Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

Evaluación comparativa de la seguridad de procesos en plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos del Perú mediante estudios HAZOP, análisis de consecuencias y análisis de escenarios críticos

TESIS
Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico

AUTOR
Piero Alberto VARA BARRERA

ASESOR
Mg. Manuel Jesús LUNA HERNÁNDEZ

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Vara, P. (2026). *Evaluación comparativa de la seguridad de procesos en plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos del Perú mediante estudios HAZOP, análisis de consecuencias y análisis de escenarios críticos*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Piero Alberto Vara Barrera
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	74966376
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0005-4569-7707
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Manuel Jesús Luna Hernández
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06897800
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-7487-8543
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Mauricio Diego Jack Abugattas Arocena
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07938472
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	María Verónica Carranza Oropez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10727849
Datos de investigación	
Línea de investigación	No aplica.

Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Universidad Nacional Mayor de San Marcos País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Latitud: - 12.0621065 Longitud: -77.0365256 https://maps.app.goo.gl/G8k8iBHPJ5WMMSSv8
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Febrero 2026 - Junio 2026
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería química https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01 Ingeniería de procesos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA
Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "VI Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2026-I", bajo la Presidencia del **Mg. Mauricio Diego Jack Abugattas Arocena;** la **Dra. María Verónica Carranza Oropeza (Miembro)** y el **Mg. Manuel Jesús Luna Hernández (Asesor);** habiendo presentado para tal efecto la **TESIS,** titulada **"Evaluación comparativa de la seguridad de procesos en plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos del Perú mediante estudios HAZOP, análisis de consecuencias y análisis de escenarios críticos",** después de **SUSTENTADA Y APROBADA** la tesis elaborada por el bachiller en Ingeniería Química: **VARA BARRERA, PIERO ALBERTO;** para optar el **TÍTULO PROFESIONAL** de **INGENIERO QUÍMICO,** acordaron calificarlo con la **NOTA** de:

DIECISIETE 17

(LETRAS) (NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 20 de junio del 2026

Mg. MAURICIO DIEGO JACK ABUGATTAS AROCENA
Presidente

Dra. MARÍA VERÓNICA CARRANZA OROPEZA
Miembro

Mg. MANUEL JESÚS LUNA HERNÁNDEZ
Asesor

Dr. EDER CLIDIO VICUÑA GALINDO
Director de la E.P. de Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS • ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA • Facultad de Química e Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **Manuel Jesús Luna Hernández** en mi condición de asesor acreditado mediante Dictamen N°000008-2026-EPIQ-FQIQ/UNMSM de la tesis cuyo título es **Evaluación comparativa de la seguridad de procesos en plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos del Perú mediante estudios HAZOP, análisis de consecuencias y análisis de escenarios críticos**, presentado por el bachiller: **PIERO ALBERTO VARA BARRERA**, para optar el título Profesional de Ingeniero Químico.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 8% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título Profesional Ingeniero Químico.

Lima, 20 de julio de 2026

Firma del Asesor 

Nombres y Apellidos del asesor: Manuel Jesús Luna Hernández

DNI : 06897800

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

INDICE

RESUMEN 6
ABSTRACT 7
I. INTRODUCCIÓN 8
1.1 Introducción 8
1.2 Planteamiento del problema 8
1.2.1 Determinación del problema 8
1.2.2 Formulación del problema 9
1.3 Objetivos 10
1.3.1 Objetivo general 10
1.3.2 Objetivos específicos 10
1.4 Importancia y alcance de la investigación 10
1.5 Limitaciones 11
II. REVISIÓN DE LITERATURA 13
2.1 Antecedentes del estudio 13
2.1.1 Antecedentes nacionales 13
2.1.2 Antecedentes internacionales 14
2.2 Bases teóricas 15
2.2.1 Hidrocarburos líquidos y sus propiedades de riesgo 15
2.2.2 Almacenamiento de hidrocarburos líquidos: tipos de tanques y operaciones 17
2.2.3 Seguridad de procesos 20
2.2.4 Metodología HAZOP 22
2.2.5 Análisis de Árbol de Eventos (ETA) 23
2.2.6 Análisis de consecuencias 25
2.2.7 Estudio de Alcance de Consecuencias (EAC) 26
2.2.8 Incendios y explosiones en instalaciones de hidrocarburos 27
2.2.9 Capas de protección y salvaguardas 28
2.2.10 Software de modelamiento de consecuencias: PHAST y EFFECTS 29
2.2.11 Marco normativo y estándares técnicos aplicables 29
2.3 Definición de términos 31
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES 34
3.1 Hipótesis general 34
3.2 Hipótesis específicas 34
3.3 Variables 35
3.3.1 Variable independiente 35

3.3.2 Variables dependientes 35
3.4 Operacionalización de variables 36
IV. MATERIALES Y MÉTODOS 37
4.1 Área de estudio 37
4.2 Diseño de investigación 39
4.3 Población y muestra 40
4.4 Procedimiento metodológico 42
4.4.1 Procedimiento 42
4.4.2 Técnicas de recolección de datos 45
4.4.3 Instrumentos de recolección de datos 45
4.5 Análisis de datos 47
V. RESULTADOS 48
5.1 Caracterización de las plantas evaluadas 48
5.2 Resultados del análisis HAZOP 50
5.2.1 Escenarios críticos identificados mediante HAZOP 53
5.3 Resultados del análisis ETA 55
5.4 Resultados del análisis de consecuencias (EAC) 59
5.4.1 Análisis comparativo de los resultados obtenidos. 63
5.5 Comparación integral de la seguridad de procesos entre la Planta A y la Planta B 64
VI. DISCUSIÓN 66
6.1 Discusión de resultados 66
6.2 Contrastación de los hallazgos con la literatura. 67
6.2.1 Comparación de los resultados HAZOP con estudios previos. 67
6.2.2 Comparación de los resultados ETA con estudios previos 67
6.2.3 Comparación de los resultados EAC con estudios previos. 68
6.2.4 Comparación global entre ambas plantas. 68
6.3 Implicancias técnicas de la investigación 69
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 70
7.1 Conclusiones 70
7.2 Recomendaciones 71
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 74
IX ANEXOS 77

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades relevantes de hidrocarburos líquidos de uso frecuente. 17
Tabla 2. Principales tipos de tanques de almacenamiento de hidrocarburos líquidos. .. 19
Tabla 3. Diferencias entre seguridad ocupacional y seguridad de procesos. 21
Tabla 4. Ejemplo simplificado de aplicación HAZOP en línea de transferencia. 23
Tabla 5. Principales fenómenos evaluados en análisis de consecuencias. 26
Tabla 6. Principales normas y estándares aplicables. 31
Tabla 7. Matriz de operacionalización de variables. 36
Tabla 8. Comparación general de las plantas evaluadas. 39
Tabla 9. Documentación técnica analizada en la investigación. 44
Tabla 10. Características generales de las plantas evaluadas. 48
Tabla 11. Principales desviaciones identificadas mediante HAZOP. 51
Tabla 12. Principales escenarios críticos identificados mediante HAZOP. 53
Tabla 13. Comparación de resultados HAZOP entre las plantas evaluadas. 54
Tabla 14. Principales secuencias accidentales identificadas mediante ETA. 57
Tabla 15. Comparación de resultados ETA entre las plantas evaluadas. 58
Tabla 16. Principales escenarios modelados mediante EAC. 59
Tabla 17. Comparación de radios de afectación identificados en los escenarios evaluados. 60
Tabla 18. Comparación de resultados del Estudio de Alcance de Consecuencias. 63
Tabla 19. Comparación integral de los resultados obtenidos. 64

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Triángulo del fuego aplicado a vapores de hidrocarburos líquidos (combustible, oxígeno y fuente de ignición).. 17

Figura 2. Tanque vertical de techo fijo. Extraído de API 575 Inspection Practices for Atmospheric and Low/Pressure Storage Tanks, 2014. 19

Figura 3. Tanque vertical de techo flotante. Extraído de API 575. 20

Figura 4. Procedimiento metodológico de la investigación. 44

Figura 5. Esquema comparativo de las plantas evaluadas. 50

Figura 6. Ejemplo de escenario evaluado mediante metodología HAZOP. 52

Figura 7. Ejemplo simplificado de análisis ETA para fuga de hidrocarburo inflamable en la línea de transferencia. 56

Figura 8. Radios de afectación térmica en los tanques de mayor capacidad de almacenamiento de la Planta A (TK-18 y TK-20). Extraído del Estudio de Alcance de Consecuencias de la Planta A. 61

Figura 9. Radios de afectación térmica en tanques de almacenamiento de la Planta B.62

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo comparar el nivel de riesgo de procesos en dos instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos de diferente capacidad operativa mediante la aplicación de las metodologías Hazard and Operability Study (HAZOP), Event Tree Analysis (ETA) y Estudio de Alcance de Consecuencias (EAC), con la finalidad de proponer medidas orientadas al fortalecimiento de la seguridad de procesos. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicada, con diseño no experimental y nivel descriptivo-comparativo. La información fue obtenida a partir de estudios de riesgos, reportes HAZOP, análisis ETA y estudios de consecuencias correspondientes a una planta de gran capacidad (Planta A) y una planta de menor capacidad (Planta B). Los resultados permitieron identificar 221 escenarios HAZOP en la Planta A y 302 escenarios en la Planta B, evidenciándose desviaciones asociadas principalmente a fugas, derrames, sobrellenado, pérdida de contención y eventos con potencial de incendio o explosión. Asimismo, los análisis ETA y EAC permitieron identificar escenarios críticos asociados a incendios tipo Pool Fire, Flash Fire y explosiones de nube de vapor (VCE). La comparación realizada evidenció que la Planta A presenta una mayor complejidad operacional y un mayor potencial de severidad asociado a sus inventarios de hidrocarburos, mientras que la Planta B presenta una mayor susceptibilidad a escenarios relacionados con combustibles altamente volátiles, particularmente gasolina. Se concluye que la aplicación integrada de las metodologías HAZOP, ETA y EAC constituye una herramienta eficaz para la identificación de peligros, evaluación de riesgos y fortalecimiento de la seguridad de procesos en instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos.

Palabras clave: seguridad de procesos, HAZOP, ETA, análisis de consecuencias, hidrocarburos líquidos, gestión del riesgo.

ABSTRACT

The objective of this research was to compare the process risk levels of two liquid hydrocarbon storage facilities with different operational capacities through the application of Hazard and Operability Study (HAZOP), Event Tree Analysis (ETA), and Consequence Analysis Study (CAS) methodologies, with the purpose of proposing measures aimed at strengthening process safety. The research followed a quantitative approach, applied type, non-experimental design, and descriptive-comparative level. Information was obtained from risk studies, HAZOP reports, ETA analyses, and consequence assessment studies corresponding to a large-capacity facility (Plant A) and a smaller-capacity facility (Plant B). The results allowed the identification of 221 HAZOP scenarios in Plant A and 302 scenarios in Plant B, highlighting deviations mainly associated with leaks, spills, overfilling, loss of containment, and events with fire or explosion potential. Likewise, ETA and consequence analyses identified critical scenarios related to Pool Fire, Flash Fire, and Vapor Cloud Explosion (VCE) events. The comparison showed that Plant A presents greater operational complexity and a higher severity potential associated with its hydrocarbon inventories, whereas Plant B presents greater susceptibility to scenarios involving highly volatile fuels, particularly gasoline. It is concluded that the integrated application of HAZOP, ETA, and consequence analysis methodologies constitutes an effective tool for hazard identification, risk assessment, and process safety enhancement in liquid hydrocarbon storage facilities.

Keywords: process safety, HAZOP, ETA, consequence analysis, liquid hydrocarbons, risk management.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Las plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos cumplen un rol estratégico en la cadena de suministro energético del Perú, al permitir la recepción, almacenamiento y despacho de combustibles destinados a los sectores industrial, comercial y de transporte. Debido a la naturaleza inflamable de los productos manejados, estas instalaciones presentan riesgos inherentes asociados a incendios, explosiones, fugas y derrames.

La seguridad de procesos constituye una disciplina orientada a prevenir accidentes mayores derivados de la pérdida de contención de sustancias peligrosas, mediante la identificación de peligros, evaluación de riesgos e implementación de barreras de control. En este contexto, metodologías reconocidas internacionalmente como HAZOP (Hazard and Operability Study), ETA (Event Tree Analysis) y análisis de consecuencias resultan herramientas fundamentales para la gestión de riesgos en instalaciones de hidrocarburos.

En el Perú, las plantas de almacenamiento operan bajo exigencias regulatorias orientadas a garantizar condiciones seguras de operación. Sin embargo, existen diferencias entre instalaciones respecto a capacidad de almacenamiento, complejidad operativa, sistemas de protección y nivel de riesgo asociado.

La presente investigación propone evaluar y comparar la seguridad de procesos en dos plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos del Perú, mediante la aplicación integrada de las metodologías HAZOP, ETA y Estudio de Alcance de Consecuencias (EAC) y análisis de escenarios críticos, con la finalidad de identificar diferencias relevantes y formular recomendaciones técnicas orientadas a fortalecer la prevención de accidentes mayores.

1.2 Planteamiento del problema

1.2.1 Determinación del problema

Las plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos representan instalaciones críticas dentro de la cadena de suministro energético nacional, debido al manejo de sustancias inflamables y combustibles en grandes volúmenes. Durante sus operaciones de recepción, transferencia, almacenamiento y despacho pueden presentarse

desviaciones operativas tales como sobrellenado de tanques, fugas en tuberías, fallas de bombas, generación de atmósferas inflamables, incendios y explosiones.

En el Perú, estas instalaciones se encuentran sujetas al cumplimiento de disposiciones técnicas y regulatorias orientadas a garantizar condiciones seguras de operación. No obstante, la ocurrencia potencial de accidentes mayores evidencia la necesidad de fortalecer permanentemente la gestión de riesgos y la seguridad de procesos.

Si bien muchas plantas cuentan con estudios de riesgos que incorporan metodologías como HAZOP y análisis de consecuencias, no siempre se dispone de evaluaciones comparativas entre instalaciones de distinta capacidad y complejidad operativa. Esta situación limita la identificación de patrones de riesgo, oportunidades de mejora y criterios técnicos para priorizar medidas preventivas.

En consecuencia, surge la necesidad de analizar comparativamente la seguridad de procesos en plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos, considerando variables como capacidad instalada, escenarios críticos identificados, severidad de consecuencias y robustez de salvaguardas implementadas.

1.2.2 Formulación del problema

Problema general

¿ Cuáles son las diferencias en el nivel de riesgo de procesos entre dos plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos del Perú, evaluadas mediante las metodologías HAZOP, ETA y Estudio de Alcance de Consecuencias (EAC)?

Problemas específicos

- ¿Qué peligros y desviaciones operativas se identifican en los procesos de almacenamiento de hidrocarburos líquidos mediante la metodología HAZOP en las plantas evaluadas?
- ¿Cuáles son las principales causas, consecuencias y salvaguardas asociadas a las desviaciones identificadas mediante la metodología HAZOP?
- ¿Cuál es el nivel de severidad de los escenarios críticos identificados mediante el estudio HAZOP, evaluados a través de análisis de eventos y análisis de consecuencias?
- ¿Qué diferencias existen en el nivel de riesgo de procesos entre una planta de gran capacidad y una de menor capacidad de almacenamiento?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar y comparar la seguridad de procesos en dos plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos del Perú mediante la aplicación integrada de las metodologías HAZOP, ETA y Estudio de Alcance de Consecuencias (EAC), con la finalidad de identificar diferencias en el nivel de riesgo y proponer medidas orientadas al fortalecimiento de la seguridad de procesos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Comparar los peligros y desviaciones operativas identificadas mediante la metodología HAZOP en los procesos de almacenamiento y transferencia de hidrocarburos líquidos de la Planta A y la Planta B, como base para el análisis comparativo de la seguridad de procesos.
- Comparar las causas, consecuencias y salvaguardas asociadas a las desviaciones identificadas mediante la metodología HAZOP en ambas plantas, a fin de determinar diferencias en el comportamiento del riesgo de procesos.
- Evaluar comparativamente, mediante el análisis de árbol de eventos (ETA) y el Estudio de Alcance de Consecuencias (EAC), los escenarios críticos identificados previamente en los estudios HAZOP de ambas instalaciones.
- Comparar la seguridad de procesos entre una planta de mayor capacidad y una planta de menor capacidad, considerando capacidad de almacenamiento, complejidad operacional, tipo de combustible, severidad de consecuencias y efectividad de salvaguardas, con el propósito de proponer recomendaciones técnicas orientadas al fortalecimiento de la seguridad de procesos.

1.4 Importancia y alcance de la investigación

La presente investigación es importante debido a que las plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos constituyen instalaciones estratégicas para el abastecimiento energético del país y, al mismo tiempo, presentan riesgos inherentes asociados al manejo de sustancias inflamables y combustibles. La ocurrencia de eventos no deseados, tales como fugas, incendios, explosiones o derrames, puede generar consecuencias sobre las personas, el ambiente, la infraestructura y la continuidad operativa.

En ese contexto, la seguridad de procesos adquiere especial relevancia como disciplina orientada a prevenir accidentes mayores mediante la identificación de peligros, evaluación de riesgos y establecimiento de salvaguardas técnicas y administrativas. El uso de metodologías reconocidas internacionalmente, como HAZOP, análisis de eventos y análisis de consecuencias, permite una gestión más sistemática y objetiva de los riesgos presentes en este tipo de instalaciones.

La importancia académica de la investigación radica en que contribuirá al desarrollo de conocimiento aplicado en el campo de la Ingeniería Química y la seguridad industrial, integrando herramientas técnicas utilizadas en el sector hidrocarburos para el análisis comparativo de riesgos de procesos.

Asimismo, la importancia práctica reside en que los resultados permitirán identificar diferencias en el nivel de riesgo entre una planta de gran capacidad y una de menor capacidad, así como reconocer oportunidades de mejora en los sistemas de prevención, mitigación y respuesta ante emergencias.

En cuanto al alcance, la investigación se desarrollará mediante el análisis comparativo de dos plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos ubicadas en el Perú, empleando información técnica disponible de estudios de riesgos, reportes operativos y documentación relacionada. El estudio comprenderá la identificación de peligros operacionales, evaluación de escenarios críticos y comparación de variables asociadas a la seguridad de procesos.

Los resultados estarán orientados a formular recomendaciones técnicas aplicables a instalaciones similares, sin pretender generalizar de manera absoluta a todas las plantas del sector, debido a las particularidades de diseño, capacidad, ubicación y condiciones operativas de cada instalación.

1.5 Limitaciones

La presente investigación presenta determinadas limitaciones que deben ser consideradas durante el desarrollo e interpretación de los resultados obtenidos.

En primer lugar, el estudio se circunscribe al análisis comparativo de dos plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos, por lo que los resultados reflejarán las características particulares de las instalaciones seleccionadas y no podrán generalizarse de manera absoluta a la totalidad de plantas del sector hidrocarburos.

En segundo lugar, la disponibilidad de información técnica dependerá del acceso a estudios de riesgos, reportes operativos, documentación de procesos y registros internos proporcionados por las fuentes correspondientes. En algunos casos, determinada información podría encontrarse restringida por criterios de confidencialidad empresarial o normativa interna.

Asimismo, los resultados del análisis estarán condicionados a la calidad, actualidad y nivel de detalle de los documentos técnicos revisados. Si la información disponible presenta omisiones, diferencias de formato o criterios metodológicos distintos, ello podría influir en la comparación entre ambas instalaciones.

Otra limitación corresponde a la naturaleza dinámica del riesgo industrial, debido a que las condiciones operativas, capacidad de almacenamiento, modificaciones de equipos, mantenimiento de sistemas de protección y cambios normativos pueden variar en el tiempo, generando diferencias respecto a la situación evaluada durante la investigación.

Finalmente, el estudio se centrará en metodologías específicas de análisis de riesgos, tales como HAZOP, análisis de eventos y análisis de consecuencias, por lo que no se abordarán en profundidad otros enfoques complementarios de gestión de riesgos que también podrían resultar aplicables.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes del estudio

2.1.1 Antecedentes nacionales

Canoapaza Areche (2025), en una tesis desarrollada en la Universidad Nacional de Ingeniería, realizó el diseño de un sistema de protección contra incendios para mejorar la seguridad operativa en el almacenamiento de combustibles del Aeropuerto Internacional Jorge Chávez. El objetivo de la investigación fue optimizar las condiciones de seguridad frente a escenarios de incendio en instalaciones de almacenamiento de combustibles líquidos. La metodología empleada incluyó revisión documental, análisis de riesgos mediante metodologías HAZOP y EAC, así como la aplicación de matrices de riesgo de OSINERGMIN. Los resultados identificaron escenarios críticos asociados a incendios en tanques de almacenamiento de gran capacidad, concluyendo que la implementación de sistemas de protección contra incendios reduce significativamente el nivel de riesgo operativo. Este antecedente resulta relevante para la presente investigación debido a que emplea metodologías de análisis de riesgos aplicadas a instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos.

