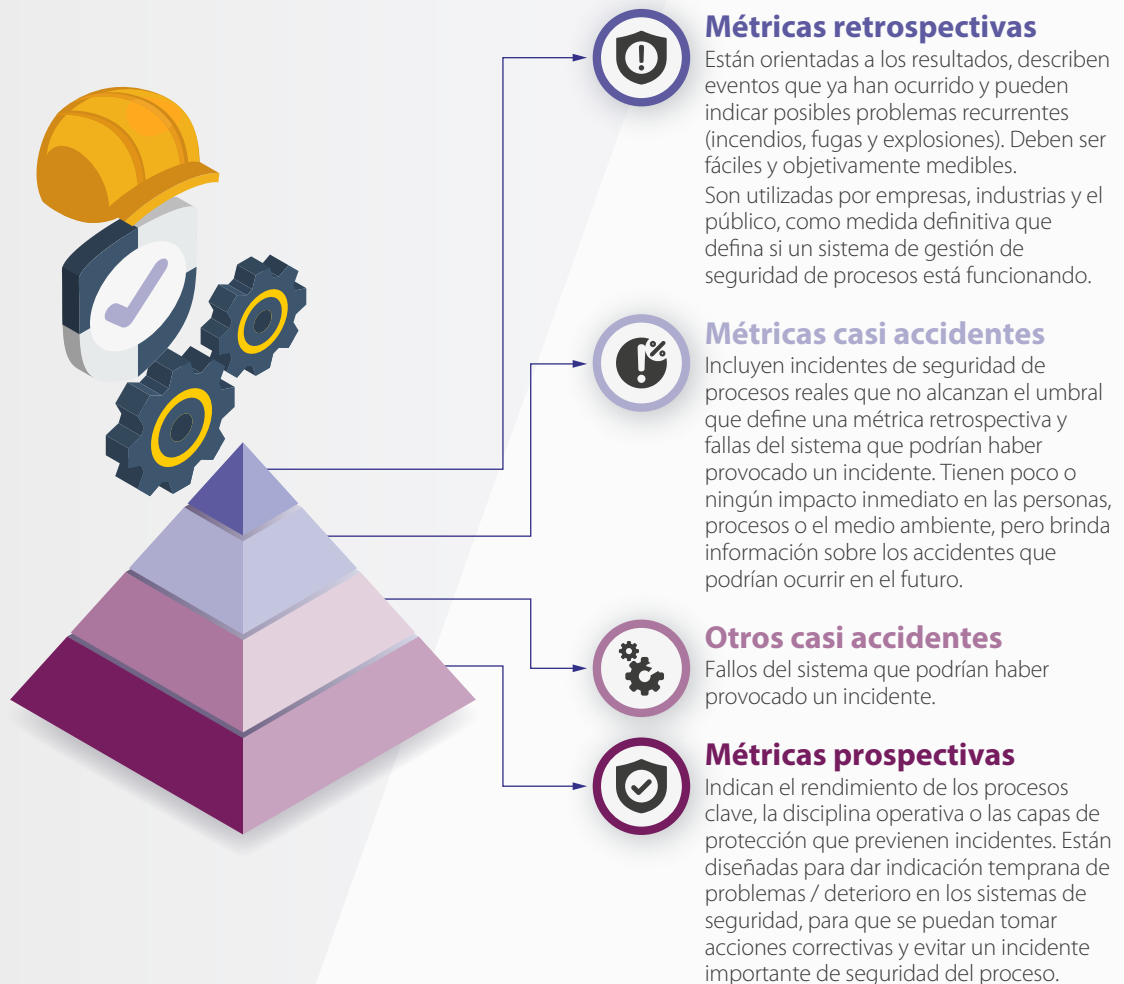
3.1.1 Tipos de métricas de gestión de seguridad de procesos

Una métrica es una forma de medir mediante la observación la seguridad de un proceso, permitiendo obtener información que es difícil de medir directamente. Por lo tanto, dadas las diferentes dimensiones de un sistema operativo, de una instalación industrial y de sus procesos productivos, es necesario contar con una variedad de métricas diferentes que ayuden a controlar el rendimiento de todos los elementos críticos.

