

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

“Evaluación de los procesos de seguridad operativa de un ducto submarino para el transporte de combustibles líquidos en una refinería de petróleo”

Para obtener el título profesional de
Ingeniero Petroquímico

Elaborado por

Jorge Alberto Bravo Rojas

 [0009-0004-9100-6738](https://orcid.org/0009-0004-9100-6738)

Asesor

M.Sc. Williams Javier Ramos Vasquez

 [0000-0003-4895-6039](https://orcid.org/0000-0003-4895-6039)

LIMA - PERÚ

2025

Citar/How to cite	(Bravo, 2025)
-------------------	---------------

Referencia/Reference	Bravo, J. (2025). <i>"Evaluación de los procesos de seguridad operativa de un ducto submarino para el transporte de combustibles líquidos en una refinería de petróleo"</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de
Estilo/Style:	
APA (7ma ed.)	Ingeniería]. Repositorio Institucional Cybertesis UNI.

Citar/How to cite	Bravo Rojas [1]
-------------------	-----------------

Referencia/Reference	J. Bravo Rojas, <i>"Evaluación de los procesos de seguridad operativa de un ducto submarino para el transporte de combustibles líquidos en una refinería de petróleo"</i> . [Tesis de pregrado]. Lima (Perú):
Estilo/Style:	[1]
IEEE (2020)	Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.

Dedicatoria

Consagro esta Tesis a mis progenitores, cuya entrega incondicional y afecto inconmensurable han sido faros en mi travesía. Aprecio profundamente las enseñanzas vitales que me han transmitido y la ternura constante con la que han colmado mi existencia. Mi gratitud hacia ustedes trasciende toda elocuencia. Esta obra representa un homenaje a su legado y a la reverencia perdurable que albergo en lo más hondo de mi ser. Mi reconocimiento es eterno. Gracias por todo.

Agradecimientos

Expreso mi más sincera gratitud a todas aquellas personas que me respaldaron y alentaron en la concreción de este cometido. Me resulta inefable cuantificar cuánto estimo su respaldo y sapiente guía a lo largo de esta travesía. De manera particular, extendiendo un reconocimiento especial al MSc. Williams Ramos, cuya entrega meticulosa y paciencia inquebrantable fueron pilares esenciales en la estructuración de esta indagación académica.

Resumen

El uso de ductos submarinos como sistema de transporte es común en las refinerías de petróleo; sin embargo, este sistema de transporte requiere incluir mayores capas de seguridad o salvaguardas para asegurar una operación segura a lo largo del tiempo. En virtud de ello, se ha llevado a cabo la presente indagación con el propósito de discernir si la incorporación de medidas de mitigación suplementarias a las contempladas en la ingeniería básica coadyuva a la atenuación del nivel de riesgo inherente a la operación del ducto submarino, propiciando así una operatividad de mayor confiabilidad y seguridad.

Esta indagación se ha basado en la realización de un Estudio de Riesgos de Seguridad (ERS), la cual identifica todos los peligros y evalúa sus riesgos desde el punto de vista cualitativo a través de la técnica “Hazard and Operability Analysis: HAZOP” según lo indicado por el D.S. N° 081-2007-EM, y la determinación de las consecuencias que surgen de todos los peligros y riesgos evaluados a través de una metodología denominada Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR) indicada en la R.D. N° 129-2021-MINEM/DGH.

Una vez realizado ambos análisis, y habiendo considerado la implementación de la válvula submarina de desacople rápido (*Marine Breakaway Coupling*) en la manguera de carga/descarga, se determinó que el nivel de riesgo antes de las medidas de mitigación es un nivel “No Aceptable”, y que luego de implementada dicha válvula termina siendo un nivel “Aceptable”, con lo cual nos aseguramos que la operación del nuevo ducto submarino resultará en una operatividad más robusta y resguardada, tanto para la integridad de las personas, como para la conservación del entorno y la estabilidad de la infraestructura.

Abstract

The use of underwater pipelines as a transportation system is common in oil refineries; however, this transportation system requires the inclusion of additional safety layers or safeguards to ensure safe operation over time. Therefore, this investigation was conducted to determine whether the incorporation of supplementary mitigation measures in addition to those contemplated in the basic engineering contributes to reducing the level of risk inherent in the operation of the submarine pipeline, thus promoting more reliable and safe operation.

This investigation was based on the completion of a Safety Risk Study (SRS), which identifies all hazards and evaluates their risks from a qualitative perspective using the "Hazard and Operability Analysis: HAZOP" technique, as indicated by Decree No. 081-2007-EM, and the determination of the consequences arising from all hazards and risks evaluated through a methodology called Quantitative Risk Analysis (QRA) indicated in Decree No. 129-2021-MINEM/DGH.

After both analyses were conducted, and the implementation of the quick-release underwater valve (Marine Breakaway Coupling) in the loading/unloading hose was considered, it was determined that the risk level before the mitigation measures was "Unacceptable," and that after the valve was implemented, the level would be "Acceptable."

This ensures that the operation of the new underwater pipeline will result in more robust and secure operation, both for the integrity of the people and for the conservation of the environment and the stability of the infrastructure.

Prologo

En el presente Trabajo de Suficiencia Profesional (TSP) se aborda la evaluación de los procesos de seguridad operativa de un ducto submarino, resaltando su importancia como sistema esencial para el transporte de combustibles líquidos en una refinería de petróleo. Este estudio se enfoca en las capas de seguridad diseñadas para asegurar una operación segura y continua. Sin embargo, a pesar de la instauración de estas medidas de protección, en los años recientes se han registrado fallas notables que han ocasionado repercusiones adversas de considerable magnitud.

Ante esta problemática, se plantea la instalación de medidas adicionales en un nuevo ducto submarino y la realización de un Estudio de Riesgos de Seguridad (ERS), con el objetivo de evaluar si estas nuevas salvaguardas cumplen con los estándares de seguridad requeridos, garantizando así una operación eficiente y confiable.

El Capítulo I introduce la relevancia de los ductos submarinos y el contexto de las fallas de seguridad. En el Capítulo II, se presenta el marco teórico y conceptual, tomando como base las resoluciones RCD N° 088-2022-OS/CD y la R.D. N° 129-2021-MINEM/DGH, aplicadas al Análisis Cualitativo y Cuantitativo de Riesgos para determinar los eventos críticos y su impacto. El Capítulo III desarrolla la metodología del estudio, que incluye el Análisis de Riesgos HAZOP, el Análisis de Árbol de Falla (FTA) y el Análisis de Árbol de Eventos (ETA), así como la evaluación de consecuencias utilizando las ecuaciones de Bernoulli y consideraciones específicas de la instalación. El Capítulo IV expone el análisis y la deliberación de los resultados obtenidos, evidenciando que las medidas planteadas posibilitan la reducción del nivel de riesgo, pasando de “No Aceptable” a “Aceptable”

Por último, se exponen las conclusiones y recomendaciones emanadas del análisis, con la finalidad de robustecer la integridad operativa de los ductos submarinos y garantizar su eficacia en la conducción de hidrocarburos líquidos hacia las instalaciones de refinación petrolera

Índice

<i>Dedicatoria</i>	iii
Agradecimientos	iv
Resumen	v
Abstract	vi
Prologo	vii
Capítulo I. Introducción	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del Problema de Investigación.....	2
1.2.1 Formulación del problema.....	2
1.2.2 Justificación de la investigación.	3
1.3 Objetivos del Estudio.	3
1.3.1 Objetivo General.	3
1.3.2 Objetivo Específico.	3
1.4 Antecedentes investigativos.....	4
1.5 Hipótesis de la investigación.....	7
1.5.1 Hipótesis General.....	7
1.5.2 Hipótesis Específica.....	7
1.6 Identificación de variables.....	8
1.6.1 Variable Independiente.....	8
1.6.2 Variable Dependiente.....	8
1.7 Matriz de consistencia.....	9
Capítulo II. Marco teórico y conceptual	12

2.1	Marco Teórico.....	12
2.1.1	Estudio de Riesgos de Seguridad en el marco normativo peruano.....	12
2.1.2	Análisis Cualitativo de Riesgos	14
2.1.3	Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR)	15
2.1.4	Matriz de riesgo.....	20
2.2	Marco conceptual.....	21
2.3	Glosario.....	24
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		27
3.1	Alcance del estudio.....	27
3.2	Materiales.....	31
3.2.1	Propiedades fisicoquímicas del combustible líquido.....	31
3.2.2	Variables operativas del ducto submarino.....	31
3.2.3	Factores climatológicos de la zona del proyecto.....	31
3.3	Metodología del Trabajo de Investigación.....	32
3.3.1	Análisis cualitativo de riesgos.....	32
3.3.2	Análisis cuantitativo de riesgos	37
3.3.3	Determinación del nivel de riesgo.....	45
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados		48
4.1	Desarrollo del análisis HAZOP	48
4.1.1	Lista de nodos.....	49
4.1.2	Lista de desviaciones.....	51
4.1.3	Desarrollo del HAZOP.....	53
4.2	Desarrollo del Análisis cuantitativo de riesgos.....	93

4.2.1	Determinación de la frecuencia de cada uno de los eventos críticos identificados.....	93
4.2.2	Determinación de las consecuencias de los eventos críticos identificados.....	96
4.2.3	Determinación del nivel de riesgo.	104
4.3	Discusión de resultados.	105
	Conclusiones	106
	Recomendaciones	107
	Referencias Bibliográficas	109

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Identificación de variables.	9
Tabla 2. Matriz de consistencia.....	10
Tabla 3. Ejemplos de desviaciones y sus palabras guía asociadas	34
Tabla 4. Reglas selectas del álgebra de Boolean	40
Tabla 5. Niveles de probabilidad.	45
Tabla 6. Categorías de consecuencia.....	45
Tabla 7. Reducción del diámetro del derrame antes y después de las medidas de mitigación.	105

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Metodología General HAZOP.	14
Figura 2 Metodología del análisis cuantitativo de riesgos.	15
Figura 3 Metodología del estudio de alcance de consecuencias.....	17
Figura 4 Metodología para estudios FTA.	19
Figura 5 Metodología General para estudios ETA.	20
Figura 6 Diagrama de árbol de falla de equipos críticos.....	38
Figura 7 Simbología.....	39
Figura 8. Frecuencias para los escenarios de actividades de carga/descarga.....	41
Figura 9. Proceso análisis de árbol de eventos para el caso de liberaciones.....	41
Figura 10. Proceso análisis de árbol de eventos para el caso de ruptura.....	42
Figura 11. Matriz de riesgos.....	47
Figura 12. Clasificación del riesgo	47
Figura 13. Esquema del cierre del Marine Breakaway Coupling	48
Figura 14. Listado de nodos.....	49
Figura 15. Listado de desviaciones del Nodo 1.....	51
Figura 16. Listado de desviaciones del Nodo 2.....	52
Figura 17. Desviación 1: Más presión (Carga de productos a buque tanque)	53
Figura 18. Desviación 2: Más presión (Descarga de productos desde buque tanque)	55
Figura 19. Desviación 3: Menos presión (Carga de productos a buque tanque)	57
Figura 20. Desviación 4: Menos presión (Descarga de productos desde buque tanque)	59
Figura 21. Desviación 5: Más flujo (Carga de productos a buque tanque)	61
Figura 22. Desviación 6: Más flujo (Descarga de productos desde buque tanque)	62
Figura 23. Desviación 7: Bajo/No flujo (Carga de productos a buque tanque)	63
Figura 24. Desviación 8: Bajo/No flujo (Descarga de productos desde buque tanque)	65
Figura 25. Desviación 1: Alta corrosión.....	67

Figura 26. Desviación 2: Más temperatura.....	78
Figura 27. Desviación 3: Más presión (Carga de productos a buque tanque).....	79
Figura 28. Desviación 4: Más presión (Descarga de productos desde buque tanque)	81
Figura 29. Desviación 5: Menos presión (Carga de productos a buque tanque)	83
Figura 30. Desviación 6: Menos presión (Descarga de productos desde buque tanque) ..	85
Figura 31. Desviación 7: Más flujo (Carga de productos a buque tanque)	87
Figura 32. Desviación 8: Más flujo (Descarga de productos desde buque tanque)	88
Figura 33. Desviación 9: Bajo/No flujo (Carga de productos a buque tanque)	89
Figura 34. Desviación 10: Bajo/No flujo (Descarga de productos desde buque tanque) ..	91
Figura 35. Proceso análisis de árbol de eventos para el caso de liberaciones.....	94
Figura 36 Proceso análisis de árbol de eventos para el caso de ruptura.....	95

Capítulo I. Introducción

1.1 Generalidades.

El uso de oleoductos como sistema de transporte es común en las refinerías de petróleo, tanto para recibir como para despachar combustibles líquidos. Sin embargo, este sistema de transporte, especialmente en mar (ductos submarinos), requiere incluir mayores capas de seguridad o salvaguardas para asegurar una operación segura a lo largo del tiempo (MINEM, 2007c).

En los últimos años, se ha comprobado que muchos de estos sistemas de transporte han fallado en sus capas de seguridad o salvaguardas, ya sea por acciones humanas o fallos en los equipos de control del proceso. Estos fallos han tenido consecuencias significativas, afectando negativamente a las personas (trabajadores e individuos cercanos a las instalaciones), al medio ambiente, a las instalaciones mismas y a la reputación de las empresas ante la sociedad (El Peruano, 2022; Silvianita et al., 2023).

Para mitigar estos riesgos, el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minas (OSINERGMIN) ha establecido normativas en el sector hidrocarburos para reducir la ocurrencia de eventos no deseados. Esto se realiza mediante la elaboración de los Estudios de Riesgos de Seguridad (ERS) (MINEM, 2007b, 2020, 2021a; OSINERGMIN, 2022).

OSINERGMIN, a través de la RCD N° 088-2022-OS-CD, aprobó el *“Procedimiento para la emisión de opinión favorable de los Estudios de Riesgos de Seguridad y Planes de Respuesta a Emergencias de las Actividades e Instalaciones de Hidrocarburos que se encuentran dentro del ámbito de aplicación del Reglamento de Seguridad para las Actividades de Hidrocarburos aprobado por Decreto Supremo N° 043-2007-EM”* (OSINERGMIN, 2022).

Este protocolo define las directrices para la formulación de los ERS, los cuales deben examinar, tanto cualitativa como cuantitativamente, los posibles eventos indeseados en la operación de un proceso. Asimismo, deben valorar si las medidas de protección, ya existentes o sugeridas, contribuyen a mitigar la probabilidad y/o la magnitud de tales eventualidades. (MINEM, 2021a).

Por lo tanto, la ingeniería básica del nuevo ducto submarino para el transporte de combustibles líquidos en una refinería de petróleo debe incluir las mejores salvaguardas posibles para garantizar una operación confiable. Este TSP propone evaluar el ERS, con el objetivo de determinar si estas salvaguardas cumplen con las expectativas de seguridad establecidas.

1.2 Descripción del Problema de Investigación.

1.2.1 Formulación del problema.

1.2.1.1 Problema General.

¿Cómo determinar, a partir del Estudio de Riesgos de Seguridad (ERS), si las medidas de mitigación propuestas en la ingeniería básica permiten una operación confiable y segura en el nuevo ducto submarino para el transporte de combustibles líquidos en una refinería de petróleo?

1.2.1.2 Problemas específicos

1.2.1.2.1 ¿Cuáles son los posibles eventos no deseados que podrían ocurrir en la operación del nuevo ducto submarino para el transporte de combustibles líquidos en una refinería de petróleo?

1.2.1.2.2 ¿Cuáles son los impactos económicos y sociales de los posibles eventos no deseados en términos de daños a personas, medio ambiente e infraestructura, tanto antes como después de implementar medidas adicionales de mitigación propuestas en la ingeniería básica?

1.2.1.2.3 ¿La implementación de medidas adicionales de mitigación propuestas en la ingeniería básica permitirá una reducción del nivel de riesgo y garantizará una operación más confiable y segura del ducto submarino?

1.2.2 Justificación de la investigación.

El transporte de combustibles líquidos mediante ductos submarinos en refinerías de petróleo representa un desafío significativo en términos de seguridad operativa y protección ambiental. La presencia de eventuales fallos en estos sistemas puede tener consecuencias devastadoras, no solo para las instalaciones y los trabajadores, sino también para el medio ambiente y las comunidades circundantes. La creciente demanda de energía y el aumento de las actividades de extracción y refinación de hidrocarburos subrayan la necesidad de mejorar continuamente las medidas de seguridad y mitigación de riesgos (Silvianita et al., 2023).

El presente TSP se justifica en la necesidad de evaluar y mejorar las medidas de seguridad en el nuevo ducto submarino de una refinería de petróleo, cumpliendo con las normativas establecidas por el OSINERGMIN. La implementación de un ERS robusto y exhaustivo permitirá identificar y cuantificar los posibles eventos no deseados, así como examinar la idoneidad y eficiencia de las estrategias de mitigación formuladas.

1.3 Objetivos del Estudio.

1.3.1 Objetivo General.

Valorar la eficacia de las estrategias atenuantes contempladas en la fase de ingeniería básica, con miras a garantizar una operatividad confiable y segura.

1.3.2 Objetivo Específico.

- Realizar un análisis cualitativo de posibles eventos no deseados en la operación del nuevo ducto submarino.
- Realizar un análisis cuantitativo de daños económicos y sociales antes y después de la instauración de medidas adicionales.

- Analizar la incidencia de la incorporación de medidas adicionales de mitigación en la reducción del nivel de riesgo asociado a la operación del nuevo ducto submarino, comparando escenarios con y sin dichas medidas.

1.4 Antecedentes investigativos.

Silvianita y sus coautores, en el año 2023, realizaron una indagación académica en territorio indonesio sobre el empleo de ductos como sistema de transporte de petróleo y gas natural. Estos ductos son superiores a otros métodos de transporte; no obstante, implican un peligro superior para las personas y el entorno, dado que exhiben una de las tasas de fallos más altas en la industria. Además, los sistemas de tuberías en alta mar tienen una probabilidad significativamente mayor de fallar debido a las condiciones más severas en comparación con los sistemas de tuberías terrestres (Silvianita et al., 2023).

Por consiguiente, la seguridad de los gasoductos submarinos se volvió una preocupación central en este estudio, cuyo objetivo fue evaluar el riesgo asociado a los gasoductos debido a los cambios presentados en la nueva línea de transporte, los cuales podrían representar un peligro para la integridad del gasoducto (Silvianita et al., 2023).

A su vez, Urpash Zhaniyzovna y sus colegas, en su estudio "*Specifics of oil pipeline systems' risks management*" en Kazajistán, señalan que las dificultades (riesgos) que surgen en la implementación de proyectos de oleoductos pueden tener consecuencias no deseadas y afectar significativamente los resultados. Con el fin de abordar esta cuestión, examinaron las modalidades y factores que inciden en la génesis de situaciones de riesgo en la operación de oleoductos troncales, proponiendo, a su vez, técnicas de evaluación numérica y gestión de los peligros involucrados.

Para ello, realizaron un análisis de peligrosidad y riesgo de posibles fallas, evaluando la frecuencia de estas a lo largo del oleoducto, y sugirieron medidas para mitigar los riesgos y así garantizar la confiabilidad y seguridad de grandes oleoductos (Shalbolova et al., 2014).

El cálculo de los principales indicadores permitió identificar los riesgos de ruptura integral y el riesgo colectivo de lesiones mortales, lo que, a su vez, facilitó la planificación de medidas para su mitigación.

La alta especificidad del oleoducto se puede atribuir principalmente a la implementación y despliegue de soluciones técnicas y métodos de construcción modernos, así como al incremento de la vigilancia y el control en todas las etapas del diseño, construcción y despliegue de instalaciones industriales peligrosas (Shalbolova et al., 2014).

De este modo, las evaluaciones cualitativas y el análisis de riesgos de fallos industriales en las empresas del sector petrolero facilitan la identificación de las secciones de los oleoductos troncales con alto riesgo de avería y de los factores de peligro más relevantes, lo que respalda la toma de decisiones de gestión efectivas en cuanto a la seguridad industrial (Shalbolova et al., 2014).

Por su parte, en Polonia Dziubiński y sus colegas señalaron en su investigación "*Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines*" que el principal peligro para el transporte seguro de hidrocarburos es el fallo de la tubería, entendido como la pérdida de estanqueidad y la liberación del producto transportado al medio ambiente. Aunque el transporte por oleoductos se considera uno de los métodos más seguros para largas distancias, las bases de datos de accidentes indican que el riesgo asociado con la operación de oleoductos suele ser comparable al de las instalaciones estacionarias de refinería (Dziubiński et al., 2006).

Con el fin de realizar la evaluación de riesgos y calcular la magnitud de peligro de un accidente, emplearon tres enfoques analíticos: cualitativo, semicuantitativo y cuantitativo. Los resultados fueron presentados mediante clasificaciones de riesgo pertinentes para simplificar su reconocimiento. (Dziubiński et al., 2006).

Los autores reconocieron que la evaluación de los riesgos en tuberías largas requiere un enfoque individual para cada caso, particularmente para calcular las consecuencias de la liberación de sustancias peligrosas para todos los afectados. Por esta razón, se necesita asistencia informática para la adquisición, almacenamiento y procesamiento eficiente de datos en cada etapa de la evaluación de riesgos mediante un simulador, el cual permite modelar las consecuencias de la liberación de sustancias peligrosas de las tuberías. (Dziubiński et al., 2006).

En la misma línea, en Estados Unidos los investigadores De Stefani y Carr en "*A Model to Estimate the Failure Rates of Offshore Pipelines*" mencionan que las tuberías están expuestas a diversas amenazas que pueden causar fallos en la línea, tales como impactos externos, defectos mecánicos, corrosión y peligros naturales. En particular, las operaciones en alta mar presentan un conjunto único de condiciones ambientales y exposiciones adversas que no se observan en tierra firme.

Por ejemplo, los oleoductos marinos situados cerca de zonas portuarias y principales rutas marítimas están expuestos al riesgo de daños debido al impacto de objetos anclados y caídos. Estos daños pueden representar riesgos potenciales para las personas y el medio ambiente, además de implicar importantes costos de reparación (De Stefani & Carr, 2010).

Es por ello que el objetivo de los autores con dicha investigación fue proporcionar una guía para determinar la frecuencia de las averías de los oleoductos y gasoductos marinos y describir un nuevo modelo elaborado con ese fin. Este modelo utiliza bases de datos históricas y métodos predictivos para desarrollar frecuencias de falla en función de una gama de parámetros influyentes (De Stefani & Carr, 2010).

Además, Maher A. Nessim y colegas en su investigación "*Risk-Based Maintenance Planning for Offshore Pipelines*" describen un modelo cuantitativo para la planificación del mantenimiento de la integridad de los oleoductos y gasoductos marinos. Este modelo calcula el nivel de riesgo como el producto de las consecuencias del fracaso y las probabilidades de fracaso (Nessim et al., 2000).

Entre las consecuencias de la avería consideradas figuran los aspectos financieros relacionados con la reparación, interrupción y restauración; los factores de protección vinculados a los pasajeros de las plataformas y embarcaciones; y los aspectos medioambientales relacionados con los derrames.

Se distingue entre pequeñas fugas, grandes fugas y roturas, y se tienen en cuenta las principales causas de fallo (es decir, corrosión y daños mecánicos). El modelo evalúa los provechos vinculados a las diversas opciones de conservación, estimando su repercusión en la probabilidad de fallo y la intensidad del peligro. Finalmente, utilizan un enfoque formal de análisis de decisiones para evaluar los costos y beneficios asociados con cada alternativa y determinar la mejor estrategia general de mantenimiento (Nessim et al., 2000).

1.5 Hipótesis de la investigación.

1.5.1 Hipótesis General.

Las medidas de mitigación propuestas en la ingeniería básica, evaluadas a través del ERS, son efectivas para garantizar una operación confiable y segura del nuevo ducto submarino para el transporte de combustibles líquidos en una refinería de petróleo, cumpliendo con las normativas de OSINERGMIN.

1.5.2 Hipótesis Específica.

La realización de un análisis cualitativo de la operación del nuevo ducto submarino permitirá identificar eventos no deseados, como derrames e incendios, que podrían surgir durante su funcionamiento.

La evaluación meticulosa de las contingencias potenciales asociadas con la operatividad del nuevo ducto submarino posibilitará la estimación de las repercusiones socioeconómicas sobre individuos, ecosistemas e instalaciones críticas, tanto en escenarios previos como posteriores a la incorporación de estrategias de atenuación complementarias formuladas en la etapa de ingeniería conceptual.

La incorporación de estrategias de mitigación suplementarias a las contempladas en la fase de ingeniería básica contribuirá a la disminución del umbral de exposición al riesgo inherente a la operatividad del ducto submarino, promoviendo así un funcionamiento con mayores estándares de confiabilidad y seguridad operacional.

1.6 Identificación de variables.

1.6.1 Variable Independiente.

1.6.1.1 Medidas de mitigación en la seguridad operativa del ducto submarino

La variable independiente está representada por las medidas de mitigación propuestas en la ingeniería básica para el nuevo ducto submarino. Estas medidas serán evaluadas y ajustadas según los resultados obtenidos en el Estudio de Riesgos de Seguridad (ERS). A través del Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR), parte del ERS, se evaluará la influencia de las medidas de mitigación en la reducción del nivel de riesgo asociado al ducto submarino.

1.6.2 Variable Dependiente.

1.6.2.1 Nivel de seguridad operativa y confiabilidad del ducto submarino

La variable dependiente evidencia la incidencia de las disposiciones mitigadoras sobre los parámetros de integridad funcional y confiabilidad operativa del sistema de transporte submarino. El análisis permitirá discernir si las acciones adoptadas conducen a la convergencia hacia un umbral de riesgo dentro de los márgenes de un Riesgo Tolerable.

En caso contrario, si el ducto permanece en niveles de Riesgo Inaceptable o Riesgo ALARP¹, se recomendará la incorporación de medidas adicionales hasta lograr estándares aceptables de seguridad, alineados con las normativas vigentes

Tabla 1.

Identificación de variables.

VARIABLES INDEPENDIENTES	VARIABLE DEPENDIENTE
Medidas de mitigación en la seguridad operativa del ducto submarino	Nivel de seguridad operativa y confiabilidad del ducto submarino

Nota: Elaboración propia.

1.7 Matriz de consistencia.

El desarrollo de la matriz de consistencia se presenta en la Tabla 2.

¹ ALARP es el acrónimo del inglés "As Low As Reasonably Practicable", (en español, "tan bajo como sea razonablemente factible"). El principio ALARP es que el riesgo residual debe ser tan bajo como sea razonablemente factible.

Tabla 2.

Matriz de consistencia.

Título	Problemas de la Investigación	Objetivos de la Investigación	Formulación de Hipótesis	Variables	Indicadores	Metodología	Población, Muestra	Técnicas Instrumentos
Evaluación de los procesos de seguridad operativa de un ducto submarino para el transporte de combustibles líquidos en una refinería de petróleo	Problema General 1.1. ¿Cómo determinar, a partir del Estudio de Riesgos de Seguridad (ERS), si las medidas de mitigación propuestas en la ingeniería básica permiten una operación confiable y segura en el nuevo ducto submarino para el transporte de combustibles líquidos en una refinería de petróleo?	Objetivo General Valorar la eficacia de las estrategias atenuantes contempladas en la fase de ingeniería básica, con miras a garantizar una operatividad confiable y segura. Objetivos específicos 1.1. Realizar un análisis cualitativo de posibles eventos no deseados en la operación del nuevo ducto submarino. 1.2 Realizar un análisis cuantitativo de daños económicos y sociales antes y después de la implementación de medidas adicionales. 1.3 Analizar el impacto de la implementación de medidas adicionales de	Hipótesis general Las medidas de mitigación propuestas en la ingeniería básica, evaluadas a través del ERS, son efectivas para garantizar una operación confiable y segura del nuevo ducto submarino para el transporte de combustibles líquidos en una refinería de petróleo, cumpliendo con las normativas de OSINERGMIN.	Variable independiente (V₁) A. Estudio de Riesgos de Seguridad (ERS) Variable dependiente (V₂) C. Confiabilidad y seguridad de las medidas de mitigación en el nuevo ducto submarino	1.1. Medidas de mitigación propuestas en Ingeniería Básica 2.1 Eficacia de las Medidas de Mitigación 2.2. Probabilidad de Eventos No Deseados	Tipo de investigación Descriptiva Diseño de la investigación Cualitativo y Cuantitativo	Población 1.1. Nuevo ducto submarino para el transporte de combustibles líquidos en la refinería de petróleo. Muestra 1.1. áreas operativas y componentes del ducto submarino	Técnicas Hazard and Operability Study (HAZOP) Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR) Instrumentos 1.1. Simulador PHA-PRO 1.2. Hojas de cálculo (MS Excel)

	<p>líquidos en una refinería de petróleo?</p> <p>1.2. ¿Cuáles son los impactos económicos y sociales de los posibles eventos no deseados en términos de daños a personas, medio ambiente e infraestructura, tanto antes como después de implementar medidas adicionales de mitigación propuestas en la ingeniería básica?</p> <p>1.3. ¿La implementación de medidas adicionales de mitigación propuestas en la ingeniería básica permitirá una reducción del nivel de riesgo y garantizará una operación más confiable y segura del ducto submarino?</p>	<p>mitigación en la reducción del nivel de riesgo asociado a la operación del nuevo ducto submarino, comparando escenarios con y sin dichas medidas.</p>			<p>2.3 Cuantificación de Daños Económicos y Sociales.</p> <p>2.4 Nivel de Reducción del Riesgo.</p>		<p>1.2. Entorno marino del ducto submarino</p>	<p>1.3. AutoCAD académico</p>
--	--	--	--	--	---	--	--	-------------------------------

Nota: Elaboración propia.

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1 Marco Teórico.

2.1.1 Estudio de Riesgos de Seguridad en el marco normativo peruano.

Tomando en consideración la Resolución de Consejo Directivo de OSINERGMIN N° 088 del 2022 (RCD N° 088-2022-OS/CD) y la Resolución Directoral N° 129 del año 2021 de la Dirección General de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas (R.D. N° 129-2021-MINEM/DGH), los riesgos serán evaluados en términos de su probabilidad de ocurrencia y la consecuencia o impacto que puedan generar sobre cada uno de los objetos establecidos (Entorno Humano, Entorno Socioeconómico y Entorno Natural) (MINEM, 2021a; OSINERGMIN, 2022).

Los métodos seleccionados y aceptados por la normativa legal vigente son los siguientes: (OSINERGMIN, 2022)

- *Hazard and Operability Analysis: HAZOP* (OSINERGMIN, 2022)
- *Hazard Identification (HAZID)* (OSINERGMIN, 2022)
- *Análisis de Riesgo What if* (OSINERGMIN, 2022)
- *Análisis de Riesgo Checklist* (OSINERGMIN, 2022)
- *Análisis de Árbol de Eventos (Event Tree Analysis - ETA)* (OSINERGMIN, 2022)
- *Análisis de Árbol de Falla (Fault Tree Analysis - FTA)* (OSINERGMIN, 2022)
- *Estudio de Alcance de Consecuencias (EAC)* (OSINERGMIN, 2022)
- *Análisis Cuantitativo de Riesgo (ACR)* (OSINERGMIN, 2022)
- *Estudio de Asignación de SIL (Safety Integrity Level - SIL) - Risk Graph* (OSINERGMIN, 2022)

El presente Estudio de Riesgos se fundamenta primordialmente en la identificación de potenciales amenazas y la subsiguiente valoración de contingencias, desarrollándose en dos fases diferenciadas.

La primera etapa identifica todos los peligros y evalúa sus riesgos desde el punto de vista cualitativo (Evaluación Cualitativa de Riesgo), por lo que se seleccionó la técnica “*Hazard and Operability Analysis: HAZOP*” según lo indicado por el Decreto Supremo N° 081 del año 2007 del Ministerio de Energía y Minas (D.S. N°081-2007-EM) y la Resolución Directoral N° 129 del año 2021 de la Dirección General de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas (R.D. N° 129-2021-MINEM/DGH) para la determinación de los peligros y eventos críticos del nuevo ducto submarino, puesto que es la única metodología permitida por la normativa peruana (MINEM, 2007c, 2021a).

Cabe mencionar que los resultados de la evaluación cualitativa son de carácter preliminar y que es necesario que los eventos críticos sean sometidos a una mayor rigurosidad y precisión, basándose en:

- Estudio de Alcance de Consecuencias (EAC), para determinar la extensión de las consecuencias por radiación térmica, sobrepresión y/o toxicidad (MINEM, 2021a).
- Análisis de Árbol de Falla (FTA) y Análisis de Árbol de Eventos (ETA) para determinar los valores de frecuencia de ocurrencia de los eventos críticos determinados en la primera etapa (MINEM, 2021a).
- Análisis Cuantitativo de Riesgo (ACR). Con los resultados de la frecuencia y consecuencia de cada evento crítico se determina el nivel de riesgo a través de una matriz de riesgo establecidos por la compañía operadora (MINEM, 2021a).

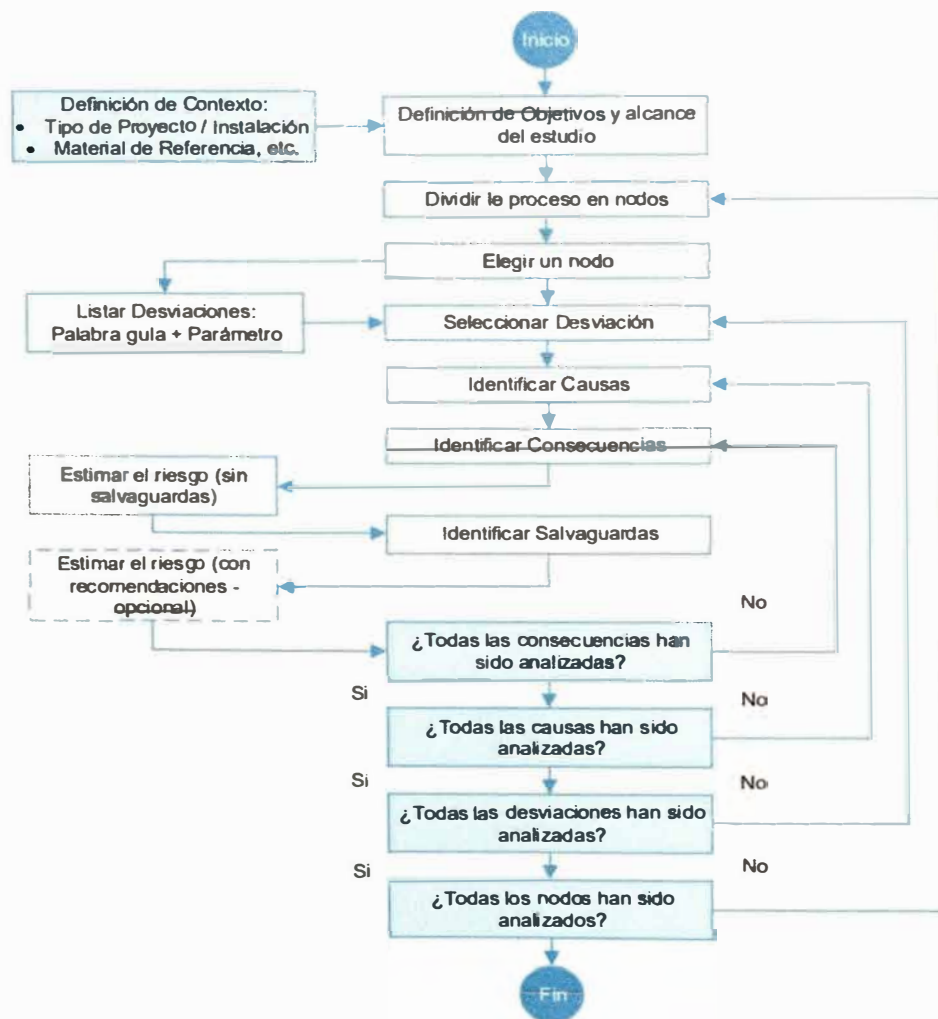
2.1.2 Análisis Cualitativo de Riesgos

2.1.2.1 Metodología del Estudio de Peligros y Operabilidad (HAZOP)

Como primera etapa se desarrolla una evaluación preliminar o cualitativa de riesgos, con ayuda de la metodología HAZOP, teniendo como soporte informático el software PHA PRO-8. Esta evaluación preliminar se desarrolló siguiendo los pasos detallados en la figura 1, con la finalidad de considerar de forma práctica todos los posibles riesgos que pudieran presentarse en la instalación a evaluar en concordancia con la categorización y estructura de desglose de riesgos considerando la metodología indicada en la R.D. N° 129-2021-MINEM/DGH (MINEM, 2021a).

Figura 1.

Metodología General HAZOP.



Nota: (MINEM, 2021a)

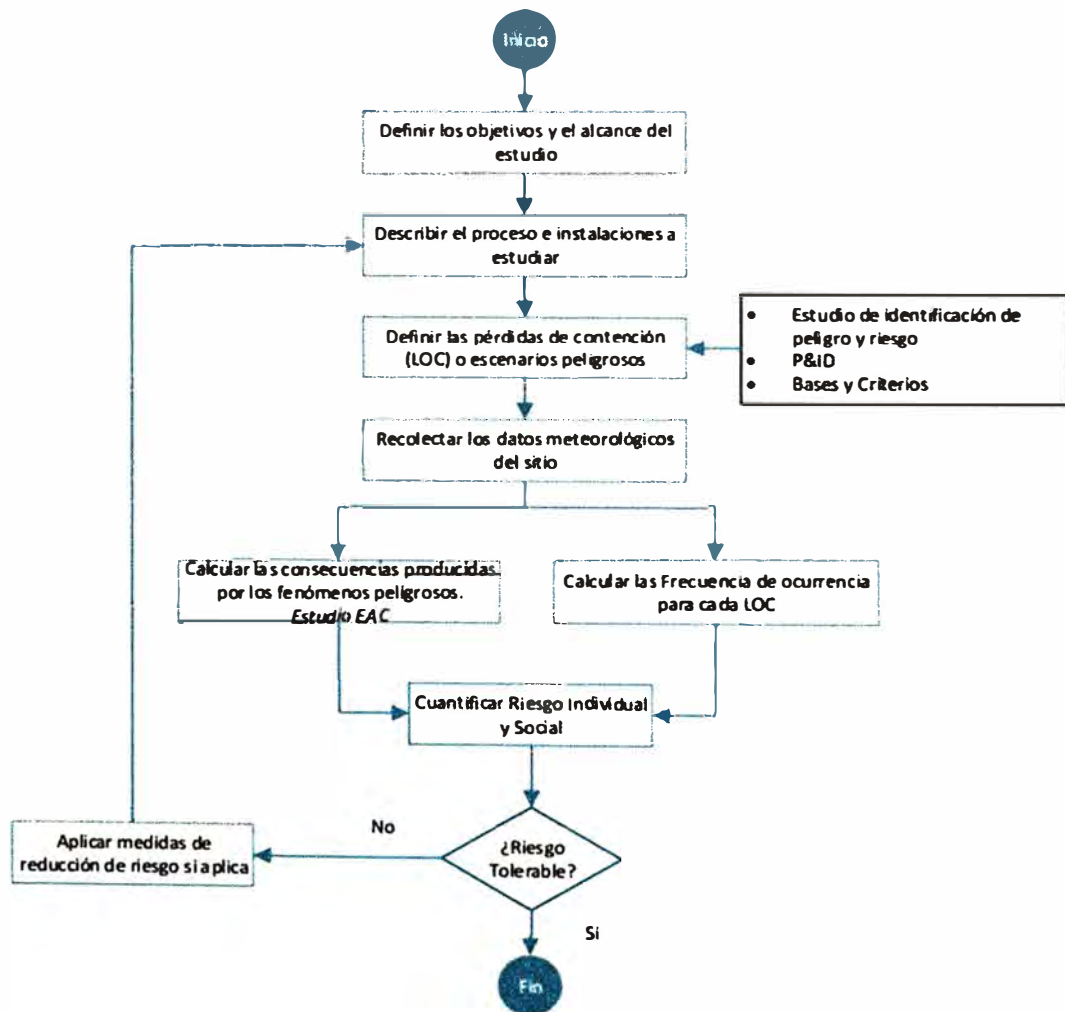
2.1.3 Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR)

2.1.3.1 Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR) en el marco normativo peruano.

Este análisis se caracteriza por considerar la combinación de dos elementos: Frecuencia y Consecuencia. A continuación, en la figura 2 se presenta un esquema general de esta metodología (MINEM, 2021a).

Figura 2.

Metodología del análisis cuantitativo de riesgos.



Nota: (MINEM, 2021a)

2.1.3.2 Análisis de Consecuencia

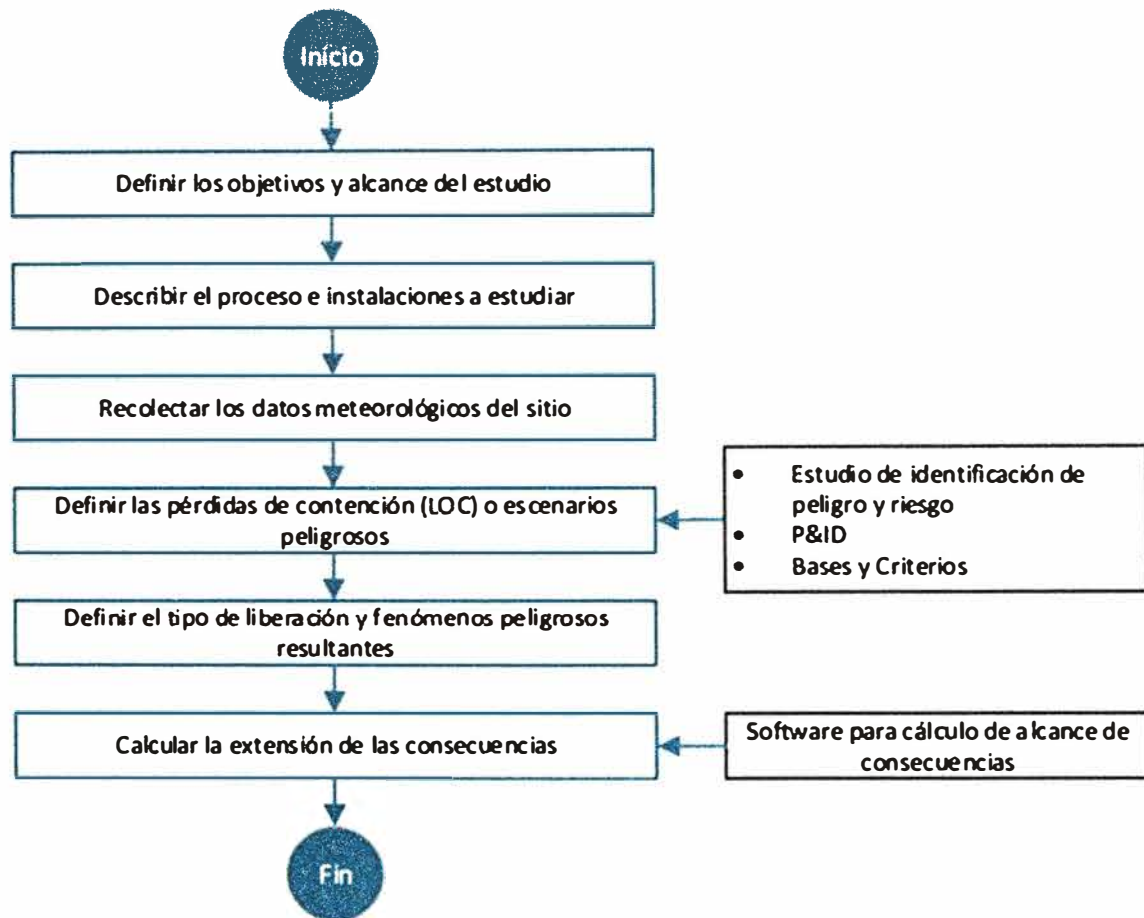
La realización del análisis de consecuencia consiste en una estimación de consecuencias de posibles accidentes en instalaciones que procesan sustancias peligrosas que, bien por sí mismas o por sus condiciones de proceso, pueden causar daños a las personas, al medio ambiente y a la propiedad (MINEM, 2021a).

El objetivo principal del estudio de análisis de consecuencia es estimar la magnitud de las consecuencias de los mayores escenarios de riesgos tales como incendios, explosiones y derrames, mediante la aplicación de modelos de cálculo, para establecer zonas seguras, así como el alcance de los daños y constituya una base para la toma de decisiones sobre disposición de equipos, diseño de edificios y/o ignifugado de estructuras (MINEM, 2021a).

Esta metodología tiene el soporte informático del *software* tales como el PHAST 6.5, ALOHA 5.4.7, entre otros, a fin de alinearse como a la estructura planteada en la R.D. N° 129-2021-MINEM/DGH. consignada en la figura 3 (MINEM, 2021a).

Figura 3.

Metodología del estudio de alcance de consecuencias



Nota: (MINEM, 2021a)

2.1.3.3 Estimación de frecuencias

La realización de un estudio de Frecuencias y Probabilidades permite establecer la frecuencia de los accidentes finales o escenarios seleccionados del estudio HAZOP y una Base de Datos Genérica como la del Manual BEVI, entre estos escenarios tenemos el *Jet Fire*, *Pool Fire*, *Boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE)*, *Flash Fire*, Explosión, etc., estos son resultado de una secuencia originada por un evento iniciador como fugas, sobrellenado, derrame, rotura de equipos y/o condiciones con potencial de causar eventos como BLEVE o un Rebosamiento por ebullición (BOILOVER) (MINEM, 2021a).

Para ello se determina el valor de la Frecuencia de Falla de los Eventos Iniciales, para luego calcular la frecuencia de los accidentes finales empleando la metodología especializada del Árbol de Eventos (ETA) o Análisis por Árboles de Fallas (FTA) (MINEM, 2021a).

Los valores de frecuencia de falla o base fueron recopilados de datos estadísticos disponibles de fuentes de referencia como el manual BEVI y los reportes de la IOGP (MINEM, 2021a; RIVM, 2009).

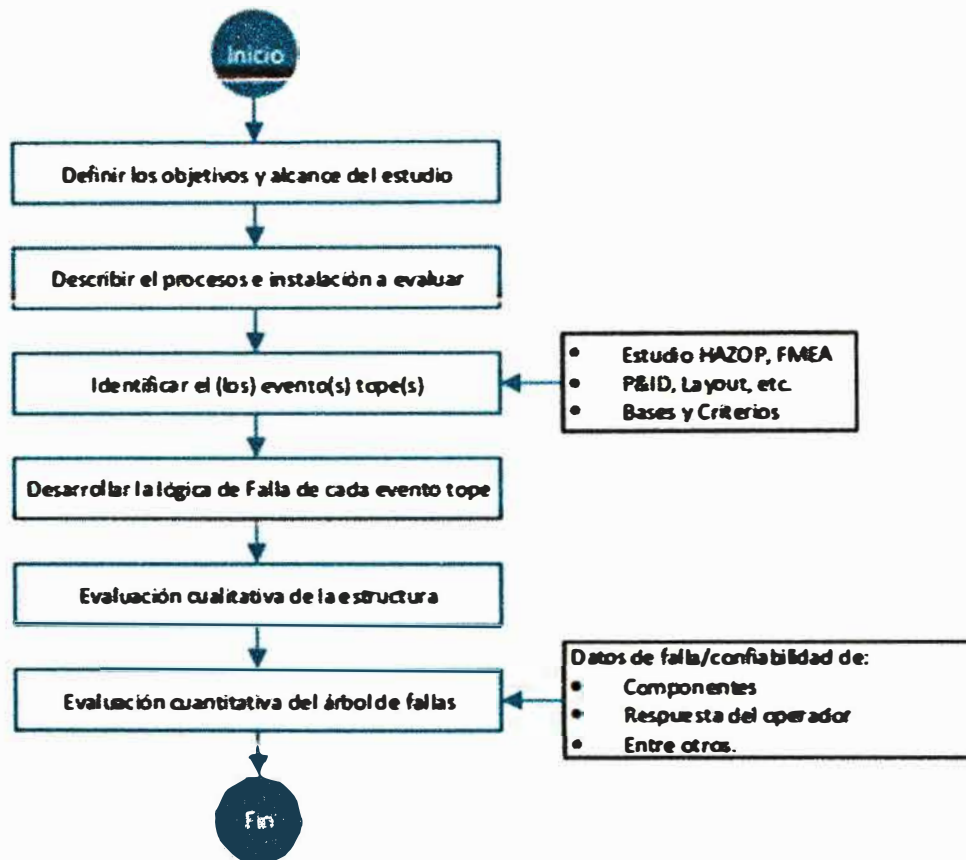
2.1.3.3.1 Análisis de Árbol de Falla (FTA)

La finalidad primordial del Análisis mediante Árbol de Fallas (Fault Tree Analysis, FTA) radica en la cuantificación de las frecuencias asociadas a la ocurrencia de eventos indeseables de naturaleza crítica, o a la disfunción sistémica global, a través de la construcción de arquitecturas lógicas de falla que permiten trazar las relaciones causales entre eventos primarios y el evento tope (MINEM, 2021a).

Esta metodología también tiene el soporte informático del *software* Microsoft Excel, a fin de alinearse como a la estructura planteada en la R.D. N° 129-2021-MINEM/DGH. consignada en la figura 4 (MINEM, 2021a).

Figura 4.

Metodología para estudios FTA



Nota: (MINEM, 2021a)

2.1.3.3.2 Análisis de Árbol de Eventos (ETA)

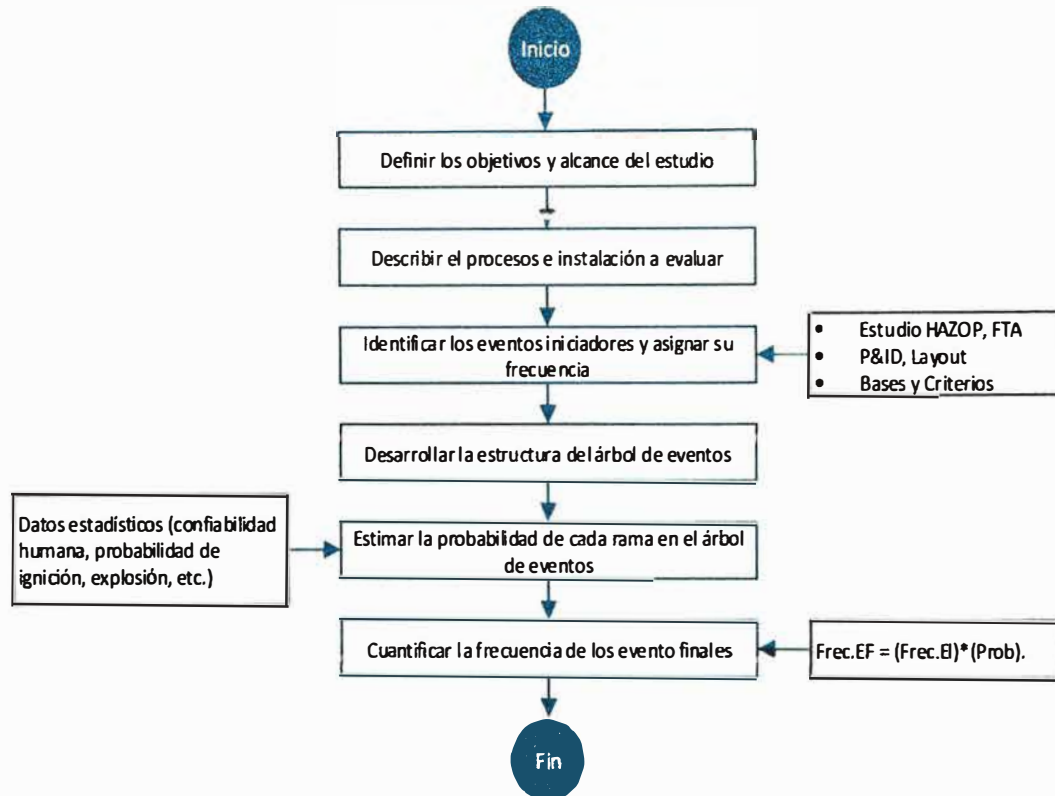
El objetivo principal del Análisis de Árbol de Eventos (por sus siglas en inglés, *ETA*) es identificar y cuantificar la frecuencia de los resultados que pudiesen ocurrir dado un evento iniciador, siguiendo la metodología general de esta técnica consignada en la figura 5.

El árbol de eventos constituye una herramienta metodológica que posibilita la representación estructurada y cronológica de la dinámica de propagación del suceso iniciador, ya sea mediante la activación secuencial de salvaguardas técnicas, la operatividad habitual de las funciones de planta, o la ejecución de maniobras por parte del operador; así como en escenarios donde se ha producido una pérdida de contención, abarcando la totalidad del espectro de consecuencias potenciales.

Estas manifestaciones pueden ser de naturaleza directa (tales como deflagraciones, detonaciones, entre otras) o de índole indirecta, como fenómenos de escalamiento o efecto dominó que comprometan instalaciones colindantes. (MINEM, 2021a).

Figura 5.

Metodología General para estudios ETA



Nota: (MINEM, 2021a)

2.1.4 Matriz de riesgo

Una matriz de riesgos es una sencilla pero eficaz herramienta para identificar los riesgos más significativos inherentes a las actividades de una empresa, tanto de procesos como de fabricación de productos o puesta en marcha de servicios. Por lo tanto, es un instrumento válido para mejorar el control de riesgos y la seguridad de una organización (Crawley & Tyler, 2015).

Además, permite clasificar y jerarquizar el riesgo a las personas, instalaciones y medio ambiente, y nos ayuda a focalizar y priorizar las acciones correctivas que se deben incorporar en las etapas de control durante su operación, con el fin de proteger a las personas y dar confiabilidad a los sistemas (Crawley & Tyler, 2015).

$$R \text{ (Magnitud de Riesgo)} = F \text{ (Índice de Frecuencia)} \times S \text{ (Índice de Severidad)}$$

De la relación anterior tenemos que la S es Severidad, F es la Frecuencia y la R es Magnitud de riesgo. A continuación, se detallan cada uno de estos parámetros:

- Severidad (S): La severidad del posible riesgo, nos permite determinar la gravedad de los daños que presentan los equipos, instalaciones, medio ambiente y personas (Crawley & Tyler, 2015).
- Frecuencia (F): La frecuencia nos permite determinar la ocurrencia de riesgo ya sea por incendio, explosión, derrame, entre otros, en las instalaciones y/o equipos (Crawley & Tyler, 2015).
- Magnitud de riesgo (R): La magnitud de riesgo permite clasificar y jerarquizar el riesgo a las personas, medio ambiente e instalación, de manera de focalizar y priorizar las acciones (Crawley & Tyler, 2015).

2.2 Marco conceptual.

Eventos críticos: Aquellos que presentan los niveles de riesgo con mayores magnitudes y/o aquellos que, luego de haberse determinado las consecuencias de cada evento y/o escenario, se identifique que podrían producir los efectos más críticos a terceros en sus bienes y personas (OSINERGMIN, 2022).

Evento crítico: Determinación de un evento hipotético, en el cual se considera la ocurrencia de un accidente bajo condiciones específicas, definiendo mediante la aplicación de modelos matemáticos y criterios acordes a las características de los procesos y/o materiales, las zonas potencialmente afectables (MINEM, 2002).

Contaminación: Acción que resulta de la introducción de contaminantes al ambiente (MINEM, 2002).

Contaminante: Material, sustancia o energía que al incorporarse o actuar sobre el ambiente, degradan su calidad original a niveles no propios para la salud y el bienestar humano, poniendo en peligro los ecosistemas naturales (MINEM, 2002).

Líquido inflamable: Los hidrocarburos líquidos con punto de inflamación menor de 37,8°C (100°F), y una presión de vapor que no exceda los 2,812 Kg/cm² (40 psia) a 37,8°C (100°F). Se denominará como Clase I, y se subdividen en:

- Clase IA, cuando su punto de inflamación es menor de 22,8°C (73°F) y su punto de ebullición es menor de 37,8°C (100°F) (MINEM, 2020).
- Clase IB, cuando su punto de inflamación es menor de 22,8°C (73°F) y tienen punto de ebullición igual o mayor de 37,8°C (100°F) (MINEM, 2020).
- Clase IC, incluye a aquellos líquidos con punto de inflamación mayor a 22,8°C (73°F) pero menor de 37,8°C (100°F) (MINEM, 2020).

Mitigación: Conjunto de actividades destinadas para disminuir las consecuencias ocasionadas por la ocurrencia de un accidente (Crawley & Tyler, 2015).

Punto de inflamación (Flash point): La menor temperatura a la que un hidrocarburo líquido con suficiente vapor puede inflamarse en la presencia de una fuente de ignición (MINEM, 1993)

Salvaguarda: Sistema físico o de ingeniería o acción humana (basado en procedimientos específicos o controles administrativos) que se implementa para prevenir, controlar o impedir que la energía liberada llegue a los activos y cause daños. Las salvