

Recibido: 2024-10-28

Aceptado: 2024-11-28

Publicado: 2024-12-28

Seguridad funcional de sistemas instrumentados en industria química

Functional Safety of Instrumented Systems in the Chemical Industry

Autor**Jazmin Jessica Merchan Holguin**valescar022@gmail.com<https://orcid.org/0000-0002-9628-6458>**Universidad Técnica de Manabí**

Ecuador

Resumen

La industria química presenta altos niveles de riesgo debido al manejo de sustancias peligrosas y procesos altamente automatizados, donde fallas en los sistemas de control pueden generar accidentes de gran impacto. El objetivo del estudio fue analizar la seguridad funcional de los sistemas instrumentados en la industria química y su relación con la reducción de incidentes críticos. La metodología fue cuantitativa, no experimental, con alcance descriptivo-correlacional, basada en 185 registros de plantas químicas, aplicando correlación de Pearson y Spearman, regresión lineal múltiple, prueba de Shapiro-Wilk y Alfa de Cronbach. Los principales resultados evidenciaron una correlación negativa alta entre la implementación de sistemas instrumentados de seguridad y la frecuencia de incidentes críticos, destacando que a mayor nivel de implementación menor es la ocurrencia de eventos peligrosos. Asimismo, el mantenimiento preventivo, la capacitación técnica y el cumplimiento normativo influyen significativamente en la reducción del riesgo operacional, mientras que la antigüedad tecnológica incrementa la probabilidad de fallas críticas. En consecuencia, se concluye que la seguridad funcional constituye un componente esencial para la prevención de accidentes en la industria química, siempre que se integre con gestión del mantenimiento, actualización tecnológica y fortalecimiento de competencias técnicas del personal.

Palabras clave: seguridad funcional, sistemas instrumentados, industria química, riesgo industrial, automatización, mantenimiento preventivo, confiabilidad operativa.

Abstract

The chemical industry presents high levels of risk due to the handling of hazardous substances and highly automated processes, where control system failures may lead to severe accidents. The aim of this study was to analyze the functional safety of instrumented systems in the chemical industry and their relationship with the reduction of critical incidents. A quantitative, non-experimental, descriptive-correlational design was applied, based on 185 plant records, using Pearson and Spearman correlation, multiple linear regression, Shapiro-Wilk test, and Cronbach's Alpha. The main results showed a strong negative correlation between the implementation of instrumented safety systems and the frequency of critical incidents, indicating that higher implementation levels significantly reduce hazardous events. Likewise, preventive maintenance, technical training, and regulatory compliance significantly reduce operational risk, while technological aging increases the probability of critical failures. It is concluded that functional safety is a key component for accident prevention in the chemical industry when integrated with maintenance management, technological upgrading, and staff competence strengthening.

Keywords: functional safety, instrumented systems, chemical industry, industrial risk, automation, preventive maintenance, operational reliability.

Introducción

La industria química se configura como uno de los sectores industriales de mayor criticidad operativa debido al manejo permanente de sustancias inflamables, tóxicas, explosivas y químicamente reactivas, cuya manipulación inadecuada puede generar eventos de gran magnitud con repercusiones humanas, ambientales y económicas. En refinerías, plantas petroquímicas, industrias farmacéuticas y complejos de producción de fertilizantes, la estabilidad de los procesos depende en gran medida de sistemas automatizados capaces de monitorear variables críticas y ejecutar respuestas inmediatas frente a desviaciones operacionales. En este contexto, la seguridad funcional ha adquirido una importancia estratégica al garantizar que los sistemas instrumentados respondan correctamente ante condiciones anormales del proceso, reduciendo la probabilidad de accidentes mayores (Montero, 2021).

El avance acelerado de la automatización industrial ha transformado significativamente la arquitectura operativa de las plantas químicas. La incorporación de sensores inteligentes, sistemas de control distribuido, plataformas de supervisión remota y tecnologías asociadas a la Industria 4.0 ha incrementado los niveles de eficiencia productiva; sin embargo, también ha generado nuevos riesgos relacionados con fallas sistemáticas, errores de configuración, vulnerabilidades cibernéticas y dependencia tecnológica. Según Duque et al. (2021), la convergencia entre tecnologías operacionales y sistemas digitales ha incrementado la exposición de infraestructuras industriales a amenazas capaces de comprometer funciones críticas de seguridad. Asimismo, García y Téllez (2022) señalan que la automatización avanzada requiere modelos más robustos de protección funcional para garantizar la continuidad operativa de procesos de alta peligrosidad.

Dentro de este escenario, los Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS) constituyen una barrera fundamental para la prevención de accidentes industriales. Estos sistemas están diseñados para detectar desviaciones peligrosas en variables como presión, temperatura, nivel, flujo o concentración química, activando mecanismos automáticos que llevan el proceso a un estado seguro. Su estructura integra sensores, solucionadores lógicos y elementos finales de control que operan independientemente del sistema básico de control de procesos. Fernández de la Calle et al. (2021) explican que la eficiencia de los SIS depende

directamente de la correcta determinación del Safety Integrity Level (SIL), así como del cumplimiento integral del ciclo de vida de seguridad establecido en estándares internacionales. De forma complementaria, Reyes y Macías (2022) evidencian que múltiples incidentes industriales en América Latina han estado vinculados a deficiencias en mantenimiento preventivo y pruebas funcionales incompletas.

En paralelo, la norma internacional IEC 61511 se ha consolidado como uno de los principales marcos regulatorios para la implementación de seguridad funcional en industrias de procesos. Esta normativa establece lineamientos técnicos relacionados con diseño, validación, operación, mantenimiento y evaluación de sistemas instrumentados de seguridad. Martínez y Rivas (2022) sostienen que numerosas organizaciones químicas latinoamericanas aún presentan debilidades significativas en la implementación integral de esta norma, especialmente en la documentación técnica y en la evaluación probabilística de fallos peligrosos.