Las buenas métricas de seguridad de procesos refuerzan una cultura de seguridad de procesos que promueve la

creencia de que los incidentes de seguridad de procesos se pueden prevenir, que la mejora es continua y que las políticas y los procedimientos son necesarios y se deben perseguir. Es así como se pueden usar diferentes métricas para describir el desempeño pasado, predecir el desempeño futuro y alentar el cambio de comportamiento (CCPS, 2010). Tal como se muestra en la Figura 22, las métricas retrospectivas y prospectivas están asociadas con los diferentes niveles de severidad de la pirámide de seguridad. La Tabla 8 muestra algunos aspectos a considerar para cada una de estas métricas.

Figura 24. Pirámide de seguridad de procesos



Fuente: adaptado de CCPS, 2010.

Como se ha mencionado, el propósito de las métricas es establecer buenos indicadores de las condiciones que podrían conducir a un evento grave. Su efectividad está directamente asociada con la mejora continua y, por lo tanto, es importante identificar y corregir comportamientos, problemas o desviaciones en los niveles inferiores de la pirámide; es decir, con un enfoque prospectivo, de manera que se puedan abordar

y eliminar los incidentes que puedan escalar hacia la cima de la pirámide, materializando accidentes con mayor grado de severidad. Por lo anterior, es esencial que se aprenda de los casi accidentes, dado que constituyen alertas, fallas sistémicas y oportunidades de mejora en cuanto a la seguridad de la operación, las cuales, de no tratarse a tiempo, pueden desencadenar resultados catastróficos.



Tabla 8. Aspectos por considerar de las métricas con enfoque en los niveles de severidad de la pirámide de seguridad de procesos

Métricas retrospectivas (Lagging metrics)	Casi-accidentes (Near misses)	Métricas prospectivas (Leading metrics)
Se pueden utilizar en la evaluación comparativa de toda la empresa o la industria. Sin embargo, solo se puede aprender de tales métricas después de la ocurrencia de un accidente o una falla.	Se puede considerar como un indicador retrospectivo o prospectivo, o ambos, puesto que describe un evento que ya sucedió de menor severidad, pero también puede considerarse una indicación de una situación más peligrosa que puede llegar a pasar en el futuro.	Brindan una indicación temprana del deterioro en la efectividad de los sistemas de gestión de seguridad para que se tomen medidas correctivas que permitan restaurar la efectividad de las barreras clave, antes de que ocurra cualquier evento de pérdida de contención.
Las métricas retrospectivas que representan fallas de menor severidad sirven para identificar peligros potenciales antes de que ocurra un evento catastrófico, permitiendo a la gerencia comprender y abordar los problemas en una etapa temprana.	La notificación de casi accidentes suele ser una métrica interna, ya que los eventos desencadenantes pueden ocurrir con mayor frecuencia, pero con menores consecuencias. Su investigación es importante para fortalecer las lecciones aprendidas y tomar medidas correctivas dentro del sistema u organización.	La integridad mecánica, el seguimiento de elementos de acción, la gestión del cambio, la capacitación en seguridad de procesos y la cultura son ejemplos de elementos de seguridad de procesos que podrían ser una fuente de métricas prospectivas.

Fuente: adaptado de CCPS, 2010, 2011.

Además de las métricas previamente mencionadas asociadas a la gravedad de un evento (incidente, casi accidente, comportamiento inseguro) también existen métricas que permiten rastrear actividades y cuál es su resultado (ver Tabla 9). Es decir, que permiten identificar

si una acción se lleva a cabo y cuál es el rendimiento o calidad asociados a dicha acción. Estas métricas de actividad y resultados son importantes para poder tener una comprensión más amplia del rendimiento del sistema (CCPS, 2010).