Enco Zamora (2024), en una tesis desarrollada en la Universidad Nacional del Callao, diseñó un sistema contra incendios orientado a reducir el riesgo en tanques de almacenamiento de combustible de la Planta de Abastecimiento Aeropuerto Jorge Chávez. El estudio consideró tanques API 650 con una capacidad total aproximada de 217 600 barriles, evaluando escenarios de incendio y proponiendo medidas de mitigación mediante sistemas de espuma, aspersores y monitores-hidrantes. La investigación concluyó que la implementación adecuada de salvaguardas permite disminuir la severidad de los escenarios críticos asociados al almacenamiento de combustibles. Este antecedente es importante para la presente investigación debido a que aborda riesgos asociados a tanques de almacenamiento y sistemas de protección en instalaciones de hidrocarburos líquidos.

García Lara (2022), en un informe profesional desarrollado en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, realizó el cálculo hidráulico y rediseño de un sistema de agua contra incendio para un terminal de almacenamiento de combustible Turbo A1 en el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez. La investigación evaluó las condiciones

operativas de tanques verticales destinados al almacenamiento y despacho de combustible de aviación, identificando requerimientos hidráulicos y condiciones de seguridad necesarias para responder ante escenarios de incendio. Los resultados evidenciaron la importancia de contar con sistemas adecuados de protección contra incendios en instalaciones de almacenamiento de combustibles. Este antecedente guarda relación con la presente investigación debido a su enfoque en seguridad de procesos y protección en terminales de hidrocarburos líquidos.

2.1.2 Antecedentes internacionales

Fuentes-Bargues et al. (2017), en una investigación desarrollada en el puerto de Valencia, realizaron un análisis de riesgos en un terminal de almacenamiento de combustibles mediante metodologías HAZOP y análisis de árbol de fallas. El objetivo del estudio fue identificar los principales riesgos operativos asociados a las actividades de almacenamiento y transferencia de combustibles líquidos. La metodología incluyó la identificación de nodos críticos, evaluación de desviaciones operativas y análisis de escenarios accidentales. Los resultados mostraron que las operaciones de carga y descarga representaban las áreas de mayor criticidad, siendo los derrames e incendios los eventos con mayor potencial de afectación. Este antecedente resulta relevante debido a que aplica metodologías similares a las utilizadas en la presente investigación para evaluar riesgos en terminales de hidrocarburos.

Enríquez (2023) desarrolló una investigación orientada a la aplicación de la metodología HAZOP para identificar riesgos de operabilidad en procesos críticos de empresas de servicios petroleros. El estudio tuvo como objetivo identificar desviaciones operativas y evaluar sus consecuencias dentro de sistemas industriales asociados al sector hidrocarburos. La metodología consistió en dividir el proceso en nodos de análisis y aplicar palabras guía para detectar desviaciones respecto a condiciones normales de operación. Los resultados evidenciaron la presencia de escenarios críticos asociados a fallas operativas y deficiencias de control, recomendando el fortalecimiento de salvaguardas y procedimientos operativos. Este antecedente aporta sustento metodológico a la presente investigación debido al uso del HAZOP como herramienta principal de análisis de riesgos.

Hernández Sánchez (2017), en una tesis desarrollada en el Instituto Politécnico Nacional, empleó la metodología de árbol de fallas como herramienta preventiva de accidentes en

plantas de almacenamiento de diésel. El objetivo de la investigación fue identificar causas potenciales de derrames, incendios y explosiones durante operaciones de carga, descarga y trasiego de combustibles. La metodología incluyó el análisis lógico de eventos iniciadores y la evaluación de posibles secuencias accidentales en instalaciones de almacenamiento. Los resultados permitieron identificar fallas críticas asociadas a errores operativos y deficiencias en sistemas de control. Este antecedente resulta importante para la presente investigación debido a que complementa el análisis de riesgos mediante herramientas lógicas aplicadas al almacenamiento de hidrocarburos líquidos.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Hidrocarburos líquidos y sus propiedades de riesgo

Los hidrocarburos líquidos son compuestos orgánicos derivados principalmente del petróleo crudo, ampliamente utilizados como combustibles y materias primas en los sectores industrial, comercial y de transporte. Entre los productos más representativos se encuentran las gasolinas, diésel, kerosene, turbo combustible, solventes y otros destilados del petróleo, los cuales poseen características fisicoquímicas particulares que condicionan su comportamiento durante el almacenamiento, manipulación y transporte.

En instalaciones industriales, especialmente en plantas de almacenamiento y abastecimiento, estos productos representan un riesgo potencial debido a su capacidad de inflamarse, evaporarse y formar mezclas peligrosas con el aire. En caso de pérdida de contención, pueden originarse incendios tipo pool fire, incendios por chorro, explosiones de vapores inflamables y derrames con afectación operativa y ambiental (Mannan, 2012).

De acuerdo con la National Fire Protection Association, los líquidos inflamables y combustibles se clasifican principalmente según su punto de inflamación, entendido como la temperatura mínima a la cual un líquido libera vapores suficientes para formar una mezcla inflamable con el aire en presencia de una fuente externa de ignición (NFPA, 2024).

Entre las propiedades más relevantes para la seguridad de procesos destaca precisamente el punto de inflamación, ya que valores bajos incrementan la facilidad con la que un producto puede incendiarse. Por ejemplo, la gasolina presenta un punto de inflamación considerablemente menor que el diésel, razón por la cual posee mayor riesgo de ignición bajo condiciones ambientales normales.

Otra propiedad importante es la temperatura de autoignición, definida como la temperatura mínima a la cual una sustancia puede encenderse espontáneamente sin requerir chispa o llama externa. Este parámetro resulta relevante en superficies calientes, equipos mecánicos y áreas donde existan fuentes térmicas no controladas (Crowl & Louvar, 2011).

Asimismo, la presión de vapor influye directamente en la volatilidad del producto. Sustancias con elevada presión de vapor tienden a evaporarse con mayor rapidez, generando concentraciones peligrosas de vapores inflamables ante fugas o derrames. En forma complementaria, los límites inferior y superior de inflamabilidad establecen el rango de concentración de vapor en aire dentro del cual la mezcla puede arder o explotar.

La densidad de vapor también constituye un factor crítico, debido a que muchos vapores de hidrocarburos son más pesados que el aire y tienden a desplazarse hacia zonas bajas, drenajes, fosas o espacios confinados, donde pueden acumularse e inflamarse al entrar en contacto con una fuente de ignición (CCPS, 2008).

El conocimiento de estas propiedades permite diseñar medidas de prevención y control tales como sistemas de ventilación, detección de gases, puesta a tierra, clasificación de áreas peligrosas, sistemas contra incendio, procedimientos operativos seguros y planes de respuesta ante emergencias. En consecuencia, el análisis de las propiedades de riesgo de los hidrocarburos líquidos constituye una base fundamental para la evaluación de la seguridad de procesos en instalaciones de almacenamiento.

Tabla 1. Propiedades relevantes de hidrocarburos líquidos de uso frecuente.

Producto	Punto de inflamación aproximado	Volatilidad	Riesgo predominante
Gasolina	< -40 °C	Alta	Incendio y explosión
Kerosene	38 a 72 °C	Media	Incendio
Diésel	> 52 °C	Baja a media	Incendio por calentamiento
Jet A-1	> 38 °C	Media	Incendio
Solventes ligeros	Variable	Alta	Vapores inflamables

Fuente: Elaboración propia con base en NFPA (2024), Crowl y Louvar (2011) y Mannan (2012).



Figura 1. Triángulo del fuego aplicado a vapores de hidrocarburos líquidos (combustible, oxígeno y fuente de ignición).

2.2.2 Almacenamiento de hidrocarburos líquidos: tipos de tanques y operaciones

El almacenamiento de hidrocarburos líquidos constituye una etapa fundamental dentro de la cadena logística de combustibles, ya que permite recibir, conservar temporalmente y despachar productos hacia estaciones de servicio, industrias, aeropuertos y otros consumidores finales. Estas actividades se desarrollan en plantas de abastecimiento, terminales y centros de distribución diseñados para operar bajo condiciones controladas de seguridad, eficiencia y continuidad operativa.

Las instalaciones de almacenamiento están conformadas por equipos y sistemas destinados al manejo seguro de productos inflamables, entre los que destacan tanques de almacenamiento, redes de tuberías, bombas de transferencia, cargaderos para unidades de transporte, sistemas eléctricos clasificados, instrumentación de control y sistemas contra incendio. El diseño y operación de estos componentes deben cumplir criterios técnicos establecidos en normas nacionales e internacionales (API, 2020).

Los tanques de almacenamiento representan el principal elemento de estas instalaciones y pueden clasificarse según su geometría, presión de operación y tipo de cubierta. Entre los más utilizados se encuentran los tanques verticales cilíndricos de techo fijo, empleados comúnmente para combustibles de menor volatilidad y productos con bajas pérdidas por evaporación. También destacan los tanques de techo flotante externo o interno, diseñados para reducir el espacio de vapor sobre el líquido, disminuir emisiones evaporativas y minimizar el riesgo de formación de mezclas inflamables (API, 2020).

Por otro lado, los tanques horizontales suelen emplearse para menores capacidades de almacenamiento o aplicaciones específicas, mientras que recipientes presurizados pueden utilizarse para productos de alta volatilidad o gases licuados, dependiendo de las características del producto almacenado.

Dentro de las principales operaciones realizadas en una planta de almacenamiento se encuentra la recepción del producto desde camiones cisterna, buques, vagones o ductos; la transferencia interna entre tanques; el almacenamiento temporal; el control de inventarios; la mezcla o recirculación cuando corresponde; y el despacho hacia unidades de distribución o usuarios finales.

Durante estas operaciones pueden presentarse desviaciones operativas tales como sobrellenado de tanques, fallas de bombas, fugas en válvulas o tuberías, errores de alineamiento, generación de electricidad estática, derrames e incendios. Por ello, las instalaciones deben contar con controles de ingeniería y administrativos orientados a prevenir pérdidas de contención y accidentes mayores.

Entre las principales medidas de seguridad aplicables destacan los sistemas automáticos de medición de nivel, alarmas de alto nivel, válvulas de alivio, diques de contención, detección de fugas, sistemas de espuma y agua contra incendio, conexión a tierra, procedimientos operativos, inspecciones periódicas y programas de mantenimiento preventivo (NFPA, 2024).

En consecuencia, el almacenamiento seguro de hidrocarburos líquidos depende tanto del diseño adecuado de los tanques como del control riguroso de las operaciones asociadas, aspectos que constituyen elementos esenciales dentro de la seguridad de procesos.

Tabla 2. Principales tipos de tanques de almacenamiento de hidrocarburos líquidos.

Tipo de tanque	Características principales	Aplicación común
Techo fijo	Cubierta permanente, diseño atmosférico	Diésel, kerosene
Techo flotante externo	Cubierta móvil sobre el líquido	Gasolinas, productos volátiles
Techo flotante interno	Techo fijo externo + flotante interno	Control de emisiones
Horizontal cilíndrico	Menor capacidad, instalación superficial o enterrada	Plantas pequeñas
Recipiente presurizado	Diseño para presión interna	GLP u otros productos volátiles

Fuente: Elaboración propia con base en API (2020) y NFPA (2024).



Figura 2. Tanque vertical de techo fijo. Extraído de API 575 Inspection Practices for Atmospheric and Low/Pressure Storage Tanks, 2014.

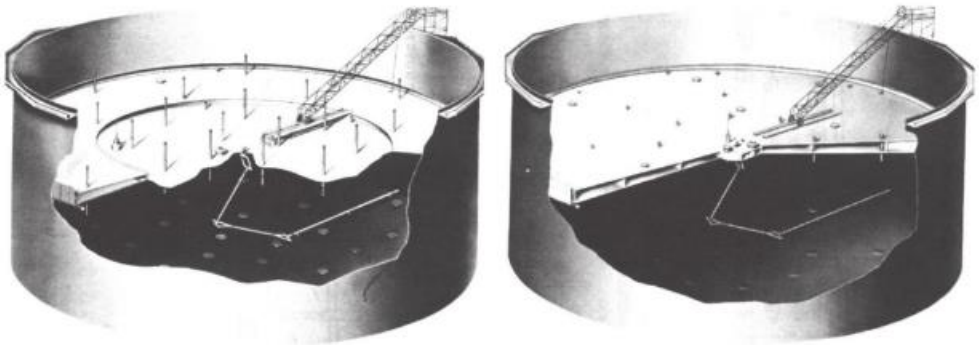


Figura 3. Tanque vertical de techo flotante. Extraído de API 575.

2.2.3 Seguridad de procesos

La seguridad de procesos es una disciplina especializada orientada a prevenir accidentes mayores relacionados con la pérdida de contención de sustancias peligrosas, liberación no controlada de energía o desviaciones críticas en sistemas industriales. Su finalidad principal es evitar eventos de baja frecuencia, pero de alta severidad, tales como incendios, explosiones, fugas tóxicas y fallas catastróficas de equipos, los cuales pueden generar consecuencias significativas sobre las personas, el ambiente, los activos y la continuidad operativa (CCPS, 2008).

A diferencia de la seguridad y salud ocupacional, que se enfoca principalmente en la prevención de accidentes personales como caídas, golpes o lesiones ergonómicas, la seguridad de procesos se centra en la integridad de las instalaciones, la confiabilidad de los sistemas y el control seguro de materiales peligrosos. Ambas disciplinas son complementarias, pero poseen objetivos y metodologías distintas.

En la industria de hidrocarburos líquidos, la seguridad de procesos adquiere especial importancia debido al almacenamiento y manipulación de sustancias inflamables en volúmenes significativos. Una falla en tanques, tuberías, bombas, válvulas, sistemas eléctricos o procedimientos operativos puede desencadenar eventos de gran magnitud si no existen barreras adecuadas de prevención y mitigación.

De acuerdo con el Center for Chemical Process Safety, una gestión efectiva de seguridad de procesos se sustenta en elementos tales como liderazgo organizacional, identificación de peligros, evaluación de riesgos, diseño seguro de instalaciones, integridad mecánica, gestión del cambio, procedimientos operativos, capacitación del personal, preparación para emergencias e investigación de incidentes (CCPS, 2008).

Uno de los principios fundamentales de la seguridad de procesos es la aplicación de barreras múltiples o capas de protección. Estas barreras pueden ser de naturaleza física, instrumental, humana u organizacional, y tienen como propósito prevenir la ocurrencia de eventos iniciadores o reducir sus consecuencias en caso de materializarse. Ejemplos de ello son sistemas de detección de gases, alarmas de nivel alto, válvulas de cierre de emergencia, diques de contención, sistemas contra incendio y planes de respuesta ante emergencias.

Asimismo, la seguridad de procesos promueve la identificación temprana de desviaciones operativas mediante metodologías sistemáticas como HAZOP, What If, FMEA, LOPA, ETA y análisis de consecuencias, herramientas que permiten reconocer vulnerabilidades antes de que ocurra un accidente mayor (Mannan, 2012).

Diversos accidentes industriales ocurridos a nivel mundial han evidenciado la necesidad de fortalecer esta disciplina. Eventos como explosiones en terminales de combustibles, incendios en tanques de almacenamiento y liberaciones masivas de sustancias peligrosas demuestran que la ausencia de controles adecuados puede generar impactos humanos, ambientales y económicos severos.

En ese contexto, la seguridad de procesos constituye el eje central para la operación segura de plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos. Por ello, su evaluación comparativa entre instalaciones resulta relevante para identificar brechas técnicas, priorizar mejoras y reducir la probabilidad de accidentes mayores.

Tabla 3. Diferencias entre seguridad ocupacional y seguridad de procesos.

Criterio	Seguridad ocupacional	Seguridad de procesos
Enfoque principal	Protección del trabajador	Integridad de instalaciones y procesos
Tipo de eventos	Frecuentes y menor severidad	Baja frecuencia y alta severidad
Ejemplos	Caídas, cortes, golpes	Incendios, explosiones, fugas mayores
Herramientas comunes	IPERC, ATS, capacitación	HAZOP, LOPA, ETA, QRA
Impacto potencial	Individual o local	Masivo y catastrófico

Fuente: Elaboración propia con base en CCPS (2008) y Mannan (2012).

2.2.4 Metodología HAZOP

La metodología HAZOP (Hazard and Operability Study) es una técnica estructurada y sistemática utilizada para identificar peligros potenciales y problemas de operabilidad en procesos industriales. Fue desarrollada originalmente por Imperial Chemical Industries (ICI) y actualmente es una de las herramientas más empleadas en la industria química, petrolera y energética para el análisis preventivo de riesgos (Mannan, 2012).

El HAZOP se basa en la revisión detallada del proceso por medio de un equipo multidisciplinario que analiza desviaciones respecto a las condiciones normales de operación. Para ello, el sistema se divide en nodos de estudio, los cuales corresponden a secciones específicas del proceso, tales como líneas de transferencia, bombas, tanques, válvulas o sistemas de carga y descarga.

Sobre cada nodo se evalúan variables operativas relevantes, entre ellas caudal, presión, temperatura, nivel, composición y sentido de flujo. Posteriormente, se aplican palabras guía como “No”, “Más”, “Menos”, “Parte de”, “Reversa” u “Otro que”, con la finalidad de generar desviaciones hipotéticas que permitan identificar fallas potenciales (Crowl & Louvar, 2011).

Por ejemplo, la combinación de la variable caudal con la palabra guía “No” genera la desviación “No flujo”, la cual podría estar asociada a una bomba averiada, válvula cerrada o bloqueo en la línea. A partir de ello, el equipo identifica causas probables, consecuencias posibles, salvaguardas existentes y recomendaciones técnicas.

Entre las principales ventajas del HAZOP destaca su capacidad para detectar escenarios que no siempre son evidentes en inspecciones convencionales, así como promover el análisis colectivo entre especialistas de distintas disciplinas. Asimismo, permite fortalecer el diseño del proceso, mejorar procedimientos operativos y reducir la probabilidad de incidentes mayores.

En instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos, el HAZOP resulta especialmente útil para evaluar riesgos asociados a sobrellenado de tanques, fallas en bombeo, errores de alineamiento de válvulas, sobrepresión en líneas, pérdida de contención y presencia de atmósferas inflamables.

No obstante, la calidad de los resultados depende de la experiencia del equipo evaluador, la disponibilidad de información técnica actualizada y la correcta definición de nodos y variables del proceso. Si estos elementos no se gestionan adecuadamente, el estudio puede presentar omisiones relevantes.

En la presente investigación, la metodología HAZOP constituye una herramienta central para identificar peligros y desviaciones operativas en las plantas de almacenamiento seleccionadas, sirviendo como base para el análisis comparativo de la seguridad de procesos.

Tabla 4. Ejemplo simplificado de aplicación HAZOP en línea de transferencia.

Nodo	Variable	Palabra guía	Desviación	Posible causa	Consecuencia	Salvaguarda
Línea de bombeo	Caudal	No	No flujo	Bomba fallada	Interrupción operativa	Bomba stand-by
Tanque receptor	Nivel	Más	Sobrellenado	Error operador	Derrame / incendio	Alarma alto nivel
Línea de descarga	Presión	Más	Sobrepresión	Válvula cerrada	Fuga / ruptura	PSV

Fuente: Elaboración propia con base en Crowl y Louvar (2011) y Mannan (2012).

2.2.5 Análisis de Árbol de Eventos (ETA)

El Análisis de Árbol de Eventos, conocido como ETA por sus siglas en inglés (Event Tree Analysis), es una metodología lógica e inductiva empleada para evaluar las posibles consecuencias derivadas de un evento iniciador en un sistema industrial. Su propósito principal consiste en representar, de manera secuencial, las diferentes trayectorias que puede seguir un incidente dependiendo del funcionamiento o falla de las barreras de protección existentes (CCPS, 2008).

A diferencia de otras herramientas orientadas principalmente a identificar causas, el ETA parte de un evento inicial ya definido, como una fuga de combustible, sobrellenado de tanque, falla de bomba, pérdida de energía eléctrica o ruptura de una línea de

transferencia, y analiza los distintos resultados posibles según la respuesta de los sistemas de seguridad.

La construcción del árbol de eventos se realiza mediante una secuencia de preguntas binarias, normalmente expresadas como “éxito” o “falla” de cada barrera de control. Entre estas barreras pueden considerarse sistemas de detección de fugas, alarmas de nivel alto, válvulas de cierre de emergencia, diques de contención, sistemas contra incendio, procedimientos operativos o intervención del personal capacitado.

Por ejemplo, ante una fuga de hidrocarburo líquido, el árbol de eventos puede analizar si el sistema de detección funciona correctamente, si se activa el cierre automático de válvulas, si existe fuente de ignición y si responde adecuadamente el sistema contra incendio. Dependiendo de la combinación de respuestas, el resultado final podría ser desde una fuga controlada sin mayores consecuencias hasta un incendio de gran magnitud.

Una de las principales ventajas del ETA es que permite visualizar la importancia relativa de cada barrera de protección dentro de la secuencia accidental, facilitando la priorización de mejoras técnicas y operativas. Asimismo, puede emplearse de forma cualitativa o cuantitativa cuando se dispone de datos de confiabilidad de los sistemas evaluados (Mannan, 2012).

En instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos, esta metodología resulta particularmente útil para analizar escenarios asociados a derrames, incendios en cubetos, incendios en bombas, pérdida de contención durante operaciones de carga y fallas en sistemas automáticos de seguridad.

No obstante, la utilidad del ETA depende de la adecuada definición del evento iniciador, la correcta selección de barreras relevantes y la disponibilidad de información técnica confiable. Una simplificación excesiva del sistema podría subestimar rutas accidentales importantes.

En la presente investigación, el análisis de árbol de eventos será utilizado como herramienta complementaria al HAZOP para evaluar los escenarios de mayor criticidad identificados en las plantas seleccionadas, permitiendo comparar la efectividad de sus barreras de prevención y mitigación.

2.2.6 Análisis de consecuencias

El análisis de consecuencias es una herramienta técnica utilizada para estimar los efectos físicos y el nivel de afectación que podrían generarse como resultado de un evento accidental en instalaciones industriales. Su finalidad principal es determinar la magnitud de los impactos potenciales sobre personas, infraestructura, medio ambiente y continuidad operativa, a partir de escenarios previamente identificados mediante metodologías de análisis de riesgos (Mannan, 2012).

En la industria de hidrocarburos líquidos, esta metodología resulta fundamental debido a la posibilidad de incendios, explosiones, derrames y liberaciones de vapores inflamables asociados a pérdidas de contención. A través del análisis de consecuencias es posible estimar distancias de afectación, niveles de radiación térmica, sobrepresión, dispersión de vapores y extensión de derrames, información clave para la toma de decisiones preventivas.

El análisis suele desarrollarse a partir de escenarios representativos tales como ruptura de tuberías, fuga en conexiones, sobrellenado de tanques, falla catastrófica de recipientes, incendio en cubetos o ignición de nubes de vapor. Cada escenario requiere considerar variables como tipo de producto, cantidad liberada, condiciones meteorológicas, presión de operación, geometría del sistema y presencia de barreras físicas.

Entre los principales fenómenos evaluados se encuentra la radiación térmica generada por incendios tipo pool fire o jet fire. La exposición a determinados niveles de radiación puede ocasionar daños a personas, afectación estructural o ignición secundaria de materiales cercanos. Asimismo, en eventos explosivos puede analizarse la sobrepresión generada, la cual puede provocar rotura de ventanas, colapso parcial de estructuras y lesiones humanas (Crowl & Louvar, 2011).

Otro aspecto relevante es la dispersión de vapores inflamables, especialmente en productos volátiles como gasolinas o solventes. Bajo determinadas condiciones atmosféricas, una nube de vapor puede desplazarse hacia fuentes de ignición alejadas del punto de fuga, originando incendios repentinos o explosiones.

Actualmente, el análisis de consecuencias puede realizarse mediante modelos matemáticos, software especializado y criterios establecidos en estándares internacionales. Los resultados suelen representarse mediante radios o áreas de afectación

para distintos niveles de severidad, facilitando la evaluación del riesgo y la planificación de respuestas de emergencia.

En plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos, esta herramienta permite verificar distancias seguras entre equipos, diseñar diques de contención, ubicar sistemas contra incendio, establecer zonas de seguridad y mejorar planes de contingencia.

En la presente investigación, el análisis de consecuencias será aplicado a los escenarios de mayor criticidad identificados mediante HAZOP y ETA, con el propósito de comparar la severidad potencial entre una planta de gran capacidad y otra de menor capacidad.

Tabla 5. Principales fenómenos evaluados en análisis de consecuencias.

Fenómeno accidental	Efecto principal	Variables relevantes
Pool fire	Radiación térmica	Área derramada, producto, clima
Jet fire	Llama direccional	Presión, diámetro fuga
Explosión de vapores	Sobrepresión	Masa inflamable, confinamiento
Dispersión de vapores	Nube inflamable	Viento, temperatura, volatilidad
Derrame líquido	Contaminación / incendio	Volumen, contención

Fuente: Elaboración propia con base en Mannan (2012) y Crowl y Louvar (2011).

2.2.7 Estudio de Alcance de Consecuencias (EAC)

El Estudio de Alcance de Consecuencias (EAC) es una metodología empleada para estimar los efectos físicos generados por eventos accidentales asociados a la liberación de sustancias peligrosas o inflamables en instalaciones industriales. Su finalidad es determinar las áreas de afectación potencial sobre personas, infraestructura, medio ambiente y continuidad operativa, considerando escenarios como incendios, explosiones, dispersión de vapores y derrames.

El análisis de consecuencias permite evaluar variables como radiación térmica, sobrepresión, dispersión de gases inflamables y extensión de derrames, utilizando modelos matemáticos y software especializado. Estas herramientas permiten estimar

distancias de afectación y severidad de los escenarios críticos identificados previamente mediante metodologías como HAZOP y ETA.

En instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos, el EAC constituye una herramienta fundamental para la gestión de la seguridad de procesos, debido a que facilita la identificación de zonas vulnerables, evaluación de escenarios accidentales y determinación de medidas de prevención y mitigación.

Dentro de los principales fenómenos evaluados en un EAC se encuentran los incendios tipo Pool Fire, Flash Fire, Jet Fire y las explosiones de nube de vapor (VCE), escenarios que pueden producir efectos significativos dependiendo del volumen liberado, tipo de producto almacenado, condiciones operativas y efectividad de las salvaguardas implementadas.

En la presente investigación, el EAC permite comparar la severidad de las consecuencias entre una planta de gran capacidad y una planta de menor capacidad de almacenamiento, considerando escenarios asociados a pérdida de contención, incendios y explosiones de hidrocarburos líquidos (Mannan, 2012; CCPS, 2010).

2.2.8 Incendios y explosiones en instalaciones de hidrocarburos

Las instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos presentan riesgos asociados a incendios y explosiones debido a la presencia de sustancias inflamables y combustibles capaces de liberar vapores inflamables bajo determinadas condiciones operativas.

Entre los principales escenarios accidentales se encuentran el Pool Fire, Flash Fire, Jet Fire y la explosión de nube de vapor (VCE). El Pool Fire ocurre cuando un líquido inflamable derramado forma una superficie de combustión que genera radiación térmica significativa sobre personas, equipos e infraestructura. Este tipo de incendio es uno de los escenarios más frecuentes en instalaciones de almacenamiento de combustibles líquidos.

El Flash Fire corresponde a la ignición rápida de una nube inflamable dispersa en el ambiente. Este fenómeno genera propagación súbita de la llama y puede producir afectaciones severas sobre personas expuestas dentro del área inflamable.

El Jet Fire se produce por la ignición de una fuga presurizada de hidrocarburos, generando una llama de alta energía y elevada radiación térmica. Este escenario suele presentarse en líneas de transferencia, válvulas o sistemas presurizados.

Por otro lado, la explosión de nube de vapor (VCE) ocurre cuando una nube inflamable confinada o parcialmente confinada entra en contacto con una fuente de ignición, generando una onda de sobrepresión capaz de producir daños estructurales, afectación a personas y propagación de incendios secundarios.

La severidad de estos escenarios depende de factores como el volumen liberado, tipo de combustible, condiciones meteorológicas, presencia de fuentes de ignición, nivel de confinamiento y efectividad de las salvaguardas existentes.

En instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos, la identificación y evaluación de estos fenómenos resulta fundamental para la prevención de accidentes mayores y el fortalecimiento de la seguridad de procesos (Mannan, 2012).

2.2.9 Capas de protección y salvaguardas

Las capas de protección constituyen medidas de prevención y mitigación implementadas para reducir la probabilidad de ocurrencia y severidad de eventos accidentales en procesos industriales. Estas capas pueden incluir controles de ingeniería, sistemas instrumentados de seguridad, procedimientos operativos, sistemas de detección y respuesta ante emergencias.

Las salvaguardas representan barreras físicas, administrativas o instrumentadas orientadas a prevenir desviaciones operativas o minimizar las consecuencias de eventos peligrosos. Entre las principales salvaguardas utilizadas en instalaciones de hidrocarburos líquidos se encuentran válvulas de alivio, alarmas de nivel, sistemas de detección de fugas, sistemas contra incendio, procedimientos operativos y capacitación del personal.

La efectividad de las capas de protección depende de factores como confiabilidad, mantenimiento, tiempo de respuesta y condiciones operativas de la instalación. Por ello, la evaluación de salvaguardas constituye un aspecto fundamental dentro de la gestión de seguridad de procesos.

En metodologías como HAZOP y ETA, las salvaguardas permiten analizar la capacidad del sistema para prevenir o controlar escenarios críticos asociados a incendios, explosiones y pérdidas de contención (CCPS, 2008).

2.2.10 Software de modelamiento de consecuencias: PHAST y EFFECTS

En la industria de hidrocarburos se emplean programas especializados para el modelamiento de consecuencias de eventos accidentales, entre los cuales destacan PHAST y EFFECTS. Estos softwares permiten simular escenarios asociados a fugas, incendios, explosiones y dispersión de vapores inflamables, estimando radios de afectación y niveles de severidad.

PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) es una herramienta ampliamente utilizada para el análisis cuantitativo de riesgos debido a su capacidad para modelar fenómenos físicos relacionados con sustancias peligrosas. El software permite simular escenarios como Pool Fire, Flash Fire, Jet Fire y explosiones de nube de vapor, facilitando la evaluación de consecuencias sobre personas, equipos e infraestructura.

Por su parte, EFFECTS, desarrollado por la organización TNO, permite realizar simulaciones de radiación térmica, sobrepresión y dispersión de sustancias peligrosas mediante modelos matemáticos validados internacionalmente. Este software es utilizado en estudios de riesgos de seguridad y análisis de consecuencias en instalaciones industriales de alta complejidad.

Ambos programas constituyen herramientas fundamentales dentro de la gestión de riesgos industriales, debido a que permiten cuantificar escenarios accidentales y determinar distancias de afectación para diferentes niveles de severidad.

En la presente investigación, los estudios analizados emplearon software PHAST y EFFECTS para modelar escenarios accidentales asociados a incendios, explosiones y pérdidas de contención en las plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos evaluadas. (DNV, 2023)

2.2.11 Marco normativo y estándares técnicos aplicables

La operación segura de plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos requiere el cumplimiento de disposiciones legales, reglamentos técnicos y estándares internacionales orientados a prevenir accidentes mayores, proteger a las personas, preservar el medio ambiente y asegurar la continuidad operativa. En ese sentido, la gestión de riesgos en este tipo de instalaciones no depende únicamente de criterios internos de operación, sino también del marco regulatorio vigente y de buenas prácticas reconocidas a nivel internacional.

En el Perú, las actividades relacionadas con hidrocarburos líquidos se encuentran sujetas a la supervisión del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinergmin), entidad encargada de fiscalizar el cumplimiento de obligaciones técnicas y de seguridad dentro del subsector hidrocarburos. Entre sus funciones se incluye la verificación del cumplimiento normativo en plantas de abastecimiento, terminales, medios de transporte e instalaciones vinculadas al almacenamiento y comercialización de combustibles.

Asimismo, el desarrollo de estas actividades se encuentra regulado por normas emitidas por el Estado peruano, entre ellas reglamentos vinculados a la comercialización de combustibles líquidos, seguridad industrial, protección ambiental y atención de emergencias. Dichas disposiciones establecen exigencias relacionadas con diseño de instalaciones, distancias mínimas de seguridad, sistemas contra incendio, mantenimiento de equipos, planes de contingencia y presentación de estudios técnicos.

En el ámbito internacional, uno de los referentes más importantes es el American Petroleum Institute (API), organismo que emite estándares ampliamente utilizados en la industria petrolera. Entre ellos destacan API 650 para diseño y construcción de tanques soldados de almacenamiento, API 653 para inspección, reparación y mantenimiento de tanques en servicio, así como otras prácticas recomendadas aplicables a terminales y sistemas de almacenamiento (API, 2020).

De igual manera, la National Fire Protection Association (NFPA) publica normas orientadas a la prevención y protección contra incendios. En particular, la NFPA 30 constituye una referencia relevante para el almacenamiento y manejo de líquidos inflamables y combustibles, estableciendo criterios técnicos sobre clasificación de productos, diseño de recipientes, distancias de separación y medidas de protección contra incendios (NFPA, 2024).

Por otro lado, el Center for Chemical Process Safety (CCPS) desarrolla guías especializadas en seguridad de procesos, identificación de peligros, análisis de riesgos, integridad mecánica y cultura organizacional, documentos ampliamente empleados como referencia técnica en instalaciones de alto riesgo (CCPS, 2008).

La integración entre normativa nacional y estándares internacionales permite fortalecer la seguridad de procesos en plantas de almacenamiento de hidrocarburos

líquidos, al combinar exigencias regulatorias obligatorias con buenas prácticas de ingeniería reconocidas mundialmente.

En la presente investigación, dicho marco normativo servirá como referencia para interpretar los resultados del análisis comparativo y sustentar técnicamente las recomendaciones propuestas.

Tabla 6. Principales normas y estándares aplicables.

Norma / Institución	Alcance principal	Aplicación en la tesis
Osinergmin	Supervisión y fiscalización del subsector hidrocarburos	Cumplimiento regulatorio
API 650	Diseño de tanques soldados	Infraestructura de almacenamiento
API 653	Inspección y reparación de tanques	Integridad mecánica
NFPA 30	Líquidos inflamables y combustibles	Prevención de incendios
CCPS	Seguridad de procesos	Gestión de riesgos

Fuente: Elaboración propia con base en API (2020), NFPA (2024) y CCPS (2008).

2.3 Definición de términos

- Accidente mayor: Evento no deseado de gran magnitud que involucra incendio, explosión, fuga masiva o liberación peligrosa de sustancias, generando daños significativos a personas, instalaciones o medio ambiente (CCPS, 2008).
- Análisis de consecuencias: Metodología utilizada para estimar los efectos físicos y las áreas de afectación que podrían generarse como resultado de un escenario accidental (Mannan, 2012).
- Árbol de eventos (ETA): Técnica lógica e inductiva que analiza las posibles secuencias de resultados a partir de un evento iniciador, considerando el éxito o falla de las barreras de protección (CCPS, 2008).
- Barrera de protección: Medida física, instrumental, humana u organizacional implementada para prevenir un evento peligroso o mitigar sus consecuencias (CCPS, 2008).

- Capacidad de almacenamiento: Volumen máximo de producto que puede contener una instalación o conjunto de tanques, generalmente expresado en metros cúbicos (m^3) o barriles (API, 2020).
- Consecuencia: Impacto o efecto derivado de un evento accidental, el cual puede afectar a personas, activos, operaciones o al ambiente (Mannan, 2012).
- Derrame: Liberación no controlada de hidrocarburo líquido fuera de su sistema de contención normal (NFPA, 2024).
- Desviación operativa: Variación no prevista respecto a las condiciones normales de operación de un proceso, tales como exceso de presión, alto nivel, ausencia de flujo o temperatura anormal (Crowl & Louvar, 2011).
- Escenario crítico: Evento accidental que presenta un nivel significativo de severidad o riesgo dentro de una instalación industrial, requiriendo medidas específicas de control y mitigación (OSHA, 1992).
- Estudio de Alcance de Consecuencias (EAC): Metodología utilizada para estimar los efectos físicos derivados de eventos accidentales como incendios, explosiones y derrames de sustancias peligrosas, determinando radios de afectación y niveles de severidad (CCPS, 2010).
- Evento iniciador: Suceso inicial que desencadena una secuencia accidental, como una fuga, sobrellenado, falla mecánica o error humano (CCPS, 2008).
- Explosión de nube de vapor (VCE): Explosión producida por la ignición de una nube inflamable confinada o parcialmente confinada, generando sobrepresión y daños estructurales (CCPS, 2010)
- Flash Fire: Incendio originado por la ignición rápida de una nube inflamable dispersa en el ambiente, caracterizado por la propagación súbita de la llama dentro de la zona inflamable (CCPS, 2010)
- HAZOP: Sigla de Hazard and Operability Study. Metodología sistemática empleada para identificar peligros y problemas de operabilidad mediante el análisis de desviaciones del proceso (Crowl & Louvar, 2011).
- Hidrocarburos líquidos: Sustancias derivadas principalmente del petróleo crudo que se presentan en estado líquido a condiciones normales, como gasolina, diésel, kerosene y solventes (API, 2020).

- Integridad mecánica: Condición mediante la cual equipos, tuberías, tanques y dispositivos operan de forma segura y confiable durante su vida útil, mediante inspección y mantenimiento adecuados (CCPS, 2008).
- Jet Fire: Incendio generado por la ignición de una fuga presurizada de hidrocarburos o gases inflamables, produciendo una llama de alta energía y elevada radiación térmica (Lees, 2012)
- Nivel de riesgo: Resultado de la combinación entre la probabilidad de ocurrencia de un evento y la severidad de sus consecuencias (Mannan, 2012).
- Nodo: Sección específica de un proceso industrial seleccionada para el análisis sistemático de desviaciones operativas mediante la metodología HAZOP (IEC 61882, 2016).
- Pérdida de contención: Liberación accidental de una sustancia peligrosa desde tanques, tuberías, válvulas u otros equipos diseñados para contenerla (CCPS, 2008).
- Planta de abastecimiento: Instalación destinada a recibir, almacenar y despachar combustibles líquidos hacia distintos usuarios o centros de distribución (Osinergmin, s.f.).
- Pool fire: Incendio producido por la combustión de un líquido inflamable derramado sobre una superficie, generando radiación térmica sobre personas, equipos e infraestructura (TNO, 2005).
- Radiación térmica: Transferencia de energía calorífica emitida durante un incendio, capaz de producir lesiones a personas y daños en equipos e infraestructura (API, 2013).
- Riesgo inherente: Nivel de riesgo existente antes de considerar medidas de control o salvaguardas implementadas dentro de un proceso industrial (CCPS, 2008).
- Riesgo residual: Nivel de riesgo remanente después de aplicar medidas de prevención, mitigación y salvaguardas de seguridad (ISO 31000, 2018).
- Salvaguarda: Medidas preventivas, detectivas o mitigadoras implementadas para reducir la probabilidad o severidad de eventos peligrosos en instalaciones industriales (IEC 61511, 2016).
- Seguridad de procesos: Disciplina orientada a prevenir accidentes mayores asociados a sustancias peligrosas, energía acumulada o fallas críticas en instalaciones industriales (CCPS, 2008).

- Sobrellenado: Condición en la cual el nivel de producto excede la capacidad segura de un tanque o recipiente (API, 2020).
- Sobrepresión: Incremento repentino de presión generado generalmente por explosiones o liberación violenta de energía, capaz de afectar estructuras y personas expuestas (Lees, 2012).
- Vulnerabilidad: Grado de susceptibilidad de una instalación, persona o sistema frente a los efectos de un evento peligroso (Mannan, 2012).

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

La presente investigación parte de la premisa de que la capacidad de almacenamiento de una planta influye en el nivel de riesgo de procesos asociado a sus operaciones, debido a que mayores volúmenes de hidrocarburos líquidos pueden incrementar la magnitud de las consecuencias ante escenarios accidentales, tales como incendios, explosiones o derrames.

En ese sentido, se formula lo siguiente:

3.1 Hipótesis general

Las diferencias en capacidad de almacenamiento, características operativas, propiedades de los combustibles y salvaguardas implementadas influyen en el nivel de riesgo de procesos y en la severidad de los escenarios críticos identificados en las plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos evaluadas.

3.2 Hipótesis específicas

Hipótesis específica 1:

Las plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos presentan peligros y desviaciones operativas identificables mediante la metodología HAZOP, asociados a eventos como sobrellenado, fugas, derrames e incendios.

Hipótesis específica 2:

Las causas, consecuencias y salvaguardas asociadas a las desviaciones identificadas mediante la metodología HAZOP influyen en la severidad y nivel de riesgo de los escenarios críticos presentes en las plantas evaluadas.

Hipótesis específica 3:

Los escenarios de mayor criticidad identificados mediante el estudio HAZOP presentan distintos niveles de severidad de consecuencias, determinados mediante análisis de eventos y análisis de consecuencias.

Hipótesis específica 4:

Las diferencias en capacidad de almacenamiento, complejidad operacional, propiedades de los combustibles y salvaguardas implementadas generan diferencias en el nivel de riesgo de procesos entre las plantas evaluadas.

3.3 Variables

Para el desarrollo de la presente investigación se definieron las variables que permitieron evaluar comparativamente la seguridad de procesos en dos plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos del Perú. La variable independiente está representada por las características técnicas y operativas de las instalaciones evaluadas, mientras que las variables dependientes corresponden a los aspectos relacionados con el nivel de riesgo de procesos y la severidad de las consecuencias potenciales derivadas de los escenarios críticos identificados mediante las metodologías HAZOP, Análisis de Árbol de Eventos (ETA) y Estudio de Alcance de Consecuencias (EAC).

3.3.1 Variable independiente

Características de la planta de almacenamiento de hidrocarburos líquidos

Se define como el conjunto de características técnicas y operativas propias de cada instalación que pueden influir en el nivel de riesgo de procesos. Para la presente investigación, esta variable comprende la capacidad de almacenamiento, las propiedades fisicoquímicas de los combustibles almacenados y la complejidad operacional de las plantas evaluadas. Estas características constituyen la base para establecer la comparación entre ambas instalaciones y analizar su influencia sobre la generación de escenarios críticos y la severidad de sus consecuencias.

3.3.2 Variables dependientes

a) Nivel de riesgo de procesos.

   Se define como el grado de exposición a eventos peligrosos en una instalación, determinado por la combinación de la probabilidad de ocurrencia y la severidad

de las consecuencias. Esta variable será evaluada a partir de la clasificación de riesgos obtenida en los estudios HAZOP y el análisis de escenarios críticos.

b) Severidad de consecuencias potenciales.

Se refiere a la magnitud de los efectos generados por los escenarios accidentales identificados en las instalaciones, considerando parámetros como radiación térmica, radios de afectación, potencial de incendio y explosión, así como el impacto sobre personas, infraestructura y continuidad operativa. Esta variable fue evaluada mediante los Estudios de Alcance de Consecuencias (EAC), permitiendo comparar la severidad de los escenarios críticos entre ambas plantas.

c) Número de escenarios críticos.

Corresponde a la cantidad de eventos clasificados como de riesgo alto o medio-alto dentro del análisis HAZOP. Esta variable permite identificar la carga de riesgo presente en cada instalación.

d) Efectividad de salvaguardas.

Se refiere a la capacidad de las barreras de protección existentes para prevenir, detectar o mitigar escenarios peligrosos dentro de las plantas evaluadas. Esta variable será analizada considerando el tipo, cantidad y desempeño de las salvaguardas identificadas en los estudios HAZOP y ETA.

3.4 Operacionalización de variables

Tabla 7. Matriz de operacionalización de variables.

Variable	Dimensión	Indicador	Método de medición	Unidad / Escala
Variable independiente: Características de la planta de almacenamiento de hidrocarburos líquidos	Capacidad de almacenamiento	Volumen total almacenado	Revisión de estudios técnicos	m^3 / barriles
	Propiedades fisicoquímicas de los combustibles	Tipo de combustible, punto de	Revisión de fichas técnicas y estudios de riesgos	Cualitativa

		inflamación y volatilidad		
	Complejidad operacional	Número de tanques, número de nodos HAZOP y tipo de operaciones	Revisión de estudios HAZOP y documentación técnica	Cualitativa
Variable dependiente: Nivel de riesgo de procesos	Riesgo operacional	Clasificación del riesgo identificado mediante HAZOP	Matriz de riesgo HAZOP	Bajo / Medio / Alto
Variable dependiente: Severidad de las consecuencias potenciales	Consecuencias físicas	Radiación térmica, sobrepresión y radios de afectación	Estudios de Alcance de Consecuencias (EAC)	kW/m², bar, m
Variable dependiente: Número de escenarios críticos	Escenarios de riesgo	Cantidad de escenarios críticos identificados mediante HAZOP	Revisión de estudios HAZOP	Número de escenarios
Variable dependiente: Efectividad de salvaguardas	Barreras de protección	Tipo, funcionamiento y desempeño de las salvaguardas implementadas	Análisis HAZOP y ETA	Cualitativa

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Área de estudio

El presente estudio se desarrolla en dos instalaciones de almacenamiento y comercialización de hidrocarburos líquidos pertenecientes al sistema de distribución de combustibles en el Perú, seleccionadas por presentar diferencias significativas en capacidad operativa, ubicación geográfica y condiciones logísticas. Por razones de confidencialidad, dichas instalaciones serán identificadas como Planta A y Planta B.

La Planta A corresponde al terminal de almacenamiento ubicado en el distrito de Salaverry, provincia de Trujillo, departamento de La Libertad, en la zona costera norte del Perú, aproximadamente en las coordenadas geográficas 08°13' latitud sur y 78°59'

longitud oeste. Esta instalación se caracteriza por su vinculación con operaciones portuarias, lo que permite la recepción de combustibles a gran escala mediante transporte marítimo. En términos de infraestructura, el terminal cuenta con un total de quince (15) tanques verticales, de los cuales doce (12) están destinados al almacenamiento de combustibles líquidos, dos (02) al almacenamiento de SLOP y uno (01) al almacenamiento de agua contra incendio. La capacidad total de almacenamiento de combustibles líquidos en esta planta alcanza aproximadamente 291,239 barriles, lo que la clasifica como una instalación de alta capacidad operativa.

Por otro lado, la Planta B corresponde a una instalación ubicada en la ciudad de Tarapoto, provincia y departamento de San Martín, en la región nororiental del Perú, aproximadamente en las coordenadas geográficas 06°29' latitud sur y 76°22' longitud oeste. Esta planta se encuentra emplazada dentro del área del aeropuerto Cadete Guillermo del Castillo Paredes, desempeñando un rol estratégico en el abastecimiento de combustibles en la región amazónica. A diferencia de la Planta A, esta instalación presenta una menor escala operativa, con una capacidad total de almacenamiento aproximada de 7,105 barriles, orientada principalmente al suministro regional mediante transporte terrestre.

Ambas instalaciones están destinadas a actividades de recepción, almacenamiento y despacho de combustibles líquidos, tales como diésel, gasolinas y combustible de aviación, y cuentan con infraestructura típica del sector hidrocarburos, incluyendo tanques de almacenamiento atmosférico, sistemas de bombeo, tuberías de transferencia, válvulas operativas, diques de contención y sistemas de protección contra incendios.

Desde el punto de vista de la seguridad de procesos, las operaciones desarrolladas en ambas plantas implican riesgos inherentes asociados a la manipulación de sustancias inflamables, tales como fugas, derrames, incendios y explosiones. No obstante, las diferencias en capacidad de almacenamiento, entorno geográfico y características operativas permiten establecer un escenario adecuado para la evaluación comparativa del riesgo de procesos.

En este contexto, el área de estudio se define como un sistema de análisis que integra dos instalaciones con características operativas diferenciadas: una de gran escala ubicada en la costa peruana y otra de menor capacidad localizada en la selva alta. Esta configuración permite analizar cómo la capacidad de almacenamiento influye en la

generación de escenarios críticos, la severidad de las consecuencias y el nivel de riesgo asociado a las operaciones, constituyendo la base para el desarrollo de la presente investigación.

Tabla 8. Comparación general de las plantas evaluadas.

Característica	Planta A	Planta B
Ubicación	La Libertad	San Martín
Tipo de instalación	Terminal de abastecimiento	Planta de ventas
Capacidad aproximada	291 239 barriles	7 105 barriles
Número de tanques	15	8
Tipo de operación	Recepción marítima y terrestre	Recepción terrestre
Productos almacenados	Gasolinas, diésel, alcohol carburante	Gasolinas, diésel, Turbo A-1
Número de nodos HAZOP	21	9
Nivel de complejidad operativa	Alto	Medio

Fuente: Elaboración propia con base en estudios de riesgos de ambas plantas.

4.2 Diseño de investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, debido a que se emplean datos técnicos y criterios objetivos para evaluar y comparar el nivel de riesgo de procesos en plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos. Este enfoque permite medir variables como la severidad de las consecuencias, la frecuencia de eventos y la clasificación del riesgo, a partir de metodologías estructuradas como el análisis HAZOP y el análisis de árbol de eventos (ETA).

El diseño de la investigación es de tipo no experimental, dado que las variables de estudio no son manipuladas deliberadamente por el investigador, sino que se analizan en su contexto real de operación. En ese sentido, se evalúan las condiciones existentes de las instalaciones seleccionadas, incluyendo sus procesos, equipos, sistemas de seguridad y escenarios de riesgo asociados, a partir de información técnica previamente desarrollada en estudios de riesgos.

Asimismo, la investigación presenta un diseño transversal, ya que la recolección y análisis de la información se realiza en un periodo determinado, sin efectuar seguimiento a lo largo del tiempo. Esto implica que los resultados obtenidos corresponden a un análisis estático de las condiciones operativas y de seguridad de las plantas en el momento de estudio.

Por su alcance, la investigación es de nivel descriptivo-comparativo. Es descriptiva porque permite identificar y caracterizar peligros, desviaciones operativas, causas, consecuencias y salvaguardas presentes en cada una de las plantas evaluadas. A su vez, es comparativa porque establece un análisis entre dos instalaciones con diferentes capacidades de almacenamiento, con el propósito de determinar diferencias en el nivel de riesgo de procesos y en la generación de escenarios críticos.

El diseño metodológico adoptado resulta adecuado para la presente investigación, ya que permite aplicar herramientas técnicas de análisis de riesgos, tales como HAZOP, análisis de árbol de eventos (ETA) y análisis de consecuencias, utilizando información real de las instalaciones seleccionadas. De esta manera, se garantiza la obtención de resultados objetivos, técnicamente sustentados y aplicables al contexto industrial del sector hidrocarburos.

Asimismo, la investigación presenta un enfoque documental-técnico, debido a que el análisis se desarrolló a partir de estudios especializados de seguridad de procesos, incluyendo informes HAZOP, análisis de árbol de eventos (ETA), estudios de alcance de consecuencias (EAC), diagramas P&ID y documentación técnica asociada a las plantas evaluadas.

4.3 Población y muestra

La población de la presente investigación estuvo conformada por las plantas de abastecimiento de combustibles líquidos registradas y habilitadas en el Registro de Hidrocarburos del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinergmin). De acuerdo con el Registro Hábil de Plantas de Abastecimiento de Combustibles Líquidos y OPDH, actualizado a junio de 2026, se encontraban habilitadas 29 plantas de abastecimiento a nivel nacional, las cuales presentan diferencias en capacidad de almacenamiento, infraestructura, configuración operacional y características de los combustibles manejados.

La muestra fue de tipo no probabilística e intencional, conformada por dos plantas de abastecimiento de hidrocarburos líquidos: la Planta A (Salaverry) y la Planta B (Tarapoto).

La selección de únicamente dos plantas respondió al objetivo de la investigación, el cual consistió en realizar una evaluación comparativa de la seguridad de procesos entre dos instalaciones con características operativas diferenciadas, y no en efectuar una generalización estadística para la totalidad de las plantas de abastecimiento existentes en el país. En este sentido, se priorizó la profundidad del análisis técnico sobre la representatividad estadística, empleando instalaciones que contaban con información suficiente para desarrollar la metodología propuesta.

La selección de ambas plantas respondió a los siguientes criterios técnicos:

- Diferencia significativa en la capacidad de almacenamiento.
- Disponibilidad de estudios de riesgo detallados mediante la metodología HAZOP.
- Disponibilidad de estudios de Análisis de Árbol de Eventos (ETA) y Estudios de Alcance de Consecuencias (EAC).
- Presencia de operaciones representativas del sector de hidrocarburos líquidos.
- Infraestructura comparable en los procesos de almacenamiento y transferencia de combustibles.
- Diferencias en las propiedades fisicoquímicas de los combustibles almacenados.
- Relevancia para el análisis comparativo de la seguridad de procesos.

Asimismo, la unidad de análisis estuvo constituida por los escenarios de riesgo identificados en los estudios HAZOP de cada planta, incluyendo las desviaciones operativas, sus causas, consecuencias y salvaguardas asociadas. Estos elementos permitieron evaluar de manera estructurada el comportamiento de los procesos frente a condiciones anormales de operación.

En ese sentido, el análisis no se centró únicamente en las plantas como unidades globales, sino en los escenarios críticos identificados dentro de sus procesos, los cuales fueron posteriormente evaluados mediante el Análisis de Árbol de Eventos (ETA) y los Estudios de Alcance de Consecuencias (EAC). Este enfoque permitió realizar una

comparación técnica del nivel de riesgo de procesos basada en información especializada y homogénea para ambas instalaciones.

Adicionalmente, los escenarios críticos seleccionados para el análisis comparativo correspondieron a eventos asociados a pérdida de contención, incendios, explosiones, sobrellenado y fallas operativas identificadas en los estudios HAZOP y en los análisis de consecuencias de ambas plantas, permitiendo evaluar las diferencias en el comportamiento de la seguridad de procesos entre una instalación de mayor capacidad y otra de menor capacidad.

4.4 Procedimiento metodológico

4.4.1 Procedimiento

La presente investigación se desarrolló mediante un enfoque comparativo orientado a evaluar la seguridad de procesos en dos plantas de almacenamiento de hidrocarburos líquidos del Perú, denominadas Planta A y Planta B, utilizando información técnica proveniente de estudios de riesgos de seguridad existentes correspondientes a ambas instalaciones.

Para el desarrollo de la investigación se recopilaron y revisaron los estudios completos HAZOP, ETA y EAC de ambas plantas, así como documentación técnica complementaria relacionada con diagramas P&ID, configuraciones operativas, sistemas de almacenamiento, sistemas de transferencia, inventarios de hidrocarburos y salvaguardas implementadas en cada instalación.

En una primera etapa se realizó la revisión y análisis de los estudios HAZOP de ambas plantas, identificando nodos operativos, desviaciones de proceso, causas, consecuencias y salvaguardas asociadas a los escenarios evaluados. Asimismo, se analizaron las diferencias relacionadas con capacidad operativa, complejidad de los sistemas de almacenamiento y cantidad de escenarios identificados en cada instalación.

Posteriormente, se identificaron los escenarios de mayor criticidad reportados en los estudios HAZOP, considerando eventos asociados a pérdida de contención, fugas de hidrocarburos, incendios y explosiones. A partir de ello, se revisaron los análisis ETA

correspondientes a ambas plantas, con la finalidad de evaluar las secuencias accidentales derivadas de eventos iniciadores y el comportamiento de las salvaguardas implementadas.

En una tercera etapa se analizaron los Estudios de Alcance de Consecuencias (EAC) de ambas instalaciones, los cuales incluyeron modelamiento de escenarios accidentales mediante software especializado PHAST y EFFECTS. En esta etapa se evaluaron fenómenos asociados a Pool Fire, Flash Fire y explosión de nube de vapor (VCE), considerando radios de afectación, radiación térmica y severidad de las consecuencias potenciales sobre personas e infraestructura.

Posteriormente, se realizó el análisis comparativo entre ambas plantas, considerando variables relacionadas con capacidad de almacenamiento, cantidad de escenarios identificados, complejidad operativa, severidad de consecuencias y efectividad de las salvaguardas existentes. Este análisis permitió identificar diferencias en el comportamiento del riesgo de procesos entre ambas instalaciones.

Finalmente, los resultados obtenidos fueron interpretados y discutidos mediante comparación técnica de los hallazgos identificados en ambas plantas, permitiendo establecer conclusiones y recomendaciones orientadas al fortalecimiento de la seguridad de procesos en instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos.

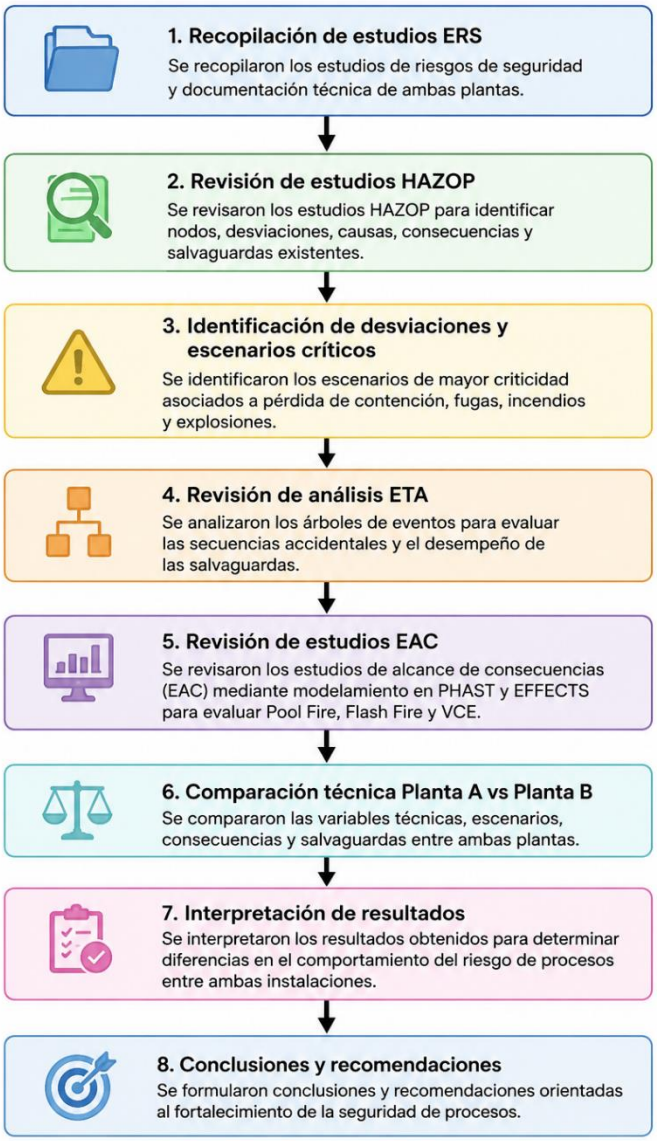


Figura 4. Procedimiento metodológico de la investigación.

Tabla 9. Documentación técnica analizada en la investigación.

Documento analizado	Planta A	Planta B
Estudio HAZOP	Sí	Sí
Análisis ETA	Sí	Sí
Estudio EAC	Sí	Sí
Estudio de Riesgos de Seguridad	Sí	Sí
Diagramas P&ID	Sí	Sí
Información de salvaguardas	Sí	Sí

4.4.2 Técnicas de recolección de datos

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearon técnicas de recolección de datos de carácter documental-técnico, debido a que la información analizada provino de estudios especializados relacionados con seguridad de procesos en instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos:

Las principales técnicas utilizadas fueron las siguientes:

- Revisión documental: Técnica empleada para recopilar y analizar información proveniente de estudios de riesgos de seguridad, informes técnicos, diagramas P&ID, normas técnicas y documentación relacionada con las operaciones de las plantas evaluadas.
- Revisión de estudios HAZOP: Técnica utilizada para identificar nodos operativos, desviaciones de proceso, causas, consecuencias y salvaguardas asociadas a los sistemas de almacenamiento y transferencia de hidrocarburos líquidos.
- Revisión de análisis de árbol de eventos (ETA): Técnica aplicada para evaluar la evolución de eventos iniciadores y analizar las posibles secuencias accidentales derivadas de fallas operativas o pérdida de efectividad de las salvaguardas implementadas.
- Revisión de estudios de alcance de consecuencias (EAC): Técnica empleada para analizar escenarios accidentales asociados a incendios, explosiones y pérdidas de contención, considerando parámetros como radiación térmica, sobrepresión, dispersión de vapores inflamables y distancias de afectación.
- Análisis comparativo: Técnica utilizada para comparar el comportamiento del riesgo de procesos entre la Planta A y la Planta B, considerando variables como capacidad de almacenamiento, número de nodos HAZOP, escenarios críticos, severidad de consecuencias y efectividad de salvaguardas

4.4.3 Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos empleados para la recolección de datos estuvieron conformados por documentación técnica especializada y registros utilizados en los estudios de seguridad de procesos de las plantas evaluadas.

Los principales instrumentos utilizados fueron los siguientes:

- Estudios de Riesgos de Seguridad (ERS): Documentos técnicos utilizados para recopilar información relacionada con las características operativas de las instalaciones, identificación de peligros, escenarios accidentales y medidas de control implementadas.
- Informes HAZOP: Instrumentos empleados para identificar desviaciones operativas, causas, consecuencias y salvaguardas asociadas a los procesos de almacenamiento y transferencia de hidrocarburos líquidos.
- Análisis de Árbol de Eventos (ETA): Instrumentos utilizados para evaluar la evolución de eventos iniciadores y determinar posibles escenarios accidentales derivados de fallas operativas o pérdida de efectividad de las salvaguardas existentes.
- Estudios de Alcance de Consecuencias (EAC): Documentos técnicos utilizados para evaluar escenarios de incendio, explosión y pérdidas de contención, mediante el análisis de radiación térmica, sobrepresión, dispersión de vapores inflamables y distancias de afectación.
- Diagramas P&ID (Piping and Instrumentation Diagram): Instrumentos empleados para analizar la configuración operativa de los sistemas de almacenamiento, líneas de transferencia, válvulas, bombas e instrumentación de proceso.
- Matrices de riesgo: Instrumentos utilizados para clasificar los escenarios identificados según probabilidad de ocurrencia y severidad de consecuencias.
- Software especializado de modelamiento: Herramientas utilizadas en los estudios analizados para la simulación de escenarios accidentales y estimación de consecuencias, tales como PHAST y EFFECTS.
- Fichas de registro y análisis comparativo: Instrumentos elaborados para organizar y comparar información relacionada con capacidad de almacenamiento, escenarios críticos, radios de afectación, frecuencia de ocurrencia y salvaguardas implementadas en ambas plantas

4.5 Análisis de datos

La información recopilada fue organizada y sistematizada mediante matrices comparativas elaboradas a partir de los estudios HAZOP, ETA y EAC correspondientes a ambas instalaciones evaluadas.

Posteriormente, se realizó el análisis técnico de la información identificando diferencias relacionadas con peligros operativos, escenarios críticos, severidad de consecuencias y efectividad de las salvaguardas implementadas en cada planta.

Para el análisis comparativo se consideraron criterios relacionados con capacidad de almacenamiento, cantidad de escenarios identificados, complejidad operativa, tipo de hidrocarburos almacenados, severidad de consecuencias, radios de afectación y efectividad de las salvaguardas implementadas en ambas instalaciones.

Los resultados obtenidos fueron interpretados mediante análisis descriptivo y comparativo, permitiendo evaluar el comportamiento del riesgo de procesos en ambas instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos.

Finalmente, los hallazgos obtenidos fueron discutidos considerando criterios técnicos relacionados con seguridad de procesos, gestión de riesgos industriales y análisis de consecuencias, permitiendo formular conclusiones y recomendaciones orientadas al fortalecimiento de la seguridad operacional en instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos.

V. RESULTADOS

5.1 Caracterización de las plantas evaluadas

La presente investigación considera dos instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos del Perú, denominadas para fines de confidencialidad como Planta A y Planta B. Ambas instalaciones desarrollan operaciones de recepción, almacenamiento y despacho de combustibles líquidos; sin embargo, presentan diferencias significativas en capacidad de almacenamiento, configuración operativa, número de tanques, sistemas de recepción y complejidad de procesos.

La Planta A corresponde a una instalación de gran capacidad operativa, orientada al almacenamiento y distribución de combustibles líquidos a mayor escala. Esta planta cuenta con una capacidad aproximada de 291 239 barriles, distribuida en tanques destinados al almacenamiento de diésel, gasolinas, alcohol carburante y productos residuales tipo SLOP. Asimismo, presenta operaciones de recepción mediante transporte marítimo y terrestre, lo que incrementa la complejidad de sus sistemas de transferencia, almacenamiento y despacho.

Por su parte, la Planta B corresponde a una instalación de menor capacidad operativa, destinada principalmente a la recepción, almacenamiento y despacho regional de combustibles líquidos. Esta planta cuenta con una capacidad aproximada de 7 105 barriles, distribuida en ocho tanques de almacenamiento, incluyendo tanques verticales y horizontales para gasolinas, diésel y Turbo A-1. Sus operaciones se desarrollan principalmente mediante recepción terrestre por camiones cisterna y despacho hacia unidades de transporte y aeronaves.

Las diferencias entre ambas plantas permiten establecer una base adecuada para el análisis comparativo de la seguridad de procesos, debido a que la Planta A representa una instalación de mayor escala, mayor inventario de hidrocarburos y mayor complejidad operativa, mientras que la Planta B representa una instalación de menor capacidad, pero con presencia de combustibles inflamables relevantes, como gasolinas y Turbo A-1.

Tabla 10. Características generales de las plantas evaluadas.

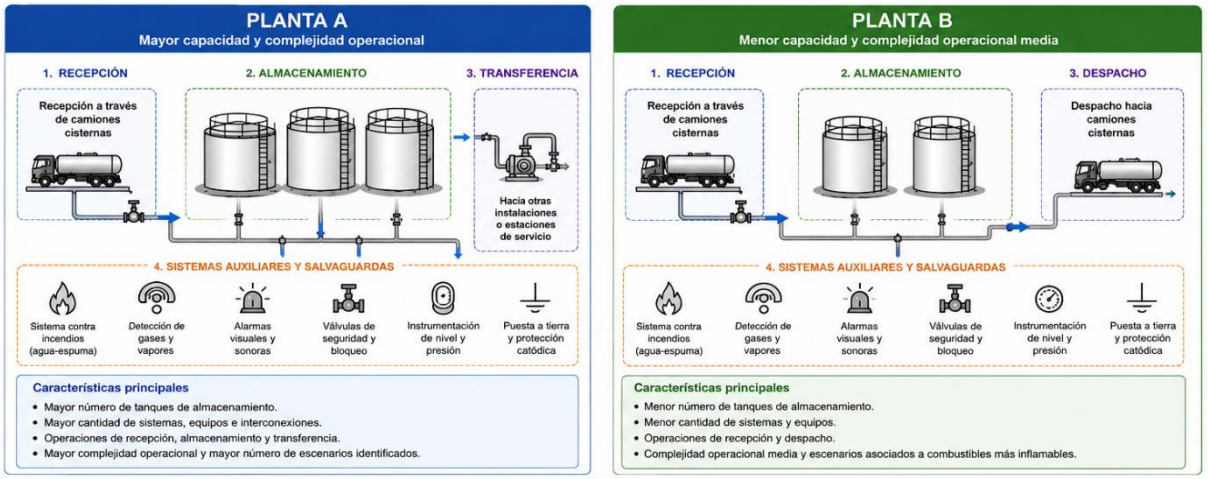
Característica	Planta A	Planta B
Tipo de instalación	Planta de almacenamiento de hidrocarburos líquidos	Planta de almacenamiento de hidrocarburos líquidos

Nivel de capacidad	Alta capacidad	Menor capacidad
Complejidad operacional	Alta	Media
Operaciones principales	Recepción, almacenamiento y transferencia	Recepción, almacenamiento y despacho
Tipo de combustibles	Combustibles líquidos inflamables	Combustibles líquidos inflamables
Estudios HAZOP	Sí	Sí
Estudios ETA	Sí	Sí
Estudios EAC	Sí	Sí
Escenarios HAZOP identificados	221	302
Riesgos principales	Incendios, explosiones y pérdidas de contención	Incendios, explosiones y pérdidas de contención

Fuente: Elaboración propia con base en los estudios de riesgos de seguridad.

Como se observa en la Tabla 10, la Planta A presenta una mayor capacidad de almacenamiento y una configuración operativa más compleja, reflejada en el mayor número de tanques, diversidad de productos, recepción marítima. En cambio, la Planta B posee una menor escala operativa, aunque mantiene escenarios relevantes debido al manejo de combustibles inflamables y combustibles de aviación.

Esta caracterización inicial permite contextualizar los resultados posteriores del análisis HAZOP, ETA y EAC, ya que las diferencias en capacidad, tipo de operación e infraestructura influyen directamente en la cantidad de escenarios críticos, la severidad de las consecuencias potenciales y el nivel de riesgo de procesos de cada instalación.



COMPARACIÓN GENERAL ENTRE PLANTA A Y PLANTA B

Aspecto	Planta A	Planta B	Comparación / Interpretación
Capacidad de almacenamiento	Alta capacidad de almacenamiento (mayor número de tanques)	Menor capacidad de almacenamiento (menor número de tanques)	La Planta A tiene mayor inventario de hidrocarburos, lo que incrementa la magnitud potencial de las consecuencias.
Complejidad operacional	Alta (más sistemas, equipos e interconexiones)	Media (menor cantidad de sistemas y equipos)	La mayor complejidad en Planta A genera más escenarios y mayores posibilidades de fallas operativas.
Operaciones principales	Recepción, almacenamiento y transferencia	Recepción y despacho	La transferencia en Planta A incrementa las oportunidades de ocurrencia de eventos no deseados.
Combustibles manejados	Combustibles líquidos inflamables (diesel, gasolina, turbo, etc.)	Combustibles líquidos inflamables (gasolina IA, diesel, turbo, etc.)	Ambas manejan combustibles inflamables, destacando la presencia de gasolina IA en Planta B, de alta volatilidad.
Riesgos principales	Incendios, explosiones y pérdidas de contención	Incendios, explosiones y pérdidas de contención	Los riesgos son similares, pero las consecuencias dependen de la capacidad, configuración y tipo de combustible.
Estudios realizados	HAZOP, ETA y EAC	HAZOP, ETA y EAC	Ambas plantas cuentan con estudios completos que permiten un análisis comparativo consistente.
Escenarios HAZOP identificados	221 escenarios	302 escenarios	El mayor número de escenarios en Planta B se debe al alcance y nivel de detalle del estudio realizado.

Figura 5. Esquema comparativo de las plantas evaluadas.

Las diferencias operativas identificadas entre ambas instalaciones permitieron establecer condiciones distintas de comportamiento del riesgo de procesos. La Planta A presentó mayor complejidad operacional debido a la cantidad de sistemas involucrados en las operaciones de recepción y transferencia de hidrocarburos líquidos, mientras que la Planta B presentó escenarios asociados a combustibles de alta inflamabilidad que incrementan la severidad potencial de determinadas consecuencias accidentales.

Asimismo, la diferencia en la cantidad de escenarios identificados mediante HAZOP evidencia variaciones relacionadas con la configuración operacional, alcance de los estudios desarrollados y criterios de evaluación aplicados en cada instalación. Estas características permitieron desarrollar un análisis comparativo orientado a evaluar diferencias en el comportamiento de la seguridad de procesos entre ambas plantas.

5.2 Resultados del análisis HAZOP

El análisis HAZOP permitió identificar desviaciones operativas, causas, consecuencias y salvaguardas asociadas a los procesos de almacenamiento y transferencia de hidrocarburos líquidos en la Planta A y Planta B.

La revisión de los estudios HAZOP evidenció diferencias relacionadas con complejidad operacional, cantidad de escenarios identificados y configuración de los sistemas de almacenamiento presentes en ambas instalaciones.

La Planta A presentó un total de 221 escenarios evaluados mediante HAZOP, asociados principalmente a operaciones de recepción, almacenamiento y transferencia de hidrocarburos líquidos. Por otro lado, la Planta B presentó un total de 302 escenarios identificados, relacionados principalmente con operaciones de recepción y despacho de combustibles líquidos inflamables.

Los escenarios identificados en ambas instalaciones estuvieron asociados principalmente a pérdida de contención, sobrellenado de tanques, fugas en líneas de transferencia, fallas de bombas, sobrepresión y errores operativos, los cuales pueden generar incendios, explosiones y afectaciones operativas

.

Tabla 11. Principales desviaciones identificadas mediante HAZOP.

Desviación identificada	Planta A	Planta B	Consecuencia potencial
Sobrellenado de tanque	Sí	Sí	Derrame e incendio
Pérdida de flujo	Sí	Sí	Interrupción operacional
Sobrepresión	Sí	No	Fuga o ruptura de línea
Fuga en línea de transferencia	Sí	Sí	Pool Fire
Falla de bomba	Sí	Sí	Interrupción de transferencia
Error operativo	Sí	Sí	Derrame o incendio
Falla de válvula	Sí	Sí	Liberación de hidrocarburos
Pérdida de contención	Sí	Sí	Incendio o explosión

Fuente: Elaboración propia con base en los estudios HAZOP analizados.

EJEMPLO DE ESCENARIO HAZOP – PLANTA A

Instalación: Planta de Almacenamiento de Hidrocarburos Líquidos – Planta A
Proceso: Transferencia de combustible desde tanque de almacenamiento a camión cisterna
Estudio: HAZOP
Equipo de trabajo: Líder HAZOP, Operaciones, Mantenimiento, Seguridad de Procesos
Alcance del estudio: Sistema de recepción, almacenamiento y transferencia de combustible

INFORMACIÓN DEL NODO

Nodo / Tag: T-101 / L-101 / P-101 / XV-101
Descripción del nodo: Línea de transferencia de combustible desde el Tanque T-101 hacia camión cisterna a través de bomba P-101
Condiciones normales: Transferencia de combustible por bomba con válvula de control abierta

N°	PARÁMETRO	GUÍA (Desviación)	CAUSA POSIBLE	CONSECUENCIA	SEVERIDAD (Aplicando leyenda)	SALVAGUARDAS EXISTENTES	RECOMENDACIONES
1	**Flujo**	Más flujo	• Falla en válvula de control (XV-101) abierta. • Error operativo (apertura mayor a la requerida). • Falla en el controlador de flujo.	• Sobrellenado del camión cisterna. • Derrame de combustible. • Incendio por formación de pool fire.	**A** (Alta)	• Alarma de alto nivel en camión cisterna. • Válvula de bloqueo de emergencia (ESDV-101). • Procedimiento operativo.	• Verificar calibración de controlador de flujo. • Capacitación al personal operativo.
2	**Flujo**	Menos flujo	• Falla parcial en bomba P-101. • Filtro de succión obstruido. • Válvula parcialmente cerrada.	• Transferencia incompleta. • Retrasos operativos.	**M** (Media)	• Indicador de presión diferencial en filtro. • Indicador de presión en descarga.	• Limpieza periódica de filtros. • Plan de mantenimiento preventivo de bombas.
3	**Presión**	Más presión	• Línea bloqueada en la descarga. • Válvula cerrada aguas abajo. • Expansión térmica del producto.	• Ruptura de línea. • Liberación de combustible. • Incendio o explosión.	**C** (Crítica)	• Válvula de alivio (PSV-101). • Indicador de presión con alarma. • Sistema de detección de fugas.	• Verificar capacidad de PSV. • Inspección periódica de líneas.
4	**Temperatura**	Más temperatura	• Producto recirculando caliente. • Exposición solar en línea. • Falla en sistema de enfriamiento.	• Incremento de presión. • Formación de vapores inflamables. • Riesgo de incendio.	**A** (Alta)	• Medición de temperatura en línea. • Monitoreo de temperatura.	• Aislamiento térmico en líneas expuestas. • Monitoreo continuo.
5	**Nivel**	Más nivel	• Sobrellenado del camión cisterna. • Falla en alarma de alto nivel.	• Derrame de combustible. • Incendio (pool fire). • Contaminación ambiental.	**A** (Alta)	• Alarma de alto nivel en camión. • Paro automático de bomba.	• Probar alarmas de nivel periódicamente. • Verificar lógica de paro automático.
6	**Válvula**	No abre	• Falla mecánica en XV-101. • Falla en actuador. • Falta de aire/instrumento.	• No se realiza transferencia. • Paralización de operación.	**M** (Media)	• Indicador de posición. • Procedimiento de verificación previo.	• Mantenimiento preventivo de válvulas. • Verificar suministro de aire.
7	**Válvula**	No cierra	• Falla en actuador. • Obstrucción mecánica. • Falla en señal de cierre.	• Imposibilidad de detener flujo. • Sobrellenado. • Derrame e incendio.	**A** (Alta)	• Válvula de bloqueo de emergencia (ESDV-101). • Procedimiento operativo.	• Prueba de cierre de válvulas. • Revisión de lógica de instrumentación.
8	**Instrumento**	Lectura incorrecta	• Falla en transmisor de presión/flujo. • Descalibración. • Pérdida de señal.	• Decisiones operativas incorrectas. • Riesgo de sobrellenado o sobrepresión. • Derrame o incendio.	**B** (Baja)	• Instrumentos redundantes críticos. • Alarmas independientes.	• Calibración periódica. • Verificación funcional de instrumentos.

LEYENDA DE CONSECUENCIAS:

- **B – Baja**: Daño menor o afectación leve.
- **M – Media**: Lesión menor o daño moderado.
- **A – Alta**: Lesión grave o daño mayor.
- **C – Crítica**: Múltiples fatalidades o daño catastrófico.

Figura 6. Ejemplo de escenario evaluado mediante metodología HAZOP.

5.2.1 Escenarios críticos identificados mediante HAZOP

Los estudios HAZOP analizados permitieron identificar escenarios operacionales de alta criticidad asociados principalmente a pérdida de contención de hidrocarburos líquidos inflamables, sobrellenado de tanques, fugas en líneas de transferencia y fallas operativas durante las operaciones de recepción y despacho de combustibles.

Entre los escenarios de mayor relevancia se identificaron eventos relacionados con derrames de combustible durante operaciones de transferencia hacia camiones cisterna, debido a la interacción entre equipos, líneas de transferencia y operación manual, factores que incrementan la probabilidad de ocurrencia de errores operativos y liberaciones accidentales de hidrocarburos inflamables.

Asimismo, se identificaron escenarios asociados a fallas en válvulas de control, sobrepresión en líneas de transferencia y fallas de instrumentación, los cuales podrían generar incendios tipo Pool Fire y afectaciones operativas sobre instalaciones cercanas.

En la Planta A, los escenarios críticos estuvieron relacionados principalmente con operaciones de transferencia y almacenamiento de grandes volúmenes de hidrocarburos líquidos, mientras que en la Planta B destacaron escenarios asociados a combustibles de alta inflamabilidad y operaciones de despacho de combustibles líquidos.

Los escenarios identificados mediante HAZOP constituyeron la base para el posterior desarrollo de los análisis ETA y Estudios de Alcance de Consecuencias (EAC), permitiendo evaluar la evolución potencial de los eventos accidentales y la severidad de sus consecuencias.

Tabla 12. Principales escenarios críticos identificados mediante HAZOP.

Escenario crítico identificado	Instalación de mayor representatividad	Consecuencia potencial
Sobrellenado de tanque de almacenamiento	Planta A	Derrame de combustible, incendio tipo Pool Fire y afectación operacional
Fuga en línea de transferencia de hidrocarburos	Planta A y Planta B	Pérdida de contención e incendio
Falla de válvula de control	Planta A	Liberación de hidrocarburos y pérdida de control operacional
Derrame durante carga o descarga de camión cisterna	Planta B	Incendio, afectación operacional y exposición del personal

Sobrepresión en líneas de transferencia	Planta A	Ruptura de línea y liberación de combustible inflamable
Falla de instrumentación o alarmas	Planta A y Planta B	Operación insegura y aumento de probabilidad de incidentes
Error operativo durante transferencia	Planta A y Planta B	Derrame de combustible y afectación operacional
Pérdida de contención de hidrocarburos líquidos	Planta A y Planta B	Incendio, explosión y afectación a instalaciones cercanas

Fuente: Elaboración propia con base en los estudios HAZOP analizados.

Tabla 13. Comparación de resultados HAZOP entre las plantas evaluadas.

Parámetro	Planta A	Planta B
Nodos analizados	21	9
Escenarios HAZOP identificados	221	302
Tipo de operación predominante	Recepción marítima y terrestre	Recepción terrestre
Complejidad operacional	Alta	Media
Principales desviaciones	Sobrellenado, fuga, alta presión	Fuga, derrame, error operativo
Principales consecuencias	Incendio, derrame, pérdida de contención	Incendio, Flash Fire, derrame
Salvaguardas predominantes	SCI, válvulas, alarmas	SCI, válvulas, alarmas

Fuente: Elaboración propia con base en los estudios HAZOP.

Los resultados del análisis HAZOP evidencian diferencias importantes entre ambas instalaciones. La Planta A presentó un mayor número de nodos evaluados y una mayor complejidad operacional debido a sus operaciones de recepción marítima, almacenamiento y despacho de combustibles. En contraste, la Planta B presentó un menor número de nodos; sin embargo, registró una mayor cantidad de escenarios HAZOP identificados (302 frente a 221), lo que evidencia una mayor frecuencia de desviaciones potenciales dentro de los procesos evaluados. Estos resultados demuestran que el número de escenarios identificados no depende exclusivamente del tamaño de la instalación, sino también del alcance del estudio, las características operativas y las condiciones particulares de cada proceso analizado.

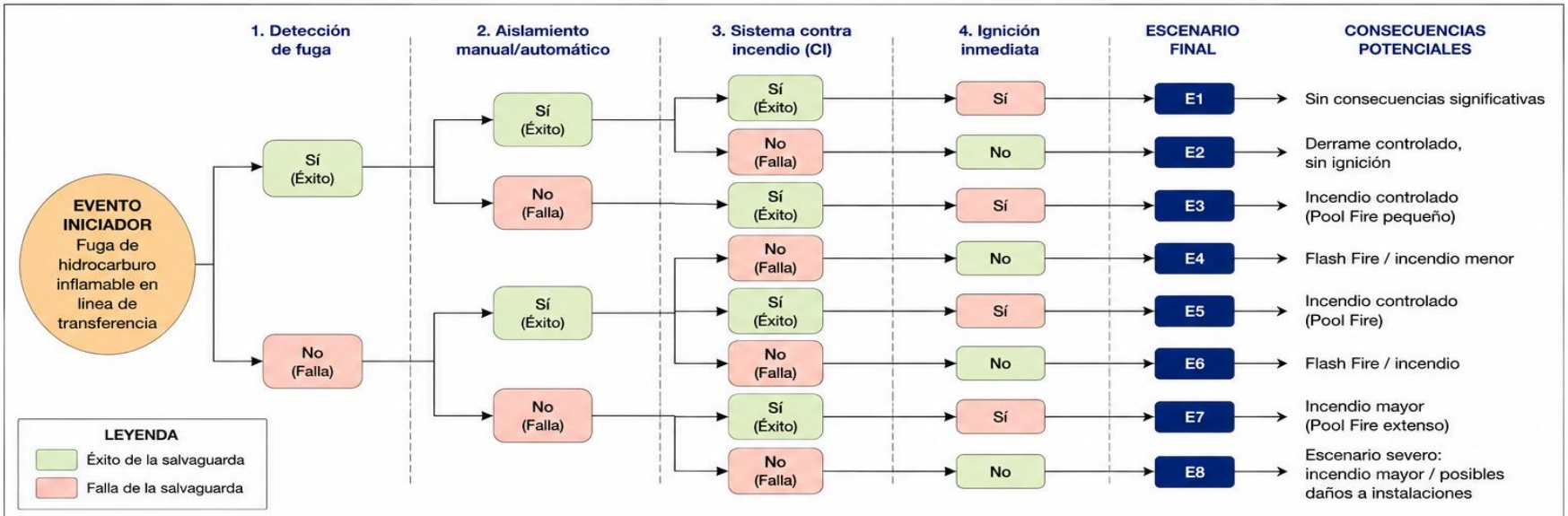
5.3 Resultados del análisis ETA

El análisis de Árbol de Eventos (ETA) permitió evaluar la evolución potencial de los escenarios críticos identificados previamente mediante la metodología HAZOP en la Planta A y Planta B.

Los análisis ETA revisados en ambas instalaciones permitieron identificar secuencias accidentales derivadas de eventos iniciadores asociados principalmente a pérdida de contención de hidrocarburos líquidos inflamables, fugas en líneas de transferencia, sobrellenado de tanques y derrames durante operaciones de transferencia hacia camiones cisterna.

La metodología ETA permitió analizar el comportamiento de las salvaguardas implementadas en ambas plantas, considerando escenarios relacionados con detección de fugas, activación de sistemas contra incendio, aislamiento operacional y control de emergencias.

Los resultados evidenciaron que la efectividad de las salvaguardas influye directamente en la evolución de los escenarios accidentales y en la severidad de las consecuencias potenciales asociadas a incendios y explosiones.



RESUMEN DE SECUENCIAS ACCIDENTALES IDENTIFICADAS

Escenario Final	Descripción de la Secuencia	Probabilidad Cualitativa	Consecuencia Potencial	Nivel de Riesgo (Resultado)
E1	Fuga detectada, aislamiento exitoso, sistema CI actúa, no hay ignición.	Baja	Sin consecuencias significativas	Bajo
E2	Fuga detectada, aislamiento exitoso, sistema CI no actúa, sin ignición.	Baja	Derrame controlado, sin ignición	Bajo
E3	Fuga detectada, aislamiento exitoso, sistema CI actúa, con ignición.	Media	Incendio controlado (Pool Fire pequeño)	Medio
E4	Fuga detectada, aislamiento exitoso, sistema CI no actúa, con ignición.	Media	Flash Fire / incendio menor	Medio
E5	Fuga detectada, aislamiento falla, sistema CI actúa, con ignición.	Media	Incendio controlado (Pool Fire)	Alto
E6	Fuga detectada, aislamiento falla, sistema CI no actúa, con ignición.	Alta	Flash Fire / incendio	Alto
E7	Fuga no detectada, aislamiento falla, sistema CI actúa, con ignición.	Alta	Incendio mayor (Pool Fire extenso)	Muy Alto
E8	Fuga no detectada, aislamiento falla, sistema CI no actúa, con ignición.	Muy Alta	Escenario severo: incendio mayor / posibles daños a instalaciones	Muy Alto

Figura 7. Ejemplo simplificado de análisis ETA para fuga de hidrocarburo inflamable en la línea de transferencia.

La Figura 7 evidencia que la evolución de un evento iniciador asociado a fuga de hidrocarburo inflamable depende directamente del funcionamiento de las salvaguardas implementadas en la instalación. Cuando los sistemas de detección, aislamiento y control actúan correctamente, las consecuencias pueden limitarse a derrames controlados o incendios de menor severidad.

Sin embargo, la falla simultánea de las barreras de protección incrementa significativamente la severidad de las consecuencias potenciales, pudiendo evolucionar hacia incendios mayores tipo Pool Fire, Flash Fire y afectaciones importantes sobre instalaciones y personal operativo.

Asimismo, el análisis ETA demuestra la importancia de los sistemas de detección temprana, válvulas de aislamiento y sistemas contra incendio como elementos fundamentales dentro de la gestión de seguridad de procesos en instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos.

Tabla 14. Principales secuencias accidentales identificadas mediante ETA.

Evento iniciador	Salvaguarda evaluada	Resultado potencial
Fuga en línea de transferencia	Sistema de detección	Control de fuga
Derrame durante transferencia	Sistema contra incendio	Mitigación de incendio
Sobrellenado de tanque	Alarma de nivel	Derrame controlado
Falla de válvula	Aislamiento operacional	Liberación mitigada
Pérdida de contención	Falla de salvaguardas	Pool Fire
Liberación de vapores inflamables	Presencia de ignición	Flash Fire
Falla simultánea de barreras	Sin control operacional	Escenario severo

Fuente: Elaboración propia con base en los análisis ETA revisados.

Los resultados del análisis ETA evidenciaron que la evolución de los escenarios accidentales depende significativamente del funcionamiento de las salvaguardas implementadas en cada instalación.

En ambas plantas se identificó que las fallas asociadas a pérdida de contención de hidrocarburos líquidos pueden evolucionar hacia incendios tipo Pool Fire y Flash Fire cuando las barreras de detección, aislamiento y control no actúan de manera efectiva.

Asimismo, la presencia de combustibles inflamables y operaciones de transferencia incrementa la probabilidad de formación de atmósferas inflamables capaces de generar incendios y afectaciones operativas.

En la Planta A, la mayor complejidad operacional incrementa la cantidad de posibles secuencias accidentales asociadas a fallas operativas y sistemas de transferencia. Por otro lado, en la Planta B, las operaciones de despacho mediante camiones cisterna incrementan la exposición a escenarios relacionados con derrames y liberación de vapores inflamables.

Los resultados obtenidos mediante ETA permitieron identificar escenarios con potencial de afectación significativa, los cuales fueron posteriormente evaluados mediante Estudios de Alcance de Consecuencias (EAC) para determinar radios de afectación y severidad de los eventos accidentales.

Los escenarios de mayor severidad identificados mediante el análisis ETA fueron posteriormente evaluados mediante Estudios de Alcance de Consecuencias (EAC), permitiendo determinar radios de afectación, niveles de radiación térmica y severidad potencial de los eventos accidentales asociados a incendios y explosiones en ambas instalaciones.

Tabla 15. Comparación de resultados ETA entre las plantas evaluadas.

Parámetro	Planta A	Planta B
Evento iniciador predominante	Fuga en transferencia	Derrame en camión cisterna
Escenario resultante principal	Pool Fire	Flash Fire
Dependencia de salvaguardas	Alta	Alta
Potencial de escalamiento	Alto	Alto
Consecuencia predominante	Incendio de gran magnitud	Incendio y posible explosión

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados ETA evidencian que ambas instalaciones dependen significativamente del desempeño de sus salvaguardas para evitar la evolución de eventos

iniciadores hacia accidentes mayores. Sin embargo, la Planta A presenta una mayor complejidad asociada a sus operaciones de transferencia y almacenamiento, mientras que la Planta B presenta una mayor susceptibilidad a escenarios relacionados con combustibles altamente volátiles.

5.4 Resultados del análisis de consecuencias (EAC)

El Estudio de Alcance de Consecuencias (EAC) permitió evaluar los efectos potenciales asociados a los escenarios accidentales identificados previamente mediante los análisis HAZOP y ETA en la Planta A y Planta B.

Los estudios analizados incluyeron modelamiento de escenarios asociados a pérdida de contención de hidrocarburos líquidos inflamables, incendios tipo Pool Fire, Flash Fire y posibles explosiones de nube de vapor (VCE), utilizando software especializado PHAST y EFFECTS.

Los resultados obtenidos permitieron estimar radios de afectación, niveles de radiación térmica y severidad potencial de las consecuencias sobre personas, equipos e infraestructura.

Los escenarios de mayor criticidad estuvieron asociados principalmente a fugas de hidrocarburos inflamables durante operaciones de transferencia, derrames en zonas de almacenamiento y liberaciones de vapores inflamables con potencial de ignición.

Tabla 16. Principales escenarios modelados mediante EAC.

Escenario evaluado	Planta asociada	Consecuencia principal
Pool Fire por derrame de combustible	Planta A	Radiación térmica elevada
Flash Fire por liberación de vapores	Planta B	Afectación por propagación de llama
Pérdida de contención en línea	Planta A y Planta B	Incendio y afectación operacional
Derrame durante transferencia	Planta B	Incendio localizado
Sobrellenado de tanque	Planta A	Derrame e incendio severo

Liberación de vapores inflamables	Planta A y Planta B	Riesgo de ignición y explosión

Fuente: Elaboración propia con base en los estudios EAC analizados.

Tabla 17. Comparación de radios de afectación identificados en los escenarios evaluados.

Parámetro evaluado	Planta A	Planta B
Mayor radio térmico identificado	75 m	86.88 m
Escenario predominante	Pool Fire	Flash Fire
Nivel de severidad	Alto	Alto
Riesgo asociado	Incendio severo	Propagación de llama
Afectación potencial	Equipos e infraestructura	Personal y áreas operativas

Fuente: Elaboración propia con base en los estudios EAC analizados.

Los resultados del EAC evidenciaron que ambas instalaciones presentan escenarios con potencial de generar consecuencias severas asociadas a incendios y pérdida de contención de hidrocarburos líquidos inflamables.

La Planta A presentó escenarios asociados a mayores volúmenes de almacenamiento y operaciones de transferencia más complejas, situación que incrementa la magnitud potencial de las consecuencias relacionadas con incendios tipo Pool Fire y afectación térmica sobre instalaciones cercanas.

Por otro lado, la Planta B presentó determinados escenarios con mayores radios de afectación térmica asociados a combustibles de alta inflamabilidad y liberación de vapores inflamables, incrementando el riesgo de propagación rápida de llama y afectación sobre personal operativo.

Asimismo, los resultados obtenidos evidenciaron que la severidad de las consecuencias depende no solo de la capacidad de almacenamiento, sino también de factores relacionados con tipo de combustible, condiciones operativas, efectividad de las salvaguardas y comportamiento de los escenarios accidentales.

Los estudios EAC permitieron cuantificar la severidad potencial de los escenarios críticos identificados en ambas instalaciones, proporcionando información relevante para

el fortalecimiento de la seguridad de procesos y la implementación de medidas orientadas a reducir riesgos operacionales.

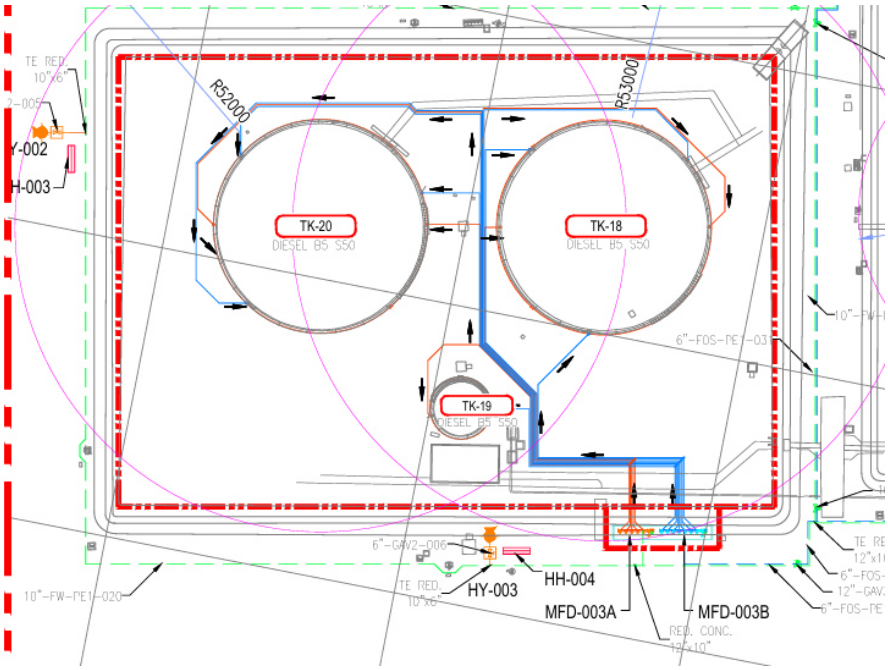


Figura 8. Radios de afectación térmica en los tanques de mayor capacidad de almacenamiento de la Planta A (TK-18 y TK-20). Extraído del Estudio de Alcance de Consecuencias de la Planta A.

En la figura 8 de la Planta A se observa que los tanques TK-18 y TK-20 presentan especial relevancia dentro del análisis de consecuencias debido a que corresponden a los tanques de mayor capacidad de almacenamiento del terminal. Ambos almacenan Diésel B5 S50 y concentran una parte significativa del inventario total de hidrocarburos de la instalación. En consecuencia, escenarios de pérdida de contención o incendio asociados a estos tanques poseen el potencial de generar mayores niveles de afectación térmica y consecuencias operacionales más severas en comparación con tanques de menor capacidad.

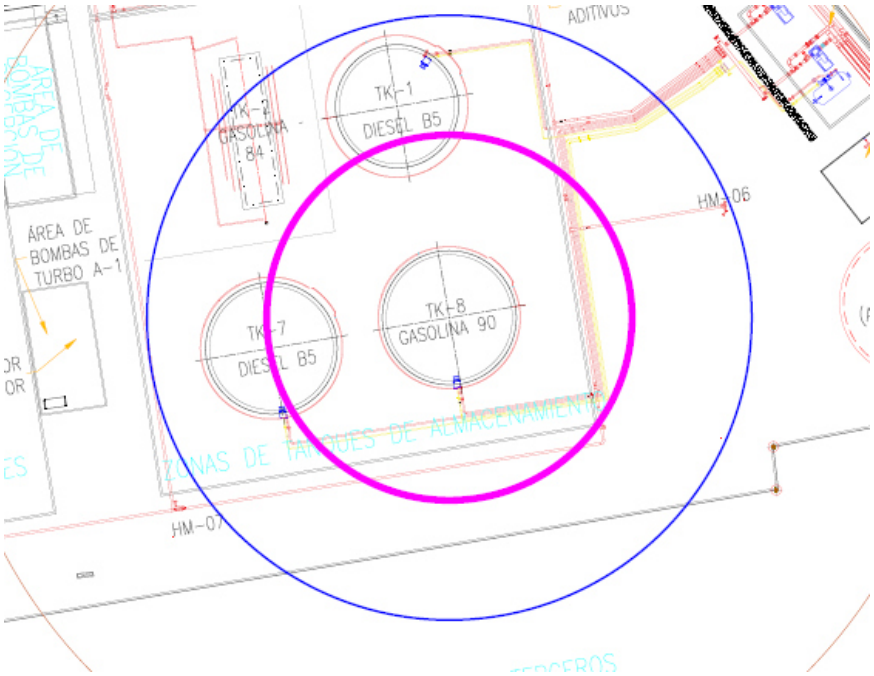


Figura 9. Radios de afectación térmica en tanques de almacenamiento de la Planta B.

El análisis de consecuencias realizado para la Planta B identificó como escenario de mayor severidad la liberación instantánea del contenido completo del tanque vertical TK-08 de gasolina. Este evento genera un derrame aproximado de 325 m³, con una masa evaporada de 163.78 toneladas y potencial de formación de nube inflamable susceptible de explosión. Los resultados obtenidos evidencian que la gasolina constituye el producto con mayor capacidad de generar efectos fuera de la zona de contención debido a su elevada volatilidad. El escenario fue clasificado con potencial de explosión (VCE), constituyendo uno de los eventos críticos considerados para la evaluación cuantitativa del riesgo.

Los resultados obtenidos mediante los Estudios de Alcance de Consecuencias permitieron identificar diferencias significativas entre la Planta A y la Planta B respecto a la magnitud de los escenarios accidentales evaluados.

La Planta A presenta una mayor capacidad de almacenamiento de hidrocarburos líquidos, destacando los tanques TK-18 y TK-20, los cuales constituyen los tanques de mayor inventario de combustible dentro de la instalación. Esta condición incrementa el potencial de severidad de los escenarios asociados a pérdida de contención e incendios de gran magnitud.

Por otro lado, la Planta B presenta escenarios asociados principalmente a gasolina y operaciones de recepción mediante camiones cisterna, identificándose como uno de los eventos más severos la liberación instantánea del contenido completo del tanque TK-08 de gasolina, con potencial de generar incendios y explosiones debido a la elevada volatilidad del producto almacenado.

Los resultados evidencian que la severidad de las consecuencias no depende únicamente de la capacidad de almacenamiento, sino también de las propiedades fisicoquímicas de los combustibles, las condiciones operativas y la efectividad de las salvaguardas implementadas en cada instalación.

Tabla 18. Comparación de resultados del Estudio de Alcance de Consecuencias.

Parámetro comparado	Planta A (Salaverry)	Planta B (Tarapoto)
Capacidad total de almacenamiento	291,239 barriles	Menor capacidad de almacenamiento
Tanques de mayor relevancia	TK-18 y TK-20 (Diésel B5 S50)	TK-08 (Gasolina)
Producto crítico identificado	Diésel B5 S50	Gasolina
Escenario representativo	Incendio asociado a tanques de gran capacidad	Liberación total del TK-08
Potencial de incendio	Alto	Alto
Potencial de explosión	Presente en escenarios específicos	Elevado debido a gasolina
Principal factor de riesgo	Gran inventario almacenado	Alta volatilidad del combustible
Consecuencia predominante	Radiación térmica sobre instalaciones	Incendio y posible explosión

Fuente: Elaboración propia con base en los EAC de ambas instalaciones.

5.4.1 Análisis comparativo de los resultados obtenidos.

La comparación de los resultados obtenidos mediante los Estudios de Alcance de Consecuencias permitió identificar diferencias relevantes entre la Planta A y la Planta B respecto a la naturaleza y severidad de los escenarios accidentales evaluados.

La Planta A presenta un mayor potencial de consecuencias asociado al volumen de hidrocarburos almacenados, destacando los tanques TK-18 y TK-20, los cuales corresponden a los tanques de mayor capacidad de almacenamiento de la instalación. Esta condición incrementa el potencial de afectación térmica y la severidad de los escenarios asociados a pérdida de contención e incendios de gran magnitud.

Por otro lado, la Planta B presenta escenarios críticos asociados principalmente al almacenamiento y manipulación de gasolina, identificándose como uno de los eventos más severos la liberación instantánea del contenido completo del tanque TK-08. Debido a la alta volatilidad de este combustible, se evidenció la posibilidad de formación de nubes inflamables con potencial de ignición y explosión, incrementando la exposición a escenarios tipo Flash Fire y Vapor Cloud Explosion (VCE).

Asimismo, se observa que ambas instalaciones presentan riesgos inherentes a las operaciones de almacenamiento y transferencia de combustibles líquidos; sin embargo, la naturaleza de dichos riesgos difiere debido a las características operativas, capacidad de almacenamiento y propiedades fisicoquímicas de los productos manejados en cada planta.

En términos de seguridad de procesos, los resultados permiten concluir que la Planta A presenta una mayor severidad potencial asociada al inventario almacenado y a la magnitud de los escenarios de incendio evaluados, mientras que la Planta B presenta una mayor susceptibilidad a escenarios relacionados con la volatilidad de la gasolina y la generación de atmósferas inflamables con potencial de explosión. Estos resultados evidencian la necesidad de implementar estrategias de gestión de riesgos adaptadas a las condiciones particulares de cada instalación, orientadas al fortalecimiento de la seguridad de procesos.

5.5 Comparación integral de la seguridad de procesos entre la Planta A y la Planta B

Tabla 19. Comparación integral de los resultados obtenidos.

Criterio	Planta A	Planta B
Capacidad de almacenamiento	291 239 barriles	7 105 barriles
Número de tanques	15	8
Nodos HAZOP	21	9

Escenarios HAZOP	221	302
Complejidad operativa	Alta	Media
Recepción de combustible	Marítima y terrestre	Terrestre
Escenario crítico principal	Incendio en tanques de gran capacidad	Liberación total TK-08
Producto crítico	Diésel B5 S50	Gasolina
Potencial de explosión	Moderado	Elevado
Mayor radio de afectación	75 m	86.88 m
Principal consecuencia	Radiación térmica sobre instalaciones	Flash Fire y VCE

Los resultados evidencian que la Planta A presenta una mayor complejidad operacional debido a su elevada capacidad de almacenamiento, mayor número de tanques y operaciones de recepción marítima y terrestre. Estas características incrementan el inventario total de hidrocarburos y, por consiguiente, el potencial de severidad de los escenarios accidentales asociados a pérdida de contención e incendios.

Por otro lado, la Planta B presenta una menor capacidad de almacenamiento; sin embargo, registra una mayor cantidad de escenarios identificados mediante HAZOP y escenarios de elevada severidad asociados al manejo de gasolina, combustible con alta volatilidad y potencial de formación de nubes inflamables.

Asimismo, los resultados del EAC muestran que la Planta B alcanzó radios de afectación superiores en determinados escenarios, mientras que la Planta A presentó consecuencias potenciales asociadas a mayores inventarios de combustible. Esto demuestra que la severidad de las consecuencias no depende únicamente del volumen almacenado, sino también de las propiedades fisicoquímicas del producto y de las condiciones operativas de cada instalación.

En términos generales, la Planta A presenta un mayor riesgo asociado a la magnitud de los inventarios almacenados y a la complejidad de sus operaciones, mientras que la Planta B presenta una mayor susceptibilidad a escenarios de incendio y explosión debido a la presencia de combustibles altamente inflamables.

VI. DISCUSIÓN

6.1 Discusión de resultados.

Los resultados obtenidos mediante los estudios HAZOP, ETA y EAC permitieron identificar diferencias relevantes en la seguridad de procesos de las instalaciones evaluadas. La Planta A presentó una mayor complejidad operacional debido a su capacidad de almacenamiento de aproximadamente 291 239 barriles, la presencia de operaciones de recepción marítima y terrestre, así como un mayor número de nodos analizados dentro del estudio HAZOP.

Por otro lado, la Planta B presentó una menor capacidad de almacenamiento, cercana a 7 105 barriles; sin embargo, registró una mayor cantidad de escenarios HAZOP identificados y escenarios críticos asociados al manejo de gasolina y combustible de aviación.

Los resultados obtenidos evidencian que la capacidad de almacenamiento constituye un factor importante dentro de la seguridad de procesos, ya que incrementa el inventario de sustancias peligrosas y la magnitud potencial de las consecuencias ante eventos accidentales. No obstante, los análisis realizados demostraron que la severidad de los escenarios no depende exclusivamente del volumen almacenado, sino también de las propiedades fisicoquímicas de los combustibles, la configuración operacional y la efectividad de las salvaguardas implementadas.

Asimismo, los estudios ETA y EAC permitieron identificar escenarios asociados a incendios tipo Pool Fire, Flash Fire y explosión de nube de vapor (VCE), evidenciándose diferencias en la evolución y consecuencias de los eventos accidentales entre ambas instalaciones. En la Planta A predominan los escenarios asociados a grandes inventarios de combustible, mientras que en la Planta B adquieren especial relevancia los escenarios vinculados a combustibles de alta volatilidad, particularmente gasolina Clase IA.

De manera complementaria, el análisis comparativo desarrollado en el Capítulo V permitió evidenciar que ambas instalaciones presentan perfiles de riesgo distintos. La Planta A concentra un mayor potencial de afectación debido a la magnitud de los inventarios almacenados y a la complejidad de sus operaciones, mientras que la Planta B presenta una mayor susceptibilidad a escenarios relacionados con la generación de atmósferazWs inflamables y eventos con potencial de explosión. Estos hallazgos

demuestran que la gestión de la seguridad de procesos debe adaptarse a las características particulares de cada instalación y no basarse únicamente en la capacidad de almacenamiento.

6.2 Contrastación de los hallazgos con la literatura.

6.2.1 Comparación de los resultados HAZOP con estudios previos.

Los resultados obtenidos mediante la metodología HAZOP permitieron identificar 221 escenarios en la Planta A y 302 escenarios en la Planta B, evidenciando la presencia de desviaciones asociadas principalmente a pérdida de contención, sobrellenado, fugas, fallas operativas y errores humanos. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Fuentes-Bargues, González-Cruz y González-Gaya (2017), quienes identificaron que las operaciones de almacenamiento y transferencia de combustibles constituyen las principales fuentes de riesgo dentro de terminales de hidrocarburos debido a la posibilidad de generar incendios, explosiones y derrames.

Asimismo, los resultados guardan relación con lo señalado por Enco Zamora (2024), quien concluyó que las desviaciones relacionadas con operación, mantenimiento e integridad de equipos representan factores determinantes en la generación de escenarios de riesgo dentro de instalaciones de almacenamiento de combustibles líquidos. Los resultados obtenidos en ambas plantas confirman la utilidad de la metodología HAZOP como herramienta para la identificación sistemática de peligros y desviaciones operativas.

6.2.2 Comparación de los resultados ETA con estudios previos

Los resultados del análisis ETA evidenciaron que la efectividad de las salvaguardas implementadas influye directamente en la evolución de los escenarios accidentales. Este resultado coincide con los principios establecidos por el Center for Chemical Process Safety (CCPS, 2008), donde se señala que las barreras de protección constituyen elementos fundamentales para prevenir la evolución de eventos iniciadores hacia accidentes mayores.

De igual manera, Hernández Sánchez (2017) concluyó que las fallas simultáneas de sistemas de control y protección incrementan significativamente la probabilidad de incendios y explosiones en instalaciones de almacenamiento de combustibles. En ambas plantas evaluadas se observó que la pérdida de efectividad de sistemas de detección,

aislamiento o respuesta puede favorecer la evolución de eventos hacia escenarios tipo Pool Fire, Flash Fire o explosiones de nube de vapor.

Asimismo, la metodología ETA permitió evidenciar la importancia de mantener barreras preventivas y mitigadoras en condiciones operativas adecuadas, debido a que el desempeño de estas salvaguardas influye directamente en la reducción del riesgo residual.

6.2.3 Comparación de los resultados EAC con estudios previos.

Los resultados obtenidos mediante los Estudios de Alcance de Consecuencias demostraron que la severidad de los escenarios accidentales depende no solo del volumen almacenado, sino también de las propiedades fisicoquímicas del combustible involucrado. Este resultado coincide con lo señalado por Mannan (2012), quien indica que la volatilidad, presión de vapor y condiciones de liberación constituyen variables determinantes en la magnitud de los efectos físicos derivados de incendios y explosiones.

De igual forma, TNO (2005) establece que combustibles altamente volátiles, como las gasolinas, poseen una mayor capacidad para generar nubes inflamables y escenarios de explosión tipo Vapor Cloud Explosion (VCE). Esta situación fue observada particularmente en la Planta B, donde los escenarios asociados al almacenamiento de gasolina presentaron radios de afectación relevantes a pesar de tratarse de una instalación con menor capacidad de almacenamiento.

Los resultados también guardan concordancia con García Lara (2022), quien destaca la importancia de los sistemas de agua contra incendio y de la infraestructura de protección para minimizar los efectos de eventos asociados al almacenamiento de combustibles. En ambas plantas evaluadas se observó que las barreras de protección constituyen un elemento fundamental para limitar la magnitud de las consecuencias potenciales derivadas de pérdidas de contención e incendios.

6.2.4 Comparación global entre ambas plantas.

La comparación integral desarrollada en la presente investigación permitió establecer que la capacidad de almacenamiento constituye un factor relevante dentro de la seguridad de procesos; sin embargo, no es el único elemento que determina el nivel de riesgo. Mientras la Planta A presentó una mayor complejidad operacional y mayores inventarios de hidrocarburos, la Planta B evidenció escenarios de elevada severidad asociados a combustibles altamente volátiles.

Este resultado complementa los planteamientos del CCPS (2008) y de Mannan (2012), quienes sostienen que el riesgo de procesos debe analizarse de manera integral considerando inventarios, propiedades de las sustancias, condiciones operativas y desempeño de las salvaguardas.

Asimismo, los resultados obtenidos muestran concordancia con Canoapaza Areche (2025) y Enco Zamora (2024), quienes identificaron que los sistemas de protección contra incendios y las barreras de mitigación constituyen elementos críticos para reducir la severidad de los escenarios asociados al almacenamiento de combustibles líquidos.

En consecuencia, los resultados obtenidos demuestran que la gestión de riesgos debe adaptarse a las características particulares de cada instalación y no basarse exclusivamente en la capacidad de almacenamiento, permitiendo establecer estrategias de prevención y mitigación acordes a los peligros específicos identificados.

6.3 Implicancias técnicas de la investigación

La presente investigación evidencia la importancia de la seguridad de procesos dentro de las operaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos, especialmente en instalaciones que manejan grandes volúmenes de sustancias inflamables y combustibles.

Los resultados obtenidos demuestran que metodologías como HAZOP, ETA y EAC constituyen herramientas fundamentales para la identificación de peligros, evaluación de escenarios críticos y determinación de consecuencias potenciales en instalaciones industriales. Asimismo, permiten establecer medidas preventivas y salvaguardas orientadas a reducir la probabilidad y severidad de eventos accidentales.

La comparación entre la Planta A y la Planta B permitió identificar que el incremento de la capacidad operativa genera una mayor complejidad de procesos y una mayor magnitud potencial de las consecuencias asociadas a pérdida de contención, incendios y explosiones. Sin embargo, también se evidenció que instalaciones de menor capacidad pueden presentar escenarios críticos importantes cuando almacenan combustibles altamente inflamables.

Asimismo, la investigación resalta la importancia de mantener sistemas de mitigación, procedimientos operativos, inspecciones periódicas y programas de mantenimiento orientados al fortalecimiento de la seguridad de procesos y reducción del riesgo residual.

Desde el punto de vista técnico, los resultados obtenidos pueden servir como referencia para futuras evaluaciones de riesgo en instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos, así como para la implementación de estrategias de mejora continua relacionadas con prevención de accidentes mayores, gestión de integridad operativa y fortalecimiento de salvaguardas industriales.

Finalmente, la investigación demuestra la relevancia de integrar metodologías de análisis de riesgos y modelamiento de consecuencias dentro de la gestión operativa de plantas de hidrocarburos, con el propósito de fortalecer la seguridad industrial, proteger a las personas, preservar la infraestructura y minimizar los impactos potenciales sobre el medio ambiente.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- El análisis HAZOP permitió identificar los principales peligros operacionales y desviaciones presentes en los procesos de almacenamiento y transferencia de hidrocarburos líquidos en ambas instalaciones. Se identificaron escenarios asociados principalmente a fugas, derrames, sobrellenado, pérdida de contención, fallas operativas y eventos con potencial de incendio o explosión. Asimismo, se determinó que la Planta A presentó una mayor complejidad operacional debido a la diversidad de operaciones desarrolladas y a la magnitud de sus instalaciones, mientras que la Planta B registró una mayor cantidad de escenarios identificados durante el análisis HAZOP.

- El análisis de causas, consecuencias y salvaguardas permitió determinar que los escenarios de riesgo identificados se encuentran asociados principalmente a fallas de equipos, errores operativos, pérdida de integridad mecánica y desviaciones en los parámetros de operación. Asimismo, se evidenció la importancia de las salvaguardas existentes, tales como sistemas de detección, alarmas, válvulas de

seguridad, procedimientos operativos y sistemas de protección contra incendios, los cuales contribuyen a reducir la probabilidad de ocurrencia y la severidad de los eventos accidentales.

- La evaluación de los escenarios críticos mediante las metodologías ETA y EAC permitió determinar que los eventos con mayor potencial de consecuencias corresponden a incendios tipo Pool Fire, Flash Fire y explosiones de nube de vapor (VCE), derivados de pérdidas de contención de combustibles líquidos inflamables. Los resultados evidenciaron que la magnitud de las consecuencias depende tanto de la cantidad de producto involucrado como de las propiedades fisicoquímicas de los combustibles, las condiciones operativas y la efectividad de las barreras de protección implementadas.

- La comparación entre la Planta A y la Planta B permitió determinar que ambas instalaciones presentan riesgos inherentes asociados al almacenamiento y transferencia de hidrocarburos líquidos; sin embargo, la naturaleza de dichos riesgos difiere según sus características operativas. La Planta A presenta mayor complejidad operacional y mayor potencial de severidad debido a su capacidad de almacenamiento, magnitud de inventarios y diversidad de operaciones. Por otro lado, la Planta B muestra mayor susceptibilidad a escenarios asociados a combustibles altamente volátiles, particularmente gasolina, evidenciando que la severidad de las consecuencias no depende únicamente de la capacidad de almacenamiento.

- Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación integrada de las metodologías HAZOP, ETA y EAC constituye una herramienta eficaz para la identificación de peligros, evaluación de escenarios críticos y fortalecimiento de la seguridad de procesos en instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos. Asimismo, estas metodologías proporcionan información técnica relevante para la toma de decisiones orientadas a la prevención de accidentes mayores y a la mejora continua de la gestión del riesgo industrial.

7.2 Recomendaciones

- Fortalecer la aplicación periódica de metodologías de identificación de peligros y análisis de riesgos, tales como HAZOP, en las instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos, con la finalidad de detectar oportunamente nuevas

desviaciones operacionales, cambios en las condiciones de proceso y potenciales escenarios de riesgo que puedan comprometer la seguridad de las operaciones.

- Implementar programas continuos de capacitación y entrenamiento para el personal operativo y de mantenimiento, enfocados en la prevención de pérdidas de contención, respuesta ante emergencias, control de incendios y cumplimiento de procedimientos operativos seguros, con el propósito de reducir la probabilidad de errores humanos y fortalecer la cultura de seguridad de procesos.

- Realizar revisiones periódicas de los sistemas de protección y salvaguardas existentes, incluyendo sistemas de detección de incendios, alarmas, válvulas de seguridad, sistemas contra incendios y procedimientos de respuesta, a fin de garantizar su adecuado funcionamiento y mantener la efectividad de las barreras de prevención y mitigación frente a eventos accidentales.

- Actualizar de manera periódica los análisis ETA y EAC, especialmente cuando se produzcan modificaciones en las instalaciones, cambios operacionales o incrementos en la capacidad de almacenamiento, con la finalidad de mantener una evaluación actualizada de los escenarios críticos y de las posibles consecuencias derivadas de eventos accidentales.

- Implementar estrategias de gestión de riesgos diferenciadas para cada instalación, considerando las características particulares identificadas en la presente investigación. En la Planta A se recomienda priorizar medidas orientadas al control de riesgos asociados a grandes inventarios de hidrocarburos, fortaleciendo la gestión de integridad mecánica, sistemas de protección contra incendios y control de pérdidas de contención. Por su parte, en la Planta B se recomienda reforzar las medidas destinadas al control de escenarios asociados a combustibles altamente volátiles, particularmente gasolina, mediante el fortalecimiento de sistemas de detección temprana, control de atmósferas inflamables y prevención de eventos con potencial de explosión.

- Considerar la integración de herramientas de gestión de seguridad de procesos basadas en estándares internacionales, tales como las directrices del Center for Chemical Process Safety (CCPS) y las prácticas recomendadas por el American Petroleum Institute (API), con el propósito de fortalecer la gestión del riesgo,

mejorar el desempeño operacional y promover la mejora continua de la seguridad industrial.

- Promover el desarrollo de futuras investigaciones orientadas a la aplicación de metodologías cuantitativas de análisis de riesgo, simulación avanzada de consecuencias y evaluación de confiabilidad de salvaguardas, con el fin de complementar los resultados obtenidos y contribuir al fortalecimiento de la seguridad de procesos en instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos líquidos.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

American Petroleum Institute. (2013). API Recommended Practice 752: Management of hazards associated with location of process plant permanent buildings. API.

American Petroleum Institute. (2014). API Recommended Practice 575: Inspection practices for atmospheric and low-pressure storage tanks. API.

American Petroleum Institute. (2015). API Recommended Practice 353: Managing System Integrity of Terminals and Tank Facilities. API.

American Petroleum Institute. (2020). API Standard 650: Welded tanks for oil storage (13th ed.). API.

American Petroleum Institute. (2020). API Standard 653: Tank inspection, repair, alteration, and reconstruction. API.

Canoapaza Areche, J. A. (2025). Diseño de un sistema de protección contra incendios para mejorar la seguridad operativa en el almacenamiento de combustibles del Aeropuerto Internacional Jorge Chávez [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].

Center for Chemical Process Safety. (2008). Guidelines for Hazard Evaluation Procedures (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Center for Chemical Process Safety. (2008). Guidelines for risk based process safety. American Institute of Chemical Engineers.

Center for Chemical Process Safety. (2010). Guidelines for consequence analysis of chemical releases. American Institute of Chemical Engineers.

Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2011). Chemical process safety: Fundamentals with applications (3rd ed.). Pearson Education.

DNV. (2023). Phast™ software for consequence analysis. DNV. https://www.dnv.com/services/phast/

Enco Zamora, I. L. (2024). Diseño de un sistema contra incendio para reducir el riesgo en tanques de almacenamiento de combustible de la Planta de Abastecimiento del Aeropuerto Jorge Chávez [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Callao].

Enríquez, M. A. (2023). Aplicación de la metodología HAZOP para identificar riesgos de operabilidad en procesos críticos de empresas de servicios petroleros. Revista de Ingeniería y Seguridad Industrial, 18(2), 45–58.

Extinfenix. (2026). Triángulo del fuego aplicado a vapores de hidrocarburos líquidos. https://extinfenix.com

Fuentes-Bargues, J. L., González-Cruz, M. C., & González-Gaya, C. (2017). Risk analysis of a fuel storage terminal using HAZOP and FTA. International Journal of Environmental Research and Public Health, 14(7), 705.

García Lara, R. E. (2022). Cálculo hidráulico y rediseño de un sistema de agua contra incendio para un terminal de almacenamiento de combustible Turbo A1 en el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez [Informe profesional, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].

Hernández Sánchez, J. A. (2017). Aplicación de la metodología de árbol de fallas como herramienta preventiva de accidentes en plantas de almacenamiento de diésel [Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional].

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

International Electrotechnical Commission. (2016). IEC 61882: Hazard and operability studies (HAZOP studies) – Application guide. IEC.

International Organization for Standardization. (2018). ISO 31000: Risk management — Guidelines. ISO.

Kletz, T. (2009). HAZOP and HAZAN: Identifying and assessing process industry hazards (4th ed.). Institution of Chemical Engineers.

Mannan, S. (Ed.). (2012). Lees' loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control (4th ed.). Elsevier.

National Fire Protection Association. (2024). NFPA 11: Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam.

National Fire Protection Association. (2024). NFPA 15: Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection.

National Fire Protection Association. (2024). NFPA 30: Flammable and Combustible Liquids Code.

Occupational Safety and Health Administration. (1992). Process safety management of highly hazardous chemicals (29 CFR 1910.119). U.S. Department of Labor.

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (s. f.). Reglamento de supervisión de las actividades energéticas y mineras de Osinergmin.

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (2009). Reference Manual Bevi Risk Assessments (Version 3.2). Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment.

TNO. (2005). Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases) (Yellow Book). Committee for the Prevention of Disasters.

TNO. (2005). Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials (Green Book). Committee for the Prevention of Disasters.

IX ANEXOS

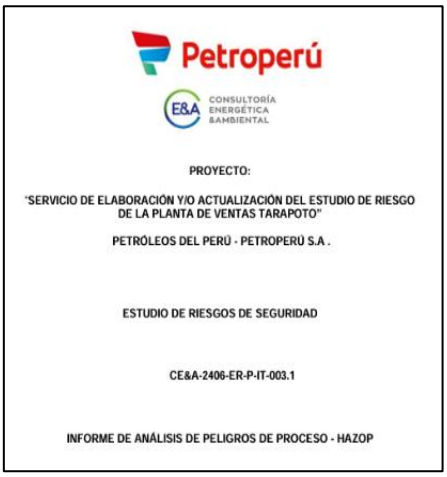
Anexo Nº 1. Referencias de la información técnica procesada en la investigación

La presente investigación se desarrolló utilizando como fuente primaria los estudios técnicos de Análisis de Peligros y Operabilidad (HAZOP), Análisis de Árbol de Eventos (ETA) y Estudio de Alcance de Consecuencias (EAC) correspondientes a dos plantas de abastecimiento de hidrocarburos líquidos ubicadas en el Perú: la Planta A (Salaverry) y la Planta B (Tarapoto).

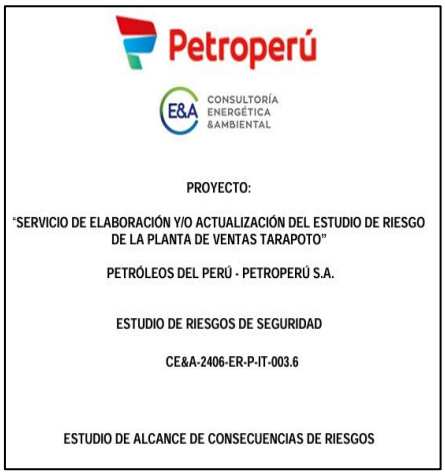
La información contenida en dichos documentos fue procesada para identificar escenarios de riesgo, analizar desviaciones operativas, evaluar la probabilidad de ocurrencia de eventos accidentales y determinar el alcance de las consecuencias asociadas a pérdidas de contención de combustibles líquidos. Los resultados obtenidos constituyeron el soporte técnico para el desarrollo del Capítulo V de la presente investigación.

Documentación técnica utilizada

Documento técnico	Planta A (Salaverry)	Planta B (Tarapoto)	Información procesada
Estudio HAZOP	✓	✓	Nodos de proceso, escenarios de riesgo, desviaciones operativas, causas, consecuencias, salvaguardas y recomendaciones.
Análisis de Árbol de Eventos (ETA)	✓	✓	Eventos iniciadores, secuencia de eventos, probabilidad de ocurrencia y eventos finales.
Estudio de Alcance de Consecuencias (EAC)	✓	✓	Simulación de incendios, explosiones y derrames; radios de afectación y consecuencias sobre personas e instalaciones.













Portadas de los estudios HAZOP, ETA y EAC utilizados en la investigación

Anexo Nº 2. Información técnica procesada de los estudios HAZOP, ETA y EAC

Estudio	Información procesada para la investigación
HAZOP	Se identificaron los nodos de proceso, desviaciones operativas, causas, consecuencias, salvaguardas y recomendaciones, permitiendo comparar los escenarios de riesgo presentes en ambas plantas.
ETA	Se analizaron los eventos iniciadores y la secuencia lógica de ocurrencia de accidentes, determinándose los eventos finales asociados a incendios, explosiones y derrames.
EAC	Se evaluaron los escenarios críticos mediante simulaciones de consecuencias, obteniéndose los radios de afectación por radiación térmica y sobrepresión, así como la afectación potencial a personas e instalaciones.

Tabla HAZOP - Salaverry

Nodo P18. Despacho de producto Clase II (Diesel B5 S50) por la isla de despacho 2, desde las conexiones de despacho de los tanques TK-8, TK-17, TK-22, TK-18 y TK-20, hasta el camión cisterna en la isla de despacho 2.

Intención: transferir de productos clase II desde los tanques TK-8, TK-17, TK-18, TK-20 y TK-22, hasta camión cisterna

Ítem	Palabra Guía	Desviación	Causa	Consecuencias	Nivel de Severidad por Aspecto de Riesgo				Aspecto Representativo del Riesgo	Riesgo Inherente			Salvaguarda / Control	Riesgo Residual			Recomendación
					Personal propio y terceros (S)	Económica / Activo / Continuidad operativa (A)	Medio Ambiente (E)	Imagen / Reputación (R)		S	F	R		S	F	R	
18.1	Más	18.1 Más nivel en la cisterna	18.1.1 Falla mecánica: falla del sistema de despacho a camiones cisterna (la válvula no cierra o la bomba no para al llegar al volumen seteado)	18.1.1.1 Aumento de nivel en el camión cisterna con potencial sobrellenado y derrame confinado **- Medio Ambiente:** Sin impacto ambiental. No hay impactos ambientales significativos **- Económica / Activo / Continuidad operativa:** Daños a la propiedad entre 1,000 hasta 4,000 USD. Incidente menor **- Personal propio y terceros:** Sin Lesiones **- Imagen / Reputación:** Impacto insignificante. Sin impacto sobre la imagen de la organización	1	2	1	1	A	2	C		51 Sistema de control de sobrellenado del camión cisterna 57 Sistema de drenaje en islas de despacho 58 Sardinel y rejillas en islas de despacho / recepción, que derivan el producto hacia un buzón	2	C		
				18.1.1.2 Potencial incendio al contacto con una fuente de ignición, posterior al derrame. **- Medio Ambiente:** impacto ambiental mayor. Impactos altos que requieren gran esfuerzo para la recuperación, daño ambiental reparable a mediano plazo, limpieza en un periodo de semanas. **- Económica / Activo / Continuidad operativa:** Daño localizado a la propiedad desde 4,000 USD hasta 1'000,000 USD **- Personal propio y terceros:** Accidente grave, con pérdidas de días laborales. Afectación causando pérdida de horas trabajadas o incapacidad parcial **- Imagen / Reputación:** Impacto de trascendencia a nivel nacional y local. Medios de comunicación nacional y local. Perturbación pública baja.	4	4	3	4	S	4	B		51 Sistema de control de sobrellenado del camión cisterna 52 Sistema contra incendio de la isla de despacho/recepción (Rociadores de espuma y Monitores-Hidrante en islas) (PL) 58 Sardinel y rejillas en islas de despacho / recepción, que derivan el producto hacia un buzón 71 Uso de ropa ignífuga para personal propio de TP 89 Válvula de cierre de emergencia manual, ubicada a más de 15 metros de la posición de los camión cisterna en islas de carga 90 Pulsador de parada de emergencia del sistema de despacho ubicada en la oficina de facturación	4	A		

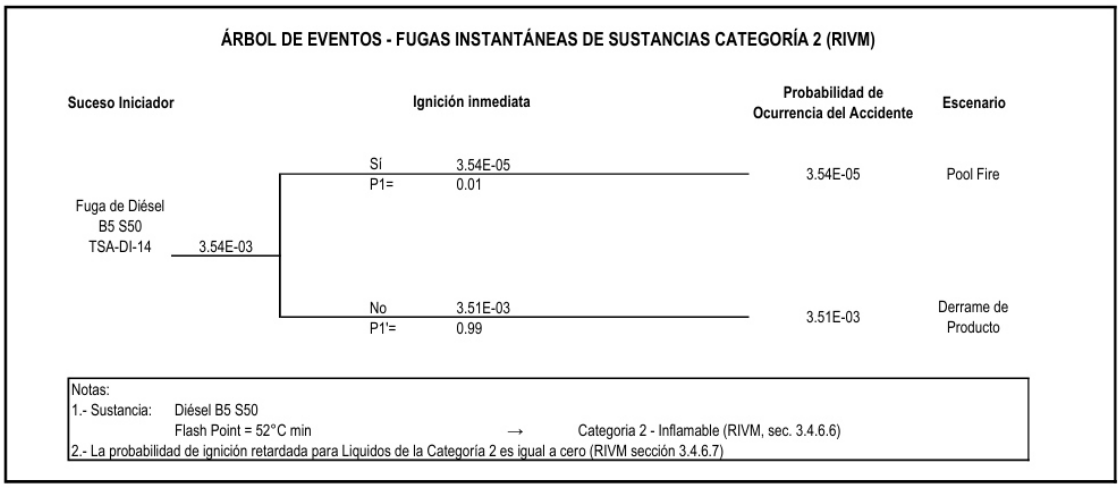
Tabla HAZOP - Tarapoto

Node: 5. Despacho de gasolina regular desde la salida del tanque TK-08 hasta la cisterna

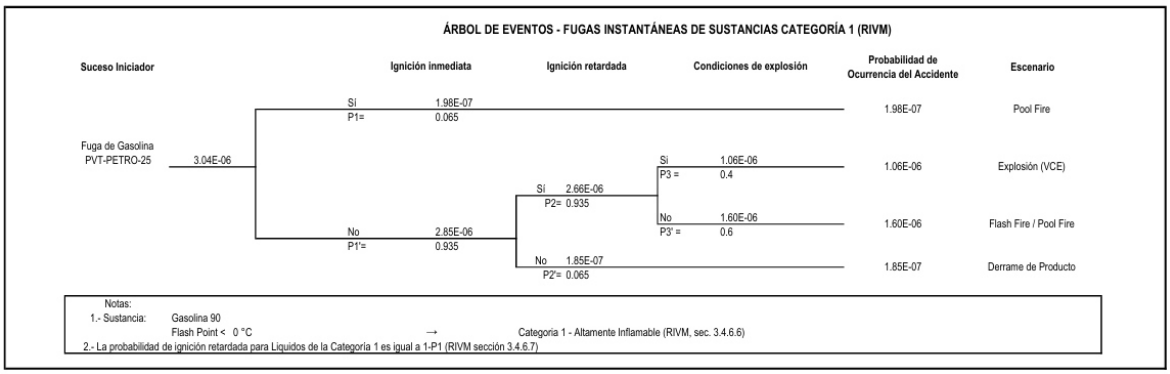
Palabra Guía	Variable	Desviación	Causa	Consecuencia	Calificación de Consecuencia		Entorno Natural	Entorno de mayor consecuencia	Riesgo Inherente			Salvaguardas	Riesgo Residual			Recomendaciones
					Entorno Humano	Entorno Socioeconómico			P	C	R		P	C	R	
		aditivo														
Menos / No	Caudal	15. Menos / No en la línea de aditivo después de la bomba de despacho de aditivo	1. Válvula cerrada por error humano en la línea de aditivos.	1. Incremento súbito de presión en la línea de despacho de aditivo, con fuga de hidrocarburo por las falla en los empaques en bridas.	A	A	A	Entorno Socioeconómico	4	A		1. Procedimiento operativo para el despacho de producto. 2. Inspección y mantenimiento preventivo al sistema de tuberías de producto. 3. Disponibilidad de kit antiderrame en el área, utilizado por personal entrenado según procedimiento de respuesta ante derrames, con capacidad para contener y absorber sustancias peligrosas, minimizando la dispersión y el impacto. 4. Extintores portátiles utilizado por personal	4	A		

Hojas representativas del estudio HAZOP utilizada para la identificación de desviaciones, causas, consecuencias y salvaguardas.

Planta Salaverry (A)

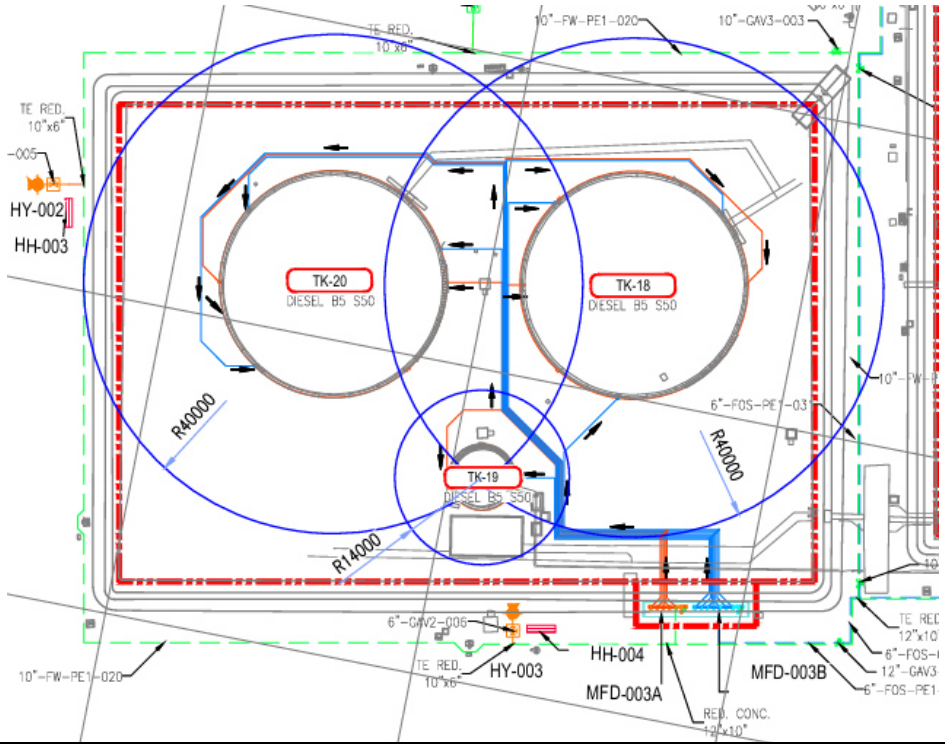


Planta Tarapoto (B)

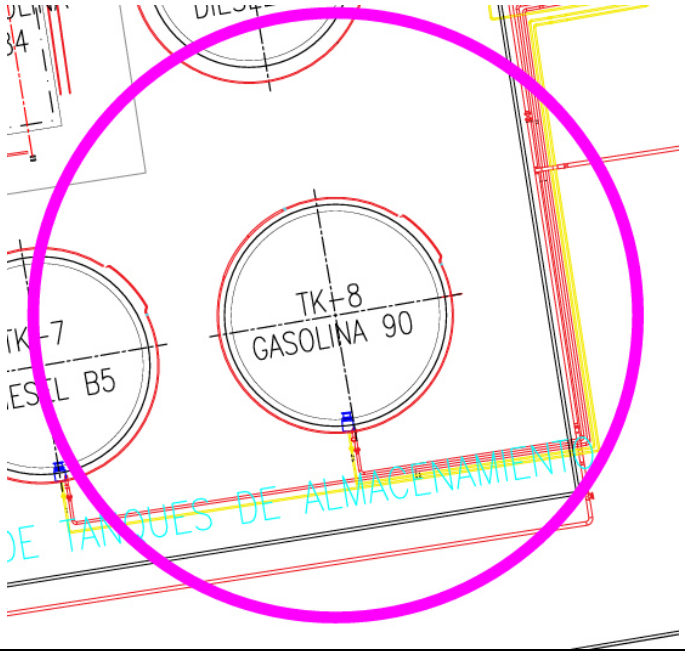


Árboles de eventos representativos empleado en el análisis ETA.

Planta Salaverry (A)



Planta Tarapoto (B)



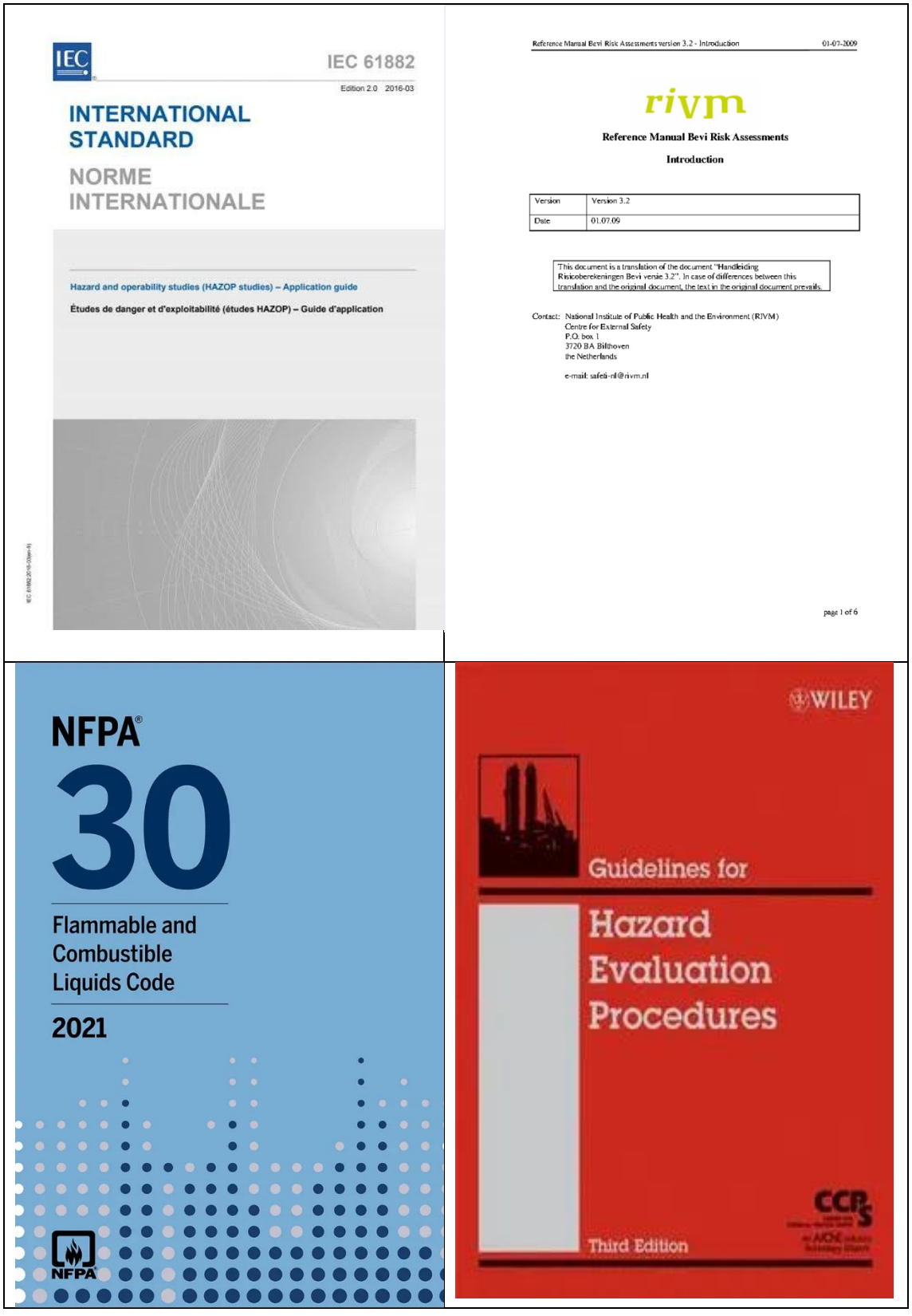
Planos representativos del Estudio de Alcance de Consecuencias (EAC).

Anexo Nº 3. Técnicas y normativas empleadas en los estudios de riesgo analizados.

Los estudios de Análisis de Peligros y Operabilidad (HAZOP), Análisis de Árbol de Eventos (ETA) y Estudio de Alcance de Consecuencias (EAC) utilizados como fuente primaria de información en la presente investigación fueron desarrollados considerando normas nacionales, estándares internacionales y manuales técnicos especializados en análisis de riesgos de procesos. Estas referencias constituyen el sustento metodológico para la identificación de peligros, evaluación probabilística de eventos y modelamiento de consecuencias.

Normas y documentos técnicos de referencia

Norma o documento	Aplicación en la investigación
IEC 61882:2016 – Hazard and Operability Studies (HAZOP)	Metodología para la identificación sistemática de peligros y desviaciones operativas.
IEC 61511:2018 – Functional Safety – Safety Instrumented Systems	Evaluación de sistemas instrumentados de seguridad (SIS).
CCPS – Guidelines for Hazard Evaluation Procedures	Criterios para la evaluación cualitativa y semicuantitativa de riesgos de procesos.
Reference Manual BEVI Risk Assessments – Version 3.2	Modelamiento y evaluación de consecuencias por incendios, explosiones y liberaciones de sustancias peligrosas.
API Recommended Practices	Criterios técnicos aplicados al almacenamiento y manejo de hidrocarburos líquidos.
NFPA 11	Sistemas de espuma para protección contra incendios en líquidos inflamables y combustibles.
NFPA 15	Sistemas fijos de aspersión de agua para protección contra incendios.
NFPA 30	Código para líquidos inflamables y combustibles.
D.S. N.° 043-2007-EM	Reglamento de Seguridad para las Actividades de Hidrocarburos.
D.S. N.° 052-93-EM	Reglamento de Seguridad para el Almacenamiento de Hidrocarburos.
R.D. N.° 129-2021-MINEM/DGH	Lineamientos para la elaboración de Estudios de Riesgo de Seguridad y Planes de Respuesta a Emergencias.
RCD N.° 088-2022-OS/CD	Procedimiento para la emisión de opinión favorable de Estudios de Riesgo de Seguridad por Osinergmin.



Portadas representativas de normas y manuales técnicos utilizados: IEC 61882, Reference Manual BEVI Risk Assessments Version 3.2, NFPA 30 y CCPS Guidelines for Hazard Evaluation Procedures.

Anexo Nº 4. Software especializado para el análisis de riesgos de procesos.

Este anexo complementa la metodología de la tesis mostrando las principales herramientas empleadas internacionalmente para el análisis cuantitativo de riesgos en instalaciones de hidrocarburos. Asimismo, se indica el software utilizado en los estudios de riesgo que constituyeron la fuente primaria de la presente investigación.

Software EFFECTS

EFFECTS es un software desarrollado por TNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research) para el modelamiento cuantitativo de las consecuencias derivadas de accidentes industriales que involucran sustancias peligrosas. Permite simular incendios, explosiones y liberaciones de sustancias peligrosas mediante modelos matemáticos ampliamente aceptados a nivel internacional.

Entre los principales fenómenos que pueden evaluarse mediante EFFECTS se encuentran:

- Pool Fire.
- Jet Fire.
- Flash Fire.
- Explosión de nube de vapor (VCE).
- BLEVE.
- Dispersión de gases inflamables y tóxicos.
- Radiación térmica.
- Sobrepresión.

Software PHAST

PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) es un software desarrollado por DNV (Det Norske Veritas) para el análisis cuantitativo de riesgos de procesos. Es una de las herramientas más utilizadas a nivel mundial para evaluar las consecuencias derivadas de liberaciones accidentales de sustancias peligrosas en instalaciones industriales.

El software permite modelar diferentes fenómenos físicos, entre ellos:

- Pool Fire.
- Jet Fire.

- Flash Fire.
- Fireball.
- BLEVE.
- Explosión de nube de vapor (VCE).
- Dispersión de gases.
- Radiación térmica.
- Sobrepresión.

PHAST incorpora modelos matemáticos reconocidos internacionalmente para estimar la evolución de escenarios accidentales y es ampliamente utilizado en la industria del petróleo, gas, petroquímica y almacenamiento de sustancias peligrosas.