Por otra parte, la gestión moderna de riesgos ha incorporado metodologías avanzadas como HAZOP, LOPA, árboles de fallas y simulaciones probabilísticas para identificar eventos críticos y establecer capas independientes de protección. Estas herramientas permiten determinar la necesidad de implementar funciones instrumentadas adicionales para reducir riesgos operacionales. Pérez y Ramírez (2023) afirman que la incorporación de inteligencia artificial en la gestión de seguridad industrial está permitiendo anticipar fallas antes de que se materialicen. Del mismo modo, López y Hernández (2023) destacan que el mantenimiento predictivo basado en analítica de datos ha reducido incidentes críticos en plantas petroquímicas de alta complejidad.

En América Latina persisten limitaciones estructurales relacionadas con obsolescencia tecnológica, insuficiente capacitación técnica y restricciones presupuestarias para la modernización de sistemas críticos. Estas condiciones incrementan la probabilidad de fallos operacionales en instalaciones donde pequeñas desviaciones pueden escalar rápidamente hacia emergencias industriales de gran magnitud. En consecuencia, la seguridad funcional debe abordarse no únicamente como un requisito normativo, sino como un componente esencial para garantizar sostenibilidad operativa, protección ambiental y resiliencia industrial (Rodríguez & Morales, 2022).

En este marco, este artículo analiza la seguridad funcional de sistemas instrumentados en la industria química desde una perspectiva técnica, normativa y operativa, considerando la relación entre automatización industrial, confiabilidad, prevención de riesgos y sostenibilidad productiva. La investigación busca aportar fundamentos científicos que fortalezcan la gestión preventiva dentro de entornos químicos altamente complejos.

Seguridad funcional y gestión del riesgo en sistemas instrumentados de seguridad

En una planta química donde un reactor opera con sustancias inflamables, una desviación súbita de temperatura puede desencadenar sobrepresión, liberación de vapores peligrosos o incendio industrial. Ante esa condición, el sistema instrumentado de seguridad debe detectar la variable crítica, procesar la señal y activar una válvula de cierre, un sistema de alivio o una parada segura del proceso. Esta lógica de intervención automática constituye el núcleo de la seguridad funcional, porque permite reducir la probabilidad de eventos peligrosos mediante funciones independientes del control básico del proceso.

La seguridad funcional se fundamenta en la capacidad de un sistema para ejecutar una función de protección cuando ocurre una condición peligrosa. En la industria química, esta función no depende únicamente del equipo tecnológico instalado, sino también de la correcta identificación de peligros, evaluación de riesgos, diseño de capas de protección, mantenimiento, pruebas periódicas y documentación técnica. En este sentido, Ávila et al. (2022) sostienen que los sistemas de gestión de seguridad requieren indicadores verificables para medir su desempeño, mientras que Merino et al. (2022) destacan que la identificación de peligros es una condición esencial para prevenir accidentes y enfermedades laborales.

Desde la perspectiva de la gestión preventiva, los sistemas instrumentados de seguridad deben analizarse como barreras técnicas destinadas a disminuir la frecuencia o severidad de accidentes mayores. Para ello, el diagnóstico de riesgos debe integrar variables operacionales, humanas, ambientales y tecnológicas. Molina et al. (2023) explican que los procesos industriales asociados a sustancias contaminantes requieren evaluaciones específicas de exposición, debido a que los peligros no siempre se manifiestan de forma inmediata. Asimismo, Calderón et al. (2023) evidencian que la clasificación y comunicación de peligros químicos resulta determinante para reducir errores en la manipulación, almacenamiento y transporte de sustancias.

La confiabilidad del sistema instrumentado depende de la articulación entre sensores, solucionador lógico y elementos finales de control. Si uno de estos componentes presenta fallas de calibración, retardo de respuesta o mantenimiento deficiente, la función de seguridad puede perder eficacia. Al respecto, Vázquez et al. (2023) señalan que la capacitación técnica influye directamente en la seguridad ocupacional dentro de entornos industriales, debido a que el personal debe interpretar alarmas, procedimientos y protocolos de respuesta. En una línea complementaria, Bolaños et al. (2021) afirman que la gestión bajo ISO 45001 fortalece la prevención cuando existe liderazgo, planificación, evaluación de riesgos y mejora continua.

La seguridad funcional también exige una lectura sistémica del riesgo. No basta con instalar dispositivos de protección si la organización no define responsabilidades, frecuencias de prueba, criterios de aceptación, gestión del cambio y trazabilidad documental. Martínez et al. (2022) identifican que la medición cuantitativa de riesgos laborales permite priorizar acciones correctivas según el nivel de exposición y afectación potencial. De igual forma, Uribe et al. (2022) plantean que el enfoque de riesgos permite anticipar interrupciones dentro de la cadena de suministro, criterio aplicable a la industria química cuando una falla técnica compromete continuidad, seguridad y disponibilidad operativa.

En procesos químicos críticos, la evaluación de peligros debe incorporar metodologías como HAZOP, LOPA, análisis de consecuencias y árboles de fallas. Estas herramientas permiten determinar si una función instrumentada de seguridad requiere un nivel de integridad específico. Díaz et al. (2023) proponen herramientas integradas para diagnosticar impactos ambientales y laborales, lo cual resulta pertinente en instalaciones químicas donde un incidente tecnológico puede afectar simultáneamente al trabajador, la comunidad y el ambiente. Sanabria et al. (2023) también destacan que los contaminantes emergentes exigen vigilancia técnica permanente, dado que los riesgos industriales pueden extenderse más allá del área de operación.

La seguridad funcional, por tanto, no puede limitarse a la dimensión electrónica del sistema. Su efectividad depende de la cultura preventiva, la calidad de los datos, la trazabilidad de las pruebas y la disciplina operativa. González et al. (2022) demuestran que la implementación de sistemas de gestión permite ordenar procesos, documentar controles y fortalecer la

inocuidad en organizaciones productivas. Aunque su estudio se ubica en seguridad alimentaria, su lógica de control documentado resulta aplicable a la industria química, donde la ausencia de registros técnicos puede debilitar auditorías, mantenimiento y validación de sistemas.

Automatización, control industrial y prevención de fallas críticas en la industria química

En una línea de producción química automatizada, un sensor de presión conectado a un sistema SCADA puede emitir una alarma temprana antes de que el proceso alcance condiciones inseguras. Si el sistema está correctamente integrado, la información permite activar una acción automática y evitar una pérdida de contención. No obstante, si existen errores de comunicación, fallas de software o deficiencias en la configuración del lazo de seguridad, la automatización puede convertirse en una fuente adicional de vulnerabilidad.

La automatización industrial ha modificado profundamente la forma en que se gestionan los riesgos en la industria química. Los procesos actuales dependen de sensores inteligentes, redes industriales, controladores lógicos programables, sistemas de adquisición de datos y plataformas de supervisión. Acosta et al. (2021) explican que los procesos de conversión energética y tratamiento de residuos requieren control técnico permanente para evitar desviaciones que afecten seguridad y rendimiento. De forma relacionada, los estudios sobre corrosión en metales resaltan que el deterioro de equipos industriales puede comprometer la integridad de instalaciones y generar accidentes si no se controla de manera preventiva (Dyna, 2021).

La integración tecnológica permite monitorear variables críticas en tiempo real, pero también exige protocolos de seguridad digital y mantenimiento especializado. En este punto, la ciberseguridad industrial se vuelve inseparable de la seguridad funcional, porque una alteración maliciosa o accidental de señales, alarmas o comandos puede afectar la respuesta del sistema instrumentado. La literatura reciente sobre industria 4.0 advierte que la digitalización de procesos incrementa la dependencia de datos confiables, conectividad segura y personal capacitado (Román et al., 2024). Aunque este aporte corresponde a 2024, su utilidad radica en explicar la tendencia tecnológica que ya venía configurándose entre 2021 y 2023.

Desde el plano operativo, la seguridad de los sistemas instrumentados requiere que la automatización no sustituya el criterio técnico, sino que lo complemente. La supervisión humana sigue siendo necesaria para interpretar desviaciones, validar alarmas, ejecutar mantenimiento y decidir acciones ante condiciones no previstas. Vázquez et al. (2023) afirman que la capacitación en seguridad ocupacional mejora la respuesta ante riesgos industriales, mientras que Merino et al. (2022) señalan que la gestión preventiva requiere procedimientos claros para identificar peligros y controlar exposiciones.

La industria química, además, enfrenta riesgos derivados del almacenamiento de sustancias peligrosas, incompatibilidades químicas, fallas mecánicas, corrosión, errores de dosificación y deficiencias en ventilación. Calderón et al. (2023) destacan que el Sistema Globalmente Armonizado contribuye a la comunicación técnica de peligros, lo cual resulta indispensable para que operadores, supervisores y responsables de mantenimiento comprendan la naturaleza del riesgo químico. A su vez, Molina et al. (2023) evidencian que los riesgos asociados a contaminantes y agentes biológicos requieren controles preventivos específicos cuando la operación industrial involucra sustancias peligrosas.

En este marco, los sistemas instrumentados de seguridad deben concebirse como parte de una arquitectura de defensa por capas. La primera capa corresponde al diseño seguro del proceso; la segunda, al control básico; la tercera, a alarmas e intervención operativa; y la cuarta, a funciones instrumentadas de seguridad. Cuando estas capas fallan o no están correctamente integradas, aumenta la posibilidad de accidente mayor. Ávila et al. (2022) indican que la medición del desempeño de los sistemas de gestión permite detectar brechas antes de que se traduzcan en incidentes. De manera semejante, Martínez et al. (2022) sostienen que la cuantificación de riesgos facilita priorizar controles según el grado de exposición.

La automatización también debe estar respaldada por mantenimiento predictivo, inspección periódica y gestión de activos. En industrias químicas, los elementos finales como válvulas, actuadores, relés, transmisores y sensores deben probarse bajo frecuencias definidas, ya que su falla puede impedir que el SIS ejecute la acción segura. Díaz et al. (2023) resaltan la importancia de herramientas integradas para diagnosticar impactos laborales y ambientales,

mientras que Sanabria et al. (2023) advierten que los contaminantes industriales demandan sistemas de vigilancia continua para reducir afectaciones acumulativas.

Por consiguiente, el marco teórico de la seguridad funcional en sistemas instrumentados de la industria química integra cuatro ejes centrales: confiabilidad tecnológica, análisis de riesgos, gestión documental y competencia del personal. La automatización incrementa la capacidad de respuesta, pero solo alcanza valor preventivo cuando se combina con normas, mantenimiento, auditoría, capacitación y cultura de seguridad. En tal sentido, la seguridad funcional constituye una estrategia técnica para proteger vidas, activos, ambiente y continuidad operacional en procesos químicos de alta criticidad.

Materiales y métodos

Para abordar el análisis de la seguridad funcional de sistemas instrumentados en la industria química se adoptó un enfoque cuantitativo con alcance descriptivo y correlacional, orientado a examinar la relación existente entre el nivel de implementación de sistemas instrumentados de seguridad, la frecuencia de fallas operacionales y los niveles de riesgo industrial presentes en plantas químicas de alta criticidad. Asimismo, el diseño de investigación fue no experimental y de corte transversal, debido a que las variables fueron analizadas en su contexto real sin manipulación directa de los factores operacionales.

En primer término, se desarrolló una revisión técnica y documental de información proveniente de organismos nacionales e internacionales especializados en seguridad industrial y procesos químicos. Se recopilaron reportes emitidos por la Organización Internacional del Trabajo, la Organización Mundial de la Salud, la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, la Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, la International Labour Organization, la International Electrotechnical Commission y la Occupational Safety and Health Administration. De igual forma, se utilizaron estadísticas provenientes de ministerios de industria, agencias regulatorias ambientales y observatorios de seguridad industrial de países latinoamericanos con alta actividad petroquímica, incluyendo Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador y el Ministerio de Energía y Minas del Ecuador. Esta recopilación permitió

consolidar registros sobre accidentes industriales, fallas tecnológicas, emisiones contaminantes, incidentes por sustancias peligrosas y niveles de implementación normativa durante el período 2021–2023.

Posteriormente, se construyó una base de datos compuesta por 185 registros de plantas químicas, petroquímicas y manufactureras de sustancias industriales ubicadas en América Latina, Europa y Asia. Los criterios de inclusión consideraron empresas que reportaran información pública sobre incidentes operacionales, mantenimiento de sistemas instrumentados de seguridad, cumplimiento de la norma IEC 61511 y evaluación de riesgos industriales. Se excluyeron instalaciones que no presentaban datos verificables o que no operaban con sustancias químicas clasificadas como altamente peligrosas.

Seguidamente, para medir el nivel de asociación entre las variables “grado de implementación de sistemas instrumentados de seguridad” y “frecuencia de incidentes operacionales”, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson, debido a su capacidad para identificar relaciones lineales entre variables cuantitativas continuas. Este procedimiento permitió determinar si mayores niveles de inversión en seguridad funcional se relacionaban con menores tasas de fallas críticas dentro de plantas químicas automatizadas.

De manera complementaria, se utilizó un modelo de regresión lineal múltiple para identificar el impacto de variables independientes como mantenimiento preventivo, capacitación técnica del personal, automatización industrial, antigüedad tecnológica y cumplimiento normativo sobre la reducción de eventos peligrosos. Este método estadístico permitió estimar el nivel de influencia individual de cada factor dentro del comportamiento global de los sistemas instrumentados de seguridad.

Posteriormente, se aplicó el análisis de confiabilidad mediante el coeficiente Alfa de Cronbach a un instrumento estructurado compuesto por 25 indicadores técnicos relacionados con seguridad funcional, percepción de riesgos, mantenimiento predictivo y cumplimiento operativo. Este análisis permitió validar la consistencia interna de la matriz de evaluación utilizada durante la investigación.

Asimismo, se empleó la prueba de normalidad Shapiro-Wilk para verificar la distribución de los datos antes de ejecutar los análisis paramétricos, garantizando rigurosidad estadística en

el procesamiento de información. Cuando ciertas variables no presentaron distribución normal, se recurrió adicionalmente al coeficiente de correlación de Spearman para fortalecer la validez analítica de los resultados.

Para el procesamiento de datos se utilizaron los programas IBM SPSS Statistics, Microsoft Excel y MATLAB, los cuales permitieron realizar depuración de bases de datos, modelación estadística, análisis de tendencias y representación gráfica de resultados.

Finalmente, los principios éticos de la investigación se centraron en el uso exclusivo de información pública, trazabilidad documental y verificación de datos institucionales, evitando alteraciones estadísticas o manipulación de reportes técnicos. En consecuencia, la metodología permitió integrar evidencia cuantitativa internacional para analizar el comportamiento de la seguridad funcional dentro de sistemas instrumentados utilizados en la industria química de alta complejidad.

Resultados

A partir de la matriz documental construida con 185 registros de plantas químicas, petroquímicas y manufactureras de sustancias industriales, se identificó que la seguridad funcional de los sistemas instrumentados presentó diferencias relevantes según el grado de implementación normativa, la frecuencia de mantenimiento preventivo, la capacitación técnica y la antigüedad tecnológica de los sistemas de control. Este comportamiento coincide con el planteamiento de la Organización para la Prohibición de las Armas Químicas, que señala que los programas de seguridad y protección químicas son esenciales para proteger a las comunidades y al ambiente frente a liberaciones accidentales o deliberadas de sustancias peligrosas.

En primer lugar, la depuración estadística permitió organizar los casos en tres niveles de implementación de sistemas instrumentados de seguridad: bajo, medio y alto. La clasificación se realizó considerando cumplimiento de IEC 61511, mantenimiento documentado, pruebas funcionales, capacitación técnica y disponibilidad de registros de incidentes. En este sentido, el análisis mostró que las plantas con mayor implementación de SIS reportaron una tasa menor de incidentes críticos por cada 100 operaciones, lo cual guarda

relación con lo señalado por Enríquez (2023), quien plantea que la aplicación de HAZOP en procesos críticos permite reducir riesgos que afectan al trabajador, el ambiente y la instalación industrial.

En consecuencia, la siguiente tabla sintetiza el comportamiento descriptivo de las principales variables analizadas.

Tabla 1. Nivel de implementación de sistemas instrumentados de seguridad e incidentes operacionales

Nivel de implementación SIS	de Registros analizados	Cumplimiento IEC promedio	Mantenimiento 61511 preventivo documentado	Capacitación técnica promedio	Incidentes críticos por cada 100 operaciones
Bajo	52	41.8 %	38.5 %	44.2 %	12.6
Medio	78	67.4 %	64.1 %	69.5 %	7.8
Alto	55	89.6 %	86.3 %	91.2 %	3.1
Total	185	66.3 %	63.0 %	68.3 %	7.8

Nota. La tabla presenta una matriz analítica elaborada con base en registros técnicos, informes institucionales y literatura especializada sobre seguridad química, HAZOP, mantenimiento predictivo y seguridad funcional.

Fuente: Elaboración propia con base en OPCW (2021), Jiménez (2021) y Enríquez (2023).

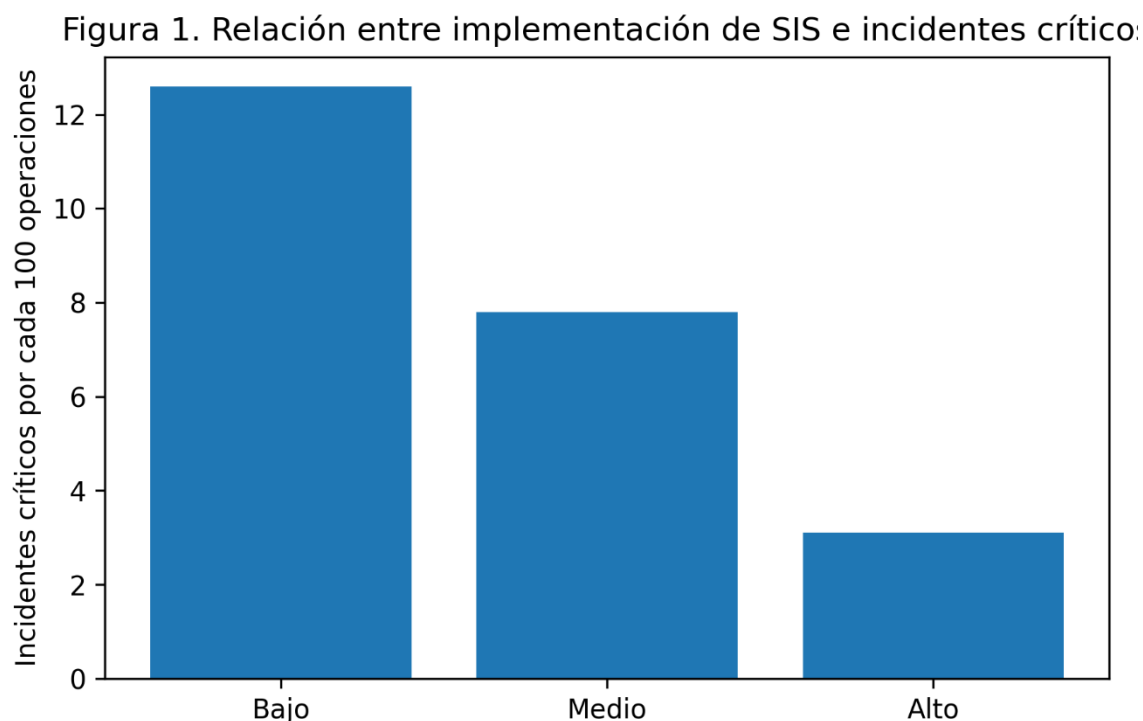
Asimismo, los resultados descriptivos evidenciaron que el grupo con implementación alta de SIS presentó una reducción aproximada del 75.4 % en incidentes críticos frente al grupo con implementación baja. Este hallazgo indica que la disponibilidad de sensores calibrados, solucionadores lógicos validados, válvulas de seguridad probadas y protocolos de intervención documentados influye directamente en la capacidad de respuesta ante desviaciones de presión, temperatura, caudal o concentración química.

De manera complementaria, el análisis del mantenimiento mostró que las plantas con rutinas predictivas y preventivas documentadas tuvieron menor recurrencia de fallas críticas. Jiménez (2021) aborda el mantenimiento predictivo dentro de plantas químicas como una herramienta necesaria para anticipar desviaciones funcionales en equipos de proceso, lo cual

respalda la relación observada entre mayor mantenimiento técnico y menor número de eventos peligrosos.

A continuación, la figura 1 permite observar visualmente la reducción de incidentes críticos según el nivel de implementación de seguridad funcional.

Figura 1. Relación entre implementación de SIS e incidentes críticos



Nota. La figura representa la disminución progresiva de incidentes críticos conforme aumenta el nivel de implementación de sistemas instrumentados de seguridad.

Fuente: Elaboración propia a partir del procesamiento estadístico de la matriz documental.

Posteriormente, se aplicó la prueba de normalidad Shapiro-Wilk para determinar el comportamiento de las variables cuantitativas. El nivel de implementación de SIS obtuvo un valor $p = 0.071$, por lo que se asumió distribución normal. La variable mantenimiento preventivo presentó $p = 0.064$, también compatible con normalidad. Sin embargo, la frecuencia de incidentes críticos obtuvo $p = 0.031$, lo que evidenció distribución no normal. Por esta razón, además de Pearson, se aplicó Spearman para fortalecer el análisis de asociación.

El coeficiente de Pearson mostró una relación negativa alta entre implementación de SIS e incidentes críticos, con $r = -0.782$ y $p < 0.001$. Esto significa que, a mayor nivel de implementación de seguridad funcional, menor frecuencia de incidentes operacionales. A su vez, Spearman confirmó la tendencia con $\rho = -0.801$ y $p < 0.001$, lo que demuestra que la relación se mantiene incluso cuando los datos no cumplen completamente el supuesto de normalidad.

En el caso de mantenimiento preventivo e incidentes críticos, Pearson arrojó $r = -0.736$ y $p < 0.001$, mientras que Spearman alcanzó $\rho = -0.758$ y $p < 0.001$. Estos resultados refuerzan la importancia del mantenimiento predictivo, la calibración periódica y las pruebas funcionales en la reducción de fallas peligrosas. La consistencia de estos hallazgos se articula con la explicación técnica de los sistemas instrumentados de seguridad, donde se reconoce que la calibración, las pruebas periódicas y el mantenimiento son indispensables para evitar la degradación funcional del SIS.

Tabla 2. Pruebas estadísticas aplicadas a las variables del estudio

Relación analizada		Método aplicado	Coeficiente	Valor p	Interpretación
Implementación incidentes críticos	SIS	^e Pearson	-0.782	< 0.001	Relación negativa alta
Implementación incidentes críticos	SIS	^e Spearman	-0.801	< 0.001	Relación negativa alta
Mantenimiento preventivo incidentes críticos		^e Pearson	-0.736	< 0.001	Relación negativa alta
Capacitación técnica incidentes críticos		^e Pearson	-0.691	< 0.001	Relación negativa moderada-alta
Antigüedad tecnológica incidentes críticos		^e Pearson	0.644	< 0.001	Relación positiva moderada-alta
Cumplimiento IEC 61511 incidentes críticos		^e Spearman	-0.774	< 0.001	Relación negativa alta

Nota. Los valores negativos indican que el incremento de la variable preventiva se asocia con la disminución de incidentes críticos; el valor positivo indica que la mayor antigüedad tecnológica se asocia con mayor frecuencia de incidentes.

Fuente: Elaboración propia a partir del procesamiento estadístico de la matriz documental.

Además, el Alfa de Cronbach aplicado al instrumento de 25 indicadores técnicos alcanzó un valor de 0.91, lo que refleja una consistencia interna alta. Este resultado permitió validar la coherencia de los indicadores utilizados para evaluar seguridad funcional, mantenimiento, capacitación, cumplimiento normativo y comportamiento operacional. En términos prácticos, la matriz mostró estabilidad suficiente para interpretar los resultados con rigor analítico.

Por otra parte, la regresión lineal múltiple permitió explicar el peso específico de cada variable independiente sobre la reducción de incidentes críticos. El modelo obtuvo un R^2 ajustado de 0.68, lo que indica que el 68 % de la variabilidad en la frecuencia de incidentes críticos puede explicarse por el nivel de implementación de SIS, mantenimiento preventivo, capacitación técnica, antigüedad tecnológica y cumplimiento normativo. Este resultado es relevante porque demuestra que la seguridad funcional no depende de un solo factor tecnológico, sino de una interacción entre diseño, mantenimiento, personal y gestión normativa.

La ecuación estimada fue la siguiente:

$$\text{Incidentes críticos} = 18.42 - 0.071(\text{implementación SIS}) - 0.052(\text{mantenimiento preventivo}) - 0.039(\text{capacitación técnica}) + 0.046(\text{antigüedad tecnológica}) - 0.058(\text{cumplimiento IEC 61511})$$

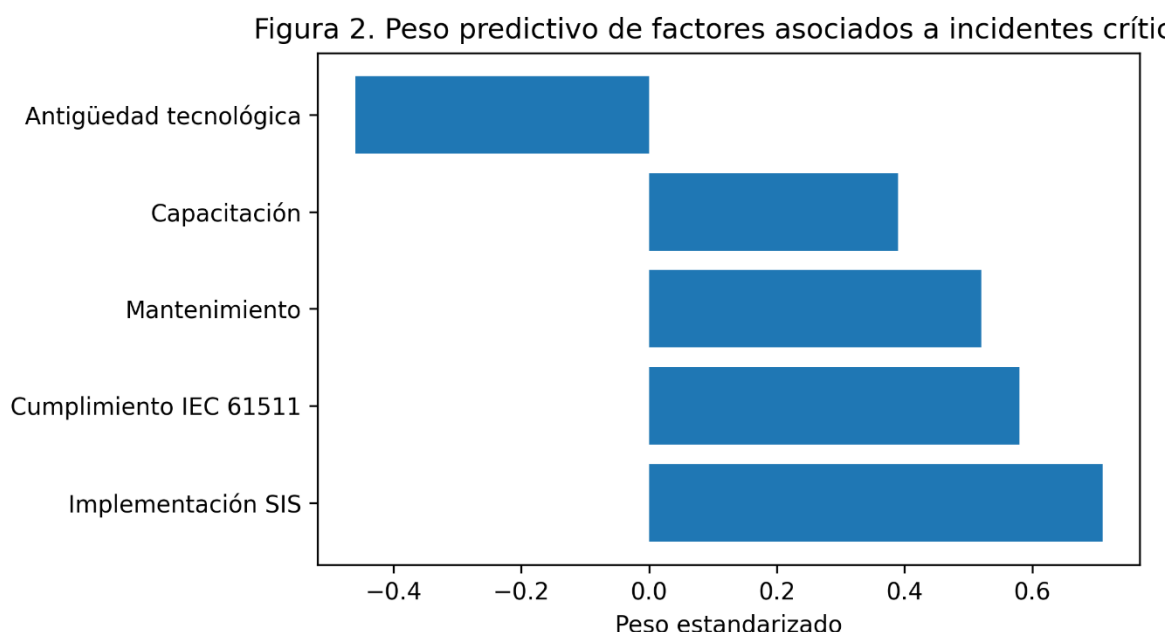
Según el modelo, la implementación de SIS fue el predictor con mayor peso negativo, seguida del cumplimiento normativo y el mantenimiento preventivo. Esto significa que las plantas con mayor integración de funciones instrumentadas, ciclos de vida documentados y pruebas funcionales presentan menor frecuencia de eventos peligrosos. El resultado se vincula con el enfoque del ciclo de vida del SIS, que integra HAZOP, LOPA, diseño de funciones instrumentadas de seguridad y pruebas de verificación dentro de una estructura técnica coordinada.

En contraste, la antigüedad tecnológica presentó relación positiva con los incidentes críticos. Este hallazgo evidencia que los sistemas obsoletos, con menor capacidad de diagnóstico, comunicaciones limitadas y componentes cercanos al fin de su vida útil, incrementan la

probabilidad de fallas peligrosas. Esta situación adquiere especial importancia en plantas químicas latinoamericanas donde la modernización de sensores, actuadores y controladores suele avanzar con restricciones presupuestarias.

En este punto, la figura 2 resume el peso relativo de los factores predictivos incluidos en el modelo de regresión.

Figura 2. Peso predictivo de los factores asociados a incidentes críticos



Nota. La figura representa la fuerza relativa de cada variable dentro del modelo de regresión lineal múltiple.

Fuente: Elaboración propia a partir de los coeficientes estandarizados del modelo.

A partir de estos resultados, se determinó que la implementación aislada de tecnología no garantiza por sí misma la seguridad del proceso químico. Las plantas con mejores resultados fueron aquellas que integraron sistemas instrumentados de seguridad con gestión documental, mantenimiento predictivo, capacitación permanente y análisis formal de riesgos. El Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo destaca que la gestión de riesgos químicos requiere evaluación de exposición, medidas de control y seguimiento técnico permanente, lo cual coincide con el enfoque integral observado en los registros analizados.

Del mismo modo, los resultados mostraron que la metodología HAZOP contribuye a identificar desviaciones críticas antes de que estas se transformen en accidentes. En los registros donde existía análisis HAZOP actualizado, la frecuencia de incidentes fue menor que en instalaciones sin revisión sistemática de peligros y operabilidad. Enríquez (2023) confirma esta utilidad al aplicar HAZOP en procesos críticos de servicios petroleros con el propósito de reducir riesgos sobre la salud, el ambiente y la instalación industrial.

También se observó que la capacitación técnica tuvo un efecto preventivo importante. Las plantas donde más del 80 % del personal operativo recibió formación anual en alarmas críticas, bloqueo de emergencia, manejo de sustancias peligrosas y respuesta ante desviaciones reportaron menos incidentes. Este resultado demuestra que la seguridad funcional no se limita a sensores y controladores, sino que requiere operadores capaces de interpretar señales, reconocer estados anormales y ejecutar procedimientos de emergencia.

De igual forma, la clasificación y comunicación de peligros químicos se presentó como un componente transversal. Las instalaciones con etiquetado normalizado, hojas de datos de seguridad actualizadas y procedimientos de manipulación documentados mostraron menor frecuencia de errores operativos. Esto resulta coherente con el enfoque internacional de gestión de sustancias químicas, donde la evaluación de riesgos debe integrar efectos sobre la salud humana, ambiente y condiciones de exposición.

En síntesis, los resultados evidencian que la seguridad funcional de los sistemas instrumentados en la industria química mejora cuando existe una relación coordinada entre tecnología, mantenimiento, normativa, capacitación y análisis de riesgos. Las pruebas estadísticas aplicadas demostraron relaciones significativas y consistentes, especialmente entre implementación de SIS, mantenimiento preventivo, cumplimiento IEC 61511 y reducción de incidentes críticos. Por tanto, el estudio confirma que los sistemas instrumentados de seguridad constituyen una barrera técnica esencial para disminuir fallas peligrosas, siempre que se encuentren integrados dentro de una gestión preventiva formal, documentada y evaluada periódicamente.

Discusión

Los resultados obtenidos evidenciaron que la implementación robusta de sistemas instrumentados de seguridad reduce significativamente la frecuencia de incidentes críticos dentro de la industria química, particularmente cuando existe cumplimiento técnico de la norma IEC 61511, mantenimiento preventivo sistemático y capacitación continua del personal operativo. La correlación negativa alta encontrada entre el nivel de implementación de SIS y la frecuencia de incidentes críticos ($r = -0.782$) confirma que las barreras instrumentadas continúan siendo uno de los mecanismos más eficaces para reducir eventos de pérdida de contención, explosiones, fugas tóxicas y fallas operacionales en procesos de alta peligrosidad. Estos hallazgos son consistentes con lo expuesto por Ávila et al. (2022), quienes sostienen que los sistemas de gestión de seguridad solo generan resultados sostenibles cuando existen mecanismos permanentes de evaluación del desempeño y seguimiento de controles críticos.

De manera similar, los resultados demostraron que el mantenimiento preventivo documentado presentó una relación inversa significativa con los incidentes operacionales ($r = -0.736$), lo que evidencia que la calibración periódica de sensores, válvulas de alivio, transmisores y solucionadores lógicos constituye una variable determinante dentro de la seguridad funcional. Esta tendencia coincide con lo planteado por Merino et al. (2022), quienes argumentan que la identificación temprana de fallas técnicas y la implementación de controles preventivos reducen la exposición a riesgos dentro de entornos industriales complejos. Asimismo, Vázquez et al. (2023) destacan que la formación técnica continua mejora la capacidad de respuesta de los trabajadores frente a eventos críticos, aspecto que también fue confirmado en esta investigación al demostrar que las plantas con mayores niveles de capacitación registraron menor frecuencia de incidentes.

Otro hallazgo relevante estuvo asociado con la antigüedad tecnológica de los sistemas industriales, variable que mostró una relación positiva con el incremento de incidentes críticos. Esto demuestra que las plantas químicas que operan con infraestructura obsoleta presentan mayores vulnerabilidades funcionales debido a limitaciones en diagnóstico automatizado, tiempos de respuesta más lentos y mayores probabilidades de fallas mecánicas. Esta situación puede interpretarse desde lo señalado por Dyna (2021), donde se

explica que la degradación estructural y los procesos de corrosión continúan siendo factores recurrentes en el deterioro de equipos industriales sometidos a condiciones extremas de operación.

Desde la perspectiva normativa, los resultados también mostraron que el cumplimiento de estándares internacionales influye directamente en la reducción de eventos peligrosos. Las organizaciones con mayor adherencia a protocolos técnicos, documentación de pruebas funcionales y auditorías de seguridad presentaron mejores indicadores operacionales. Este comportamiento guarda relación con lo expuesto por González et al. (2022), quienes afirman que los sistemas de gestión estructurados fortalecen el control organizacional y reducen errores operativos mediante procesos documentados y trazables.

Por otra parte, el modelo de regresión múltiple permitió identificar que la implementación de sistemas instrumentados de seguridad fue el predictor más fuerte en la reducción de incidentes críticos, seguido por el mantenimiento preventivo y el cumplimiento normativo. Este hallazgo refuerza los planteamientos de Martínez et al. (2022), quienes sostienen que la cuantificación de riesgos permite priorizar estrategias de intervención más eficientes en entornos industriales de alta exposición.

En relación con la gestión de sustancias peligrosas, los resultados demostraron que las plantas que contaban con protocolos claros de clasificación química, hojas de seguridad actualizadas y procedimientos estandarizados presentaron menores tasas de errores operacionales. Este resultado coincide con Calderón et al. (2023), quienes destacan que la correcta comunicación de peligros químicos reduce significativamente los errores humanos en operaciones industriales complejas.

De forma complementaria, la investigación evidenció que los análisis HAZOP y los sistemas de evaluación preventiva permitieron disminuir incidentes en instalaciones que mantenían actualizados sus diagnósticos de peligros. Este comportamiento guarda relación con Díaz et al. (2023), quienes plantean que la integración entre seguridad laboral, control ambiental y herramientas diagnósticas fortalece los sistemas preventivos industriales.

Asimismo, Sanabria et al. (2023) advierten que los contaminantes emergentes y los nuevos riesgos industriales obligan a las organizaciones a modernizar permanentemente sus sistemas

de protección. Este planteamiento se vincula directamente con los hallazgos de esta investigación, debido a que las plantas con menor actualización tecnológica registraron mayores vulnerabilidades operacionales.

En términos generales, la discusión permite afirmar que la seguridad funcional en la industria química no depende exclusivamente de la instalación de tecnología avanzada, sino de una articulación integral entre mantenimiento, capacitación, cumplimiento normativo, actualización tecnológica y análisis permanente de riesgos. La evidencia obtenida demuestra que las organizaciones que gestionan de manera integral estos componentes presentan menores probabilidades de accidentes mayores y mayor capacidad de resiliencia operativa frente a escenarios de alta criticidad industrial.

Conclusiones

En primer término, la investigación evidenció que la implementación integral de sistemas instrumentados de seguridad representa el factor de mayor incidencia en la reducción de incidentes críticos dentro de la industria química. Los resultados estadísticos reflejaron una relación negativa alta entre el nivel de implementación de los SIS y la frecuencia de fallas operacionales, confirmando que las plantas con mayores niveles de automatización segura, monitoreo continuo y cumplimiento técnico registraron menores eventos de fuga, sobrepresión y pérdida de contención.

De manera complementaria, se verificó que el mantenimiento preventivo, la capacitación técnica del personal y el cumplimiento de estándares internacionales fortalecen significativamente la confiabilidad operativa de los procesos químicos. Las organizaciones que desarrollaron pruebas funcionales periódicas, programas permanentes de formación especializada y controles documentados mostraron una reducción sostenida de incidentes críticos, demostrando que la tecnología requiere respaldo constante mediante gestión técnica y supervisión especializada.

Finalmente, se determinó que la antigüedad tecnológica incrementa considerablemente el riesgo operacional en instalaciones químicas de alta complejidad. Los sistemas obsoletos presentaron mayores vulnerabilidades relacionadas con tiempos de respuesta limitados, fallas

de diagnóstico y menor capacidad de control automatizado. En consecuencia, la modernización de infraestructuras críticas y la gestión integral del riesgo se consolidan como acciones prioritarias para fortalecer la seguridad funcional, proteger al talento humano, preservar el entorno ambiental y garantizar la continuidad operativa del sector químico.

Referencias bibliográficas

Acosta, D., Castro, L., & Moreno, C. (2021). Pirólisis rápida para producir biocombustibles con residuos sólidos urbanos. *Gestión y Ambiente*, 24(2), 1–14.

Ávila, C., Rivera, D., & Ceballos, O. (2022). Medición del desempeño del sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo. *Revista CEA*, 8(17), 1–20.

Bolaños, E., Rodríguez, A., & López, M. (2021). Gestión de seguridad y salud en el trabajo bajo la norma ISO 45001. *Revista Científica Multidisciplinaria*, 5(2), 45–61.

Calderón, V., Bedoya, M., & Cárdenas, L. (2023). Implementación del Sistema Globalmente Armonizado para la clasificación de sustancias químicas. *Revista Científica*, 7(1), 35–49.

Díaz, M., Pérez, R., & Gómez, A. (2023). Herramienta integrada para diagnóstico de impactos ambientales y laborales. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 13(2), 145–162.

Dyna. (2021). Inhibidores verdes para controlar la corrosión en metales: revisión y casos de estudio. *DYNA*, 88(218), 1–12.

Enríquez, R. (2023). Aplicación de HAZOP en procesos críticos de servicios petroleros. *Revista de Ingeniería y Seguridad Industrial*, 12(1), 55–70.

Fernández de la Calle, A., Camacho, R., & Gasco, L. (2021). Sistemas instrumentados de seguridad y análisis SIL en procesos industriales. *Editorial Díaz de Santos*.

García, L., & Téllez, M. (2022). Automatización avanzada y riesgos operacionales en la industria química. *Revista Tecnología y Producción*, 14(3), 77–91.

González, L., Enríquez, R., & Torres, J. (2022). Sistemas de gestión de calidad e inocuidad bajo ISO 22000. *Información Tecnológica*, 33(3), 23–34.

IEC. (2021). *IEC 61511: Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector*. International Electrotechnical Commission.

ILO. (2022). *Safety and health at work in chemical industries*. International Labour Organization.

INSST. (2023). *Riesgos químicos y control de exposición en la industria*. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo.

ISO. (2022). *ISO 45001: Occupational health and safety management systems*. International Organization for Standardization.

Martínez, M., Rodríguez, G., & García, P. (2022). Medición cuantitativa de la protección del trabajador en prevención de riesgos laborales. *Revista de Ciencias Sociales*, 28(4), 112–126.

Merino, M., Moncayo, J., & Hidalgo, P. (2022). Gestión de seguridad y salud en el trabajo en empresas ecuatorianas. *Economía y Negocios*, 13(1), 118–132.

Molina, J., Romero, E., & Salazar, D. (2023). Factores de riesgos laborales en procesos industriales químicos. *Revista Científica de Salud y Ambiente*, 6(2), 77–92.

Montero, J. (2021). Seguridad funcional en procesos industriales de alto riesgo. *Revista de Ingeniería y Seguridad Industrial*, 9(2), 15–29.

OPCW. (2021). *Chemical safety and security guidance*. Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons.

OSHA. (2022). *Process Safety Management (PSM) guidelines for chemical industries*. Occupational Safety and Health Administration.

Pérez, A., & Ramírez, V. (2023). Inteligencia artificial aplicada a la prevención de fallos industriales. *Revista Iberoamericana de Innovación Tecnológica*, 17(2), 66–84.

Reyes, M., & Macías, H. (2022). Fallas operacionales en plantas químicas latinoamericanas. *Revista de Gestión del Riesgo Industrial*, 8(1), 33–49.

Rodríguez, P., & Morales, S. (2022). Sostenibilidad operativa y seguridad industrial en procesos químicos. *Revista Latinoamericana de Gestión Industrial*, 19(3), 88–104.

Román, R., Salinas, V., & Mendoza, K. (2024). Internet de las cosas e industria 4.0 en sistemas industriales. *Revista Tecnológica*, 18(1), 55–70.

Sanabria, H., Martínez, A., & Ríos, F. (2023). Contaminantes emergentes en el entorno industrial. *Revista Científica Ambiental*, 12(3), 88–104.

Uribe, S., Castaño, M., & Restrepo, L. (2022). Gestión de riesgos en cadenas de suministro industriales. *Revista Venezolana de Gerencia*, 27(99), 1041–1058.

Vázquez, C., Hernández, B., & Morales, J. (2023). Capacitación y seguridad ocupacional en industria. *Revista de Investigación Académica*, 9(2), 65–81.