Tabla 9. Métricas de actividad y resultado

Métricas de actividad	Métricas de resultado
<p>Son métricas proactivas-prospectivas que miden qué tan bien cumple una instalación con los requisitos de un sistema establecido.</p> <p>Brindan a las organizaciones un medio para verificar, de manera regular y sistemática, si están implementando sus acciones prioritarias de la manera prevista y por qué se ha logrado o no un resultado (por ejemplo, medido por un indicador de resultado) (OECD, 2008).</p>	<p>Son métricas reactivas y retrospectivas que miden los cambios en el desempeño de seguridad a lo largo del tiempo o fallas en el desempeño.</p> <p>Evalúan si las acciones relacionadas con la seguridad (políticas, procedimientos y prácticas) están logrando los resultados deseados y si dichas acciones conducen a una menor probabilidad de ocurrencia y/o menores consecuencias de un accidente. A diferencia de los indicadores de actividades, no explican por qué se logró o no el resultado (OECD, 2008).</p>

Fuente: adaptado de CCPS, 2010.

Dentro de la diversidad de métricas existentes, también están las métricas internas y externas. Las métricas internas brindan la información necesaria a toda la organización para evaluar el progreso y la eficacia del sistema de gestión de seguridad de procesos. Las métricas externas, por su parte, permiten a las partes interesadas externas, evaluar el desempeño de la organización y responsabilizar a aquellos dentro de la organización por un desempeño inaceptable (CCPS, 2010).

Adicionalmente, las métricas también pueden ser absolutas o normalizadas. Las primeras no son útiles para las comparaciones, mientras que las métricas normalizadas permiten la comparación con otras empresas dentro de la misma industria o incluso con otras. Por lo tanto, es decisión de la organización seleccionar aquellas que más se ajusten a sus objetivos.

En conclusión, las métricas de seguridad de procesos son indicadores críticos para evaluar el desempeño de un sistema de gestión de seguridad de procesos. Su implementación requiere de una diversidad de métricas para monitorear las diferentes dimensiones del sistema y el desempeño de todos sus elementos críticos y abogar por una mejora continua. Una buena métrica debe, por lo tanto, cumplir con los siguientes aspectos:

- Permitir comparaciones precisas y detalladas.
- Llevar a conclusiones correctas y evitar conclusiones erróneas.
- Ser bien entendida.
- Tener una base cuantitativa.





Glosario

Accidente: es una secuencia de eventos no controlados que producen consecuencias no deseadas que afectan el funcionamiento continuo del sistema (Cameron & Raman, 2005).

Aceptabilidad del riesgo: se refiere a la disposición de la sociedad para afrontar los riesgos de una actividad y aceptar que está preparada para asumirlos en el momento que se materialicen; esto, de acuerdo con la percepción asociada a los mismos. Los criterios de aceptación de riesgos son la base para la toma de decisiones y su justificación sobre el riesgo aceptable (Resolución 0559, 2022).

Amenaza: peligro latente de que un evento físico de origen natural, causado o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales (Ley 1523, 2012).

Derrame: pérdida de contención accidental de una materia en estado líquido (UNGRD, 2017).

Evento: es un fenómeno natural, socio-natural o tecnológico, que actúa como el detonante de los efectos adversos sobre las vidas humanas, la salud y/o la infraestructura económica y social y ambiental de un territorio (UNGRD, 2017).

Explosión: liberación súbita de energía a alta presión. Se puede clasificar de tipo física o química (Crowl & Louvar, 2002).

Fuga: pérdida accidental de un material gaseoso o vapor, incluyendo agentes biológicos liberados accidentalmente o de manera controlada (UNGRD, 2018).

Incendio: oxidación exotérmica rápida (combustión) de un combustible en estado de ignición. El combustible puede estar en estado sólido líquido o vapor (Crowl & Louvar, 2002).

Incidente: es una secuencia de eventos que podrían resultar en impactos adversos o interrupciones (Cameron & Raman, 2005).

Peligro: fuente o situación con capacidad de producir daño.



