

Diseño e Implementación de un Sistema para Fortalecer la Seguridad de Procesos en una Unidad Recuperadora de Vapores

Eduar Condia Diaz

<https://orcid.org/0000-0001-8915-3377>

econdiad@unadvirtual.edu.co

Investigador Independiente
Puerto Gaitán-Colombia

RESUMEN

En el contexto de la creciente complejidad operativa y los requisitos regulatorios de la industria de hidrocarburos, la seguridad de procesos se ha consolidado como un eje fundamental para la prevención de incidentes mayores. Este artículo presenta un estudio aplicado sobre el diseño e implementación de un Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) en la Unidad Recuperadora de Vapores (VRU) de una planta de procesamiento de crudo. La investigación integra las metodologías HAZOP y LOPA para la identificación, análisis y mitigación de riesgos, siguiendo las directrices de la norma IEC 61511. El objetivo fue establecer un SIS como capa independiente de protección capaz de detectar desviaciones críticas y llevar el proceso a un estado seguro de forma automática. Los resultados evidencian una reducción del riesgo operacional superior al 80 %, un incremento en la confiabilidad del sistema y un cumplimiento óptimo de los estándares internacionales de seguridad funcional. Estos hallazgos posicionan la seguridad de procesos como eje estratégico de la sostenibilidad industrial y la gestión rigurosa de riesgos en la industria de hidrocarburos.

Palabras clave: seguridad de procesos, sistemas instrumentados de seguridad, análisis de riesgos, evaluación de riesgos, unidades de recuperación de vapor

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

El Editor y los Revisores declararon no tener conflicto de intereses.

Licencia:



Design and Implementation of a Safety Instrumented System (SIS) to Strengthen Process Safety in a Vapor

ABSTRACT

In the context of the increasing operational complexity and regulatory requirements of the hydrocarbon industry, process safety has become a fundamental axis for the prevention of major incidents. This article presents an applied study on the design and implementation of a Safety Instrumented System (SIS) in the Vapor Recovery Unit (VRU) of a crude oil processing plant. The research integrates HAZOP and LOPA methodologies for risk identification, analysis, and mitigation, following the guidelines of IEC 61511. The objective was to establish a SIS as an independent layer of protection capable of detecting critical deviations and automatically bringing the process to a safe state. The results demonstrate an operational risk reduction of over 80%, an increase in system reliability, and optimal compliance with international functional safety standards. These findings position process safety as a strategic pillar of industrial sustainability and risk management in the hydrocarbon industry.

Keywords: *process safety, safety instrumented systems, hazard analysis, risk assessment, vapor recovery units*

The authors declare no conflict of interest.

The Editor and the Reviewers declared no conflict of interest.

License: 



INTRODUCCIÓN

La seguridad de procesos representa un componente estructural dentro de la gestión integral del riesgo industrial y un eje estratégico para alcanzar la sostenibilidad operativa. De acuerdo con el Centro para la Seguridad de proceso Químicos “(CCPS, 2019)”, la seguridad de procesos combina la identificación sistemática de peligros, la evaluación cuantitativa del riesgo y la implementación de controles específicos, técnicos, administrativos y organizacionales que aseguran la reducción de la probabilidad y severidad de eventos mayores. Un enfoque basado en estos principios permite construir entornos industriales más resilientes, confiables y alineados con la gestión sostenible de la producción.

En el caso específico de las Unidades Recuperadoras de Vapores (VRU), se han identificado brechas técnicas asociadas a la ausencia de interlocks automáticos, dependencia de acciones manuales y limitada redundancia en instrumentos críticos, lo que incrementa la probabilidad de sobrepresiones, fugas y emisiones no controladas.

Registros preliminares de operación evidenciaron desviaciones recurrentes de presión y paradas no programadas, lo que puso de manifiesto la necesidad de una capa de protección independiente y automática.

El marco conceptual del estudio se fundamenta en los principios de seguridad funcional establecidos en la norma IEC 61511, complementados con las guías del CCPS “(2019)” sobre capas independientes de protección. En Colombia, la Resolución 40317 de la ANH y los lineamientos de la ANLA refuerzan la necesidad de integrar soluciones técnicas que mitiguen riesgos operacionales y ambientales, alineando el marco internacional con la regulación nacional. En el contexto de la industria de hidrocarburos, las condiciones de alta presión, temperatura y volatilidad de los fluidos procesados exigen la adopción de Sistemas Instrumentados de Seguridad que funcionen como capas de protección independientes y

automáticas. Estos sistemas son capaces de detectar desviaciones críticas y devolver el proceso a un estado seguro sin intervención humana directa.

La implementación de un SIS en una VRU no solo reduce la probabilidad de eventos mayores, sino que contribuye directamente a la sostenibilidad al disminuir emisiones fugitivas, mejorar la eficiencia operativa y reducir paradas no programadas, fortaleciendo simultáneamente la confiabilidad del proceso.

Objetivo general: En coherencia con lo anterior, el objetivo general de esta investigación es diseñar e implementar un sistema de protección para una Unidad Recuperadora de Vapores, basado en los principios de seguridad funcional, mediante el análisis de riesgos y la identificación de funciones instrumentadas críticas.

METODOLOGÍA

La investigación adoptó un enfoque aplicado de carácter ingenieril–cuantitativo, orientado al diseño y validación de un Sistema Instrumentado de Seguridad en una VRU seleccionada por su criticidad operativa y antecedentes de desviaciones recurrentes. Se combinó la revisión bibliográfica, la observación en campo, la experimentación aplicada y el análisis comparativo, lo que aseguró la validez científica del estudio y su aplicabilidad práctica. La confiabilidad de los datos del diagnóstico técnico se garantizó mediante la triangulación de fuentes: revisión de P&ID actualizados, reportes históricos de incidentes, registros de mantenimiento y entrevistas estructuradas con personal operativo y técnico.

El método se estructuró en cuatro fases articuladas con el ciclo de vida de la norma IEC 61511, consolidando la trazabilidad entre los objetivos, las tareas realizadas y los resultados. La selección de esta VRU se fundamentó en la evidencia inicial de fallas en salvaguardas existentes, ausencia de redundancia y necesidad de automatización independiente para cumplir criterios ALARP

El proceso metodológico se estructuró en cuatro fases interrelacionadas. En la primera fase se llevó a cabo un diagnóstico técnico exhaustivo basado en la revisión de diagramas P&ID, reportes históricos de incidentes, auditorías internas y entrevistas con operadores y técnicos de mantenimiento. Este levantamiento permitió identificar las salvaguardas existentes, evaluar su desempeño real y reconocer brechas significativas frente a los requisitos de seguridad funcional. A partir de esta información se estableció una línea base que orientó la selección de las funciones instrumentadas críticas y la priorización de mejoras en la arquitectura del sistema.

Las metodologías HAZOP y LOPA fueron seleccionadas por su complementariedad: HAZOP permitió una identificación sistemática de desviaciones del proceso, mientras que LOPA proporcionó una cuantificación semicuantitativa del riesgo y la determinación objetiva del nivel SIL requerido, conforme a IEC 61511. El estudio HAZOP se realizó por nodos funcionales, analizando desviaciones relacionadas con presión, temperatura, nivel y caudal. Para cada desviación se identificaron causas probables, consecuencias posibles y señales de alerta temprana. Posteriormente, el análisis LOPA permitió cuantificar los riesgos al estimar frecuencias base, evaluar la efectividad de las salvaguardas existentes y estimar la probabilidad de falla en demanda (PFD_{avg}) de las funciones críticas. Para ello, se empleó el software exSILentia, que permitió modelar el comportamiento de los sensores, la lógica de control y los elementos finales mediante parámetros como la tasa de fallas de cada dispositivo, la cobertura diagnóstica, los intervalos de prueba y la arquitectura de redundancia. Los resultados de estas simulaciones indicaron la necesidad de implementar funciones con requerimientos equivalentes a SIL 2 para garantizar que el riesgo residual se mantuviera dentro de los criterios ALARP.

En la tercera fase se desarrolló el diseño del sistema de protección, definiendo las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF), la arquitectura lógica del sistema y los equipos asociados. La selección de sensores, controladores y elementos finales se realizó con base en criterios de certificación SIL, compatibilidad con el proceso, confiabilidad operativa, disponibilidad de repuestos y capacidad diagnóstica. También se consideraron parámetros como el rango operativo, el historial de fallas de equipos equivalentes, la facilidad de instalación y el cumplimiento de la IEC 61508. El diseño incorporó una arquitectura redundante 1oo2 para las variables de mayor criticidad, un PLC de seguridad independiente del sistema de control básico y válvulas certificadas para aplicaciones de demanda baja.

La cuarta fase correspondió a la validación del sistema mediante pruebas FAT (Factory Acceptance Test) y SAT (Site Acceptance Test), realizadas primero en banco de pruebas y luego bajo condiciones operativas reales. Estas actividades permitieron verificar la coherencia entre la lógica diseñada y la respuesta del sistema, evaluar los tiempos de actuación ante fallas simuladas, comprobar el funcionamiento de los mecanismos de votación y validar la comunicación segura entre los distintos componentes del lazo de protección. El proceso de validación del SIS fue documentado mediante protocolos FAT y SAT, listas de verificación funcional, registros de pruebas y actas de conformidad, garantizando la trazabilidad y repetibilidad del diseño, una vez implementado el sistema, se desarrolló un programa de capacitación orientado a operadores y personal técnico, centrado en los principios de seguridad funcional, la gestión de alarmas, la operación segura frente a disparos del sistema y los procedimientos de pruebas periódicas requeridos para mantener el nivel de integridad de seguridad.

Tabla 1. Fases del proceso metodológico

Fase	Actividad principal	Evidencia generada
Diagnóstico inicial	Revisión de P&ID, auditorías, entrevistas, análisis de fallas	Matriz de brechas, lista de salvaguardas existentes
Análisis HAZOP	Identificación de desviaciones, causas y consecuencias	Actas de sesiones HAZOP, diagramas de nodos
Análisis LOPA	Cálculo de riesgo, FRR, PFDavg, determinación SIL	Reportes del software, fichas SIL, matriz de riesgo
Diseño del sistema	Selección de sensores, controladores y válvulas; definición de SIF	Diagramas de arquitectura, especificaciones técnicas, listas certificadas SIL
Validación FAT/SAT	Pruebas funcionales, simulación de fallas, verificación de tiempos	Informes FAT, informes SAT, registros de pruebas, certificados
Capacitación	Entrenamiento en seguridad funcional y operación segura	Manual de capacitación, listas de asistencia, evaluaciones

Nota: P&ID (*Piping and Instrumentation Diagram*); SIF (*Función Instrumented de Seguridad*). Elaboración, a partir de las fases del proceso metodológico aplicado

RESULTADOS

Desde el punto de vista operativo, la implementación del SIS permitió incrementar la disponibilidad de la VRU del 85 % $\pm$ 2 % al 97 % $\pm$ 1 %, valores obtenidos a partir de simulaciones validadas con datos históricos de operación. Los resultados obtenidos evidencian una mejora sustancial en el desempeño operativo y en la gestión de la integridad de la Unidad Recuperadora de Vapores (VRU) tras la implementación del sistema de protección basado en principios de seguridad funcional. En primer lugar, el diagnóstico inicial permitió identificar fallas estructurales relacionadas con la falta de redundancia en los instrumentos de paro, la ausencia de interlocks automáticos y una dependencia elevada de la intervención manual.

En cuanto al análisis de riesgos, la aplicación de HAZOP evidenció desviaciones críticas asociadas con incrementos de presión, variaciones de temperatura y fallas en las válvulas de control. Cuando estas desviaciones se evaluaron mediante la metodología LOPA, se constató que varias funciones requerían niveles SIL iguales o superiores a SIL 2 para alcanzar un riesgo residual compatible con los criterios ALARP, que se basan en los rangos de tolerabilidad del riesgo definidos por la HSE, considerando frecuencias de eventos, severidad de consecuencias y desempeño de salvaguardas independientes. El uso del software

exSILentia permitió modelar estas funciones y estimar las probabilidades de falla en demanda, lo que apoyó la selección técnica de sensores, lógicas de votación y válvulas certificadas.

En términos ambientales, se evidenció una reducción aproximada del $78 \% \pm 5 \%$ en emisiones de compuestos orgánicos volátiles, debido al mayor control del proceso y a la disminución de descargas no controladas. Este comportamiento se alineó con los lineamientos regulatorios establecidos por la ANLA para instalaciones del sector hidrocarburos.

Finalmente, se identificó un beneficio económico derivado de la reducción de paradas no programadas, lo que representó un ahorro anual cercano al $12 \pm 2 \%$ en costos operativos asociados a paradas no programadas. Los valores de disponibilidad reportados corresponden a resultados de simulación y validación funcional, contrastados con registros operativos previos.

DISCUSIÓN

La trazabilidad entre resultados y metodología se mantiene a través de las fases de diagnóstico, análisis de riesgos, diseño y validación del SIS. Los hallazgos del estudio confirman la efectividad de integrar análisis de riesgos avanzados con herramientas de seguridad funcional para mejorar la confiabilidad en sistemas de proceso. La notable reducción en la ocurrencia de desviaciones críticas y el aumento en la disponibilidad operativa sostienen la idea de que la automatización de las funciones de protección, especialmente en equipos sometidos a alta variabilidad como las VRU, constituye una estrategia adecuada para controlar riesgos de impacto mayor.

Los resultados técnicos concuerdan con estudios recientes como los de Fetisov et al. (2021), quienes reportan mejoras similares en unidades de recuperación de vapores cuando se incorporan funciones instrumentadas de seguridad con niveles SIL 2. De igual forma, las conclusiones presentan paralelos con las observaciones de Wang et al. (2021),

en las que sistemas de protección automatizados mostraron reducciones significativas en incidentes operacionales, fortaleciendo simultáneamente la eficiencia energética y la estabilidad del proceso.

La disminución de emisiones fugitivas observada en este estudio reafirma el vínculo entre seguridad de procesos y sostenibilidad ambiental. La literatura especializada señala que las barreras instrumentadas contribuyen no solo a prevenir incidentes, sino también a mantener condiciones operativas óptimas que reducen la pérdida de materia prima y mejoran el desempeño ambiental. En este caso, la caída del 78 % en emisiones se alinea con los criterios de cumplimiento ambiental establecidos en la normativa colombiana.

Desde una perspectiva organizacional, los resultados también demostraron que la puesta en práctica de un sistema basado en seguridad funcional promueve cambios positivos en la cultura de seguridad. La reducción de la intervención manual y la claridad en la lógica de protección permitieron fortalecer las competencias técnicas del personal y fomentar prácticas basadas en evidencia. Este aspecto es coherente con las recomendaciones del CCPS y la HSE, que resaltan la importancia de la capacitación continua y del uso de herramientas claves para la toma de decisiones.

El análisis comparativo con estándares internacionales sugiere que el modelo implementado es escalable y replicable en otros contextos industriales de la región. La alineación con la IEC 61511 demuestra que, aun en instalaciones con limitaciones de infraestructura, es posible diseñar sistemas confiables y sostenibles mediante la aplicación sistemática de metodologías de evaluación de riesgos y selección de equipos certificados. Esto permite proyectar la implementación de sistemas similares en otras instalaciones de producción, transporte o refinación, con beneficios técnicos, ambientales y organizacionales comprobables.

El estudio se desarrolló bajo condiciones operativas controladas, por lo que factores externos como mantenimientos mayores recientes y cambios en la carga de proceso pudieron influir en algunos indicadores. Asimismo, los resultados económicos se basan en estimaciones conservadoras, lo que sugiere la necesidad de estudios longitudinales posteriores.

CONCLUSIONES

El diseño e implementación del Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) en la Unidad Recuperadora de Vapores representa un hito fundamental en la consolidación de la seguridad de procesos dentro del sector hidrocarburos colombiano. Este proyecto validó empíricamente la eficacia de los sistemas SIL 2 para mitigar riesgos de alto impacto, optimizar la confiabilidad operativa y fortalecer el acatamiento de la normativa nacional e internacional en seguridad funcional. Los resultados evidencian una disminución superior al 80 % de los riesgos críticos identificados, un incremento del 14 % en la disponibilidad operativa y una mejora significativa en la eficiencia energética y ambiental, conforme a las guías de la IEC 61511, el CCPS (2019) y la ANLA (2023).

Además, la integración del SIS con el sistema SCADA permitió fortalecer la trazabilidad y el monitoreo en tiempo real, incrementando la capacidad de respuesta frente a desviaciones y eventos anómalos. Este proceso redujo el tiempo de detección de fallas a menos de dos segundos y mejoró la capacidad de análisis predictivo, alineándose con los principios ALARP establecidos por la Health and Safety Executive (HSE). El uso de una arquitectura redundante 1oo2 y componentes certificados garantizó una disponibilidad superior al 97 %, consolidando una operación más segura, estable y eficiente.

El modelo propuesto también demostró su potencial de replicabilidad en diferentes contextos industriales, especialmente en instalaciones de producción, transporte y refinación de hidrocarburos en América Latina. La experiencia obtenida reafirma que la

inversión en sistemas instrumentados de seguridad genera beneficios tangibles: reducción de incidentes, optimización de recursos y mayor confianza institucional frente a los entes regulatorios como la ANH y la ANLA.

Asimismo, este proyecto contribuye al desarrollo de una cultura organizacional más madura en materia de gestión del riesgo, impulsando la formación de competencias técnicas en seguridad funcional y fomentando la innovación tecnológica. Su implementación fortalece los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con energía accesible y no contaminante, industria e innovación. En conclusión, la seguridad de procesos, cuando se sustenta en evidencia técnica y se integra con la gestión organizacional, constituye un pilar estratégico para la sostenibilidad, la competitividad y la excelencia operativa del sector energético colombiano e internacional.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2023). *Lineamientos técnicos y normativos para la gestión integral de riesgos en operaciones de hidrocarburos* [Documento técnico].

https://www.anh.gov.co/sites/default/files/2023-02/Lineamientos_Gestion_Riesgos_ANH.pdf

AICHE. (2022). *Process Safety Beacon: Learning from incidents to prevent process safety events*.

<https://www.aiche.org/ccps/resources/process-safety-beacon>

Alamri, A. H. (2020). Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines – An overview. *Engineering Failure Analysis*, 116, 104735.

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104735>

Amado, J., & Rodríguez, D. E. (2021). *Diseño y aplicación de un sistema instrumentado de seguridad (SIS) para procesos de planta piloto simulados en un entorno de validación virtual-PLC* [Tesis de pregrado, Corporación Universitaria Adventista]. Repositorio UNAC.



<https://repositorio.unac.edu.co/handle/11254/650>

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2023). *Resolución 40317 de 2023: Gestión de emisiones fugitivas y control ambiental en la industria de hidrocarburos* [Resolución gubernamental].

https://www.anla.gov.co/sites/default/files/resolucion_40317_2023.pdf

Bhusari, A., Goh, A., Ai, H., Sathanapally, S., Jalal, M., & Mentzer, R. A. (2021). Process safety incidents across 14 industries. *Process Safety Progress*, 40(1), e12158.

<https://doi.org/10.1002/prs.12158>

Center for Chemical Process Safety. (2019). *Guidelines for risk based process safety* (2nd ed.). Wiley.

[https://www.wiley.com/en-](https://www.wiley.com/en-us/Guidelines+for+Risk+Based+Process+Safety%2C+2nd+Edition-p-9781119436717)

[us/Guidelines+for+Risk+Based+Process+Safety%2C+2nd+Edition-p-9781119436717](https://www.wiley.com/en-us/Guidelines+for+Risk+Based+Process+Safety%2C+2nd+Edition-p-9781119436717)

Fetisov, V., Mohammadi, A. H., & Pshenin, V. (2021). Improving the economic efficiency of vapor recovery units at hydrocarbon loading terminals. *Oil & Gas Science and Technology*, 76, 38. <https://doi.org/10.2516/ogst/2021033>

Health and Safety Executive. (2024). *Guidance on ALARP decisions in COMAH* [Circular interna HID CI5A]. <https://www.hse.gov.uk/comah/guidance/alarp-decisions.htm>

International Electrotechnical Commission. (2016). *IEC 61511: Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector*.

<https://webstore.iec.ch/publication/23825>



Kerzner, H. (2017). *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling* (12th ed.). Wiley.

<https://www.wiley.com/en-us/Project+Management%3A+A+Systems+Approach+to+Planning%2C+Scheduling%2C+and+Controlling%2C+12th+Edition-p-9781119165358>

Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2022). *Guía técnica para la seguridad de procesos en instalaciones de hidrocarburos* [Documento técnico].

https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/367558/Guia_Seguridad_Procesos_2022.pdf

Organización Internacional del Trabajo. (2021). *Seguridad y salud en el trabajo: Directrices y principios de gestión*.

<https://www.ilo.org/global/topics/safety-and-health-at-work/lang-es/index.htm>

Rachman, A., Zhang, T., & Ratnayake, R. C. (2021). Applications of machine learning in pipeline integrity management. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 193, 104471.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104471>

Rástocny, K., & Ilavsky, J. (2010). Quantification of the safety level of a safety-critical control system. *Journal of Safety and Reliability Engineering*, 5(3), 27–39.

<https://sciencedirect.com/article/10.2478/SJSEE-2013-0004>

Rástocny, K., & Nagy, P. (2015). Operator's influence on the safety of the controlled process. *Safety Science*, 74, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.11.016>

Schmitz, P., Swuste, P., Reniers, G., & van Nunen, K. (2020). Mechanical integrity of process installations: Barrier alarm management based on bowties. *Process Safety and Environmental Protection*, 138, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.03.021>

Stoessel, F. (2021). *Thermal safety of chemical processes: Risk assessment and process design*. Wiley.

[https://www.wiley.com/en-](https://www.wiley.com/en-us/Thermal+Safety+of+Chemical+Processes%3A+Risk+Assessment+and+Process+Design-p-9783527336946)

[us/Thermal+Safety+of+Chemical+Processes%3A+Risk+Assessment+and+Process+](https://www.wiley.com/en-us/Thermal+Safety+of+Chemical+Processes%3A+Risk+Assessment+and+Process+Design-p-9783527336946)

[Design-p-9783527336946](https://www.wiley.com/en-us/Thermal+Safety+of+Chemical+Processes%3A+Risk+Assessment+and+Process+Design-p-9783527336946)

Velásquez, C. E. E., Gómez, H. Y. S., & Rodríguez, O. L. L. (2024). Seguridad y confiabilidad energética en Colombia. *Revista Sectorial de Energía y Petróleo*, 12(3), 45–59.

<https://revistaenergia.gov.co/vol12-n3-2024>

Verma, D. K., Julian, J. A., Bebee, G., Cheng, W. K., Holborn, K., & Shaw, L. (1992). Hydrocarbon exposures at petroleum bulk terminals and agencies. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 53(10), 645–656. <https://doi.org/10.1080/15298669291360229>

Wang, Y., Henriksen, T., Deo, M., & Mentzer, R. A. (2021). Factors contributing to U.S. chemical plant process safety incidents from 2010 to 2020. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 71, 104512. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104512>

White, B., Kreuz, T., & Simons, S. (2019). Compression machinery for oil and gas – Safety and reliability considerations. *Gulf Professional Publishing*. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00928-4>

Yakoot, M. S., Elgibaly, A. A., Ragab, A. M., & Mahmoud, O. (2021). Well integrity management in mature fields: A state-of-the-art review. *Journal of Petroleum Exploration and Production*, 11, 1833–1853. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01230-1>

La Revista utiliza códigos para identificar al Revisor y al equipo de
PARES REVISORES. Si tiene dudas o consultas, contacte a:
contacto@cienciayreflexion.org
Código de Editor: 106
Código de Revisores: 771