Riesgo aceptable: posibles consecuencias sociales y económicas que, implícita o explícitamente, una sociedad o un segmento asume o tolera en forma consciente por considerar innecesaria, inoportuna o imposible una intervención para su reducción dado el contexto económico, social, político, cultural y técnico existente. La noción es de pertinencia formal y técnica en condiciones donde la información existe y cierta racionalización en el proceso de toma de decisiones puede ejercerse, y sirve para determinar las mínimas exigencias o requisitos de seguridad, con fines de protección y planificación, ante posibles fenómenos peligrosos (Resolución 0559, 2022).

Riesgo mayor: se refiere a aquellos accidentes que podrán generar afectaciones sobre posibles víctimas, daños materiales y/o alteraciones del medio ambiente, tanto en la instalación industrial, como fuera de esta (Casal, Montiel, Planas & Vílchez, 1999).

Seguridad de procesos: marco disciplinado para administrar la integridad de los sistemas y procesos operativos que manejan sustancias peligrosas mediante la aplicación de buenos principios de diseño, ingeniería y prácticas operativas (CCPS, 2023).

Tolerabilidad del riesgo: se refiere a la disposición de vivir con algunos riesgos a cambio de obtener ciertos beneficios y en la confianza de que se controlará adecuadamente. Tolerar un riesgo significa que no se considera insignificante o algo que se pueda ignorar, sino que es algo que se debe mantener bajo revisión y tratar de reducir aún más si podemos (Resolución 0559, 2022).

Valor de Riesgo Máximo Individual Accidental: es el valor de riesgo individual máximo tolerable, que permite evaluar el nivel de desempeño de una instalación fija clasificada o actividad frente al riesgo accidental. El valor aplica para el riesgo de una persona del público en general (*off-site*) (Resolución 0559, 2022).

Vulnerabilidad: susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños a los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que puedan ser afectados por eventos físicos peligrosos (Ley 1523, 2012).



Referencias

- AICHE & CCPS. (2000).** Guidelines for chemical process quantitative risk analysis.
- Atherton, J., & Gil, F. (2008).** Incidents that define process safety. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470925171>
- Cameron, I. T., & Raman, R. (2005).** Process Systems Risk Management (G. Stephanopoulos & E. Pistikopoulos, Eds. Vol. 6). Elsevier.
- Casal J., Montiel H, Planas E., Vilchez A. (1999).** Análisis del riesgo en instalaciones industriales. Ediciones UPC
- CCPS. (2007).** Guidelines for Risk Based Process Safety. American Institute of Chemical Engineers.
- CCPS. (2008).** Guidelines for Hazard Evaluation Procedures (3rd ed.). Wiley.
- CCPS. (2010).** Guidelines for Process Safety Metrics (J. W. Sons, Ed.).
- CCPS. (2011).** Process Safety Leading and Lagging Metrics. In.
- CCPS. (2016, 2016-07-14).** Introduction to Process Safety Culture. Retrieved 04-23 from <https://www.aiche.org/ccps/topics/elements-process-safety/commitment-process-safety/introduction-to-process-safety-culture>
- CCPS. (2023).** CCPS Process Safety Glossary | AIChE. Retrieved 26-02 from <https://www.aiche.org/ccps/resources/glossary?title=I#views-exposed-form-glossary-page>
- Crowl, D., & Louvar, J. (2002).** Chemical Process Safety: Fundamentals with applications (G. Typesetters, Ed. Second Edition ed.). Prentice Hall International.
- Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2011).** Chemical Process Safety (3 ed.). Prentice Hall.
- Cruz, A. M., Steinberg, L. J., Vetere Arellano, A. L., Nordvik, J.-P., & Pisano, F. (2004).** State of the Art in Natech Risk Management.
- CSB. (2009a).** Imperial Sugar Company Dust Explosion and Fire. Retrieved 02/05 from <https://www.csb.gov/imperial-sugar-company-dust-explosion-and-fire/>
- CSB. (2009b).** Investigation Report: Sugar Dust Explosion and Fire. https://www.csb.gov/assets/1/20/imperial_sugar_report_final_updated.pdf?13902
- Decreto 2157** Directrices generales para la elaboración del plan de gestión del riesgo de desastres de las entidades públicas y privadas en el marco del artículo 42 de la ley 1523 de 2012., (2017).
- Delvosalle, C., Fievez, C., Pipart, A., & Debray, B. (2006).** ARAMIS project: A comprehensive methodology for the identification of reference accident scenarios in process industries. Journal of Hazardous Materials, 130(3), 200-219. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.005>
- ARAMIS D1C – APPENDIX 4:**Generic fault trees, (2004).
- Ecopetrol, & Uniandes. (2015).** Módulo 3: Técnicas PHA. In Módulos para la formación de ingenieros en temas relacionados con seguridad de procesos. (pp. 38). Bogota.
- ERHIRHIE et al. (2018),** Advances in acute toxicity testing: strengths, weaknesses and regulatory acceptance, Interdisciplinary toxicology, Vol. 11, No. 1, p. 5-12
- European Commission. (2014).** Lessons Learned Bulletin No. 6: Natech Accidents
- Girgin, S. (2011).** The natech events during the 17 August 1999 Kocaeli earthquake: Aftermath and lessons learned [Article]. Natural Hazards and Earth System Science, 11(4), 1129-1140. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1129-2011>
- HSE. (2023).** ALARP: Control of major accident hazards (COMAH). Retrieved 10-04 from <https://www.hse.gov.uk/comah/alarp.htm>
- IChemE. (2022).** Learning lessons from major incidents. In (Centenary Edition ed.).
- ICONTEC. (2013).** Gestión del riesgo:Técnicas de valoración del riesgo. In N. IEC/ISO (Ed.), (Vol. 31010): NTC IEC/ISO.
- Risk management – Risk assessment techniques, (2019).**
- Administración/Gestión de riesgos- Lineamientos guía: Traducción sólo para capacitación, (2018).**
- ISO. (2009).** ISO 31000: Risk Management-Principles and Guidelines. In (Vol. 31000, pp. 24).
- Jones-Lee, M., & Aven, T. (2011).** ALARP—What does it really mean? Reliability Engineering & System Safety, 96(8), 877-882. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.02.006>
- Krausmann, E., & Cruz, A. M. (2013).** Impact of the 11 March 2011, Great East Japan earthquake and tsunami on the chemical industry. Natural Hazards, 67, 811–828.



Krausmann, E., Cruz, A. M., & Salzano, E. (2017). Natech Risk Assessment and Management: Reducing the Risk of Natural-Hazard Impact on Hazardous Installations. Elsevier.

Ley 1523 Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, (2012).

Lindell, M. K., & Perry, R. W. (1996). Identifying and managing conjoint threats: Earthquake-induced hazardous materials releases in the US. *Journal of Hazardous Materials*, 50(1), 31-46. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-3894\(96\)01764-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-3894(96)01764-5)

Luo, X., Cruz, A. M., & Tzioutzios, D. (2021). Climate change and temporal-spatial variation of tropical storm-related Natechs in the United States from 1990 to 2017: Is there a link? *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 62, 102366. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102366>

Mannan, S. (2014). Lees' Process Safety Essentials: Hazard Identification, Assessment and Control. Elsevier.

Marhavilas, P. K., Koulouriotis, D., & Gemeni, V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24(5), 477-523. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.03.004>

Marsh JLT Specialty. (2020). The 100 Largest Losses in the Hydrocarbon Industry 1974-2019. <https://www.marsh.com/us/industries/energy-and-power/insights/100-largest-losses-in-the-hydrocarbon-industry.html>

MinTrabajo. (2023). Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo - Ministerio del trabajo. Retrieved 28-02 from <https://www.mintrabajo.gov.co/relaciones-laborales/riesgos-laborales/sistema-de-gestion-de-seguridad-y-salud-en-el-trabajo>

Muñoz, F., Molina, W., Ocampo, F., Parra, L., Suarez, M. C., Ubaque, L., & Angarita, J. (2014). Guía de referencia para la elaboración de análisis cuantitativos de riesgo. In. Bogotá, Colombia.

Muñoz Giraldo, F., Amaya-Gómez, R., Romero Bayona, R. P., & Arbeláez Naranjo, C. I. (2015). NOTAS DE CLASE: Conceptos generales de seguridad de procesos. In Módulos para la formación de ingenieros en temas relacionados con seguridad de proceso Ecopetrol S.A./Uniaandes.

OECD. (2003). Guiding Principles for Chemical Accident Prevention, Preparedness and Response. Retrieved 5/24/2018 from <http://www.oecd.org/chemicalsafety/chemical-accidents/guiding-principles-chemical-accident-prevention-preparedness-and-response.htm>

OECD. (2008). Guidance on Developing Safety Performance Indicators Related to Chemical Accident Prevention, Preparedness and Response. In *Guidance for Industry (Second Edition ed., Vol. 19)*. Paris: OECD Environment, Health and Safety Publications.

OECD. (2015). Addendum Number 2 to the OECD Guiding Principles for Chemical Accident Prevention, Preparedness and Response (2nd ED.) to Address Natural Hazards Triggering Technological Accidents (NaTechs) (Series on Chemical Accidents, Issue.

OECD. (2020). Natech Risk Management: 2017-2020 Project Results. Series on Chemical Accidents, 32. [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=env/jm/mono\(2020\)4&doclanguage=en](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=env/jm/mono(2020)4&doclanguage=en)

OECD. (2022). The Impact of Natural Hazards on Hazardous Installations. [oe.cd/natech](http://www.oecd.org/natech)

Rasmussen, K. (1995). Natural events and accidents with hazardous materials. *Journal of Hazardous Materials*, 40(1), 43-54. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-3894\(94\)00079-V](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-3894(94)00079-V)

Resolucion 0559, (2022). <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Resoluciones/RESOLUCION-0559-24-JUNIO-2022.PDF>

Sengul, H., Santella, N., Steinberg, L., & Cruz, A. (2012). Analysis of hazardous material releases due to natural hazards in the United States. *Disasters*, 36, 723-743. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2012.01272.x>

Showalter, P. S., & Myers, M. F. (1994). Natural Disasters in the United States as Release Agents of Oil, Chemicals, or Radiological Materials Between 1980-1989: Analysis and Recommendations. *Risk Analysis*, 14(2), 169-182. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1994.tb00042.x>

SPHERA. (2022). Sphera Insights: Safety Report 2022.

Steinberg, L. J., & Cruz, A. M. (2004). When Natural and Technological Disasters Collide: Lessons from the Turkey Earthquake of August 17, 1999. *Natural Hazards Review*, 5(3), 121-130.

Suarez-Paba, M. C., Perreur, M., Muñoz, F., & Cruz, A. M. (2019). Systematic literature review and qualitative meta-analysis of Natech research in the past four decades. *Safety Science*, 116, 58-77. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.033>

Tixier, J., Dusserre, G., Salvi, O., & Gaston, D. (2002). Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15(4), 291-303. [https://doi.org/10.1016/s0950-4230\(02\)00008-6](https://doi.org/10.1016/s0950-4230(02)00008-6)

Resolución 1770. (2013). Creación de la Comisión Técnica Nacional Asesora de Riesgos Tecnológicos (CNARIT).

UNGRD. (2017). Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes. In.

UNGRD. (2018). Lo que usted debe saber sobre riesgo tecnológico

Villalba Hernández, N. A., Muñoz Giraldo, F., Romero Bayona, R. P., & Arbeláez Naranjo, C. I. (2015). Notas de clase Módulo 3: técnicas PHA. In Módulos para la formación de ingenieros en temas relacionados con seguridad de procesos. Bogotá, Colombia.

Young, S., Balluz, L., & Malilay, J. (2004). Natural and technologic hazardous material releases during and after natural disasters: a review. *Science of The Total Environment*, 322(1), 3-20. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00446-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00446-7)





Esta guía fue desarrollada por el
Consejo Colombiano de Seguridad
Todos los derechos reservados
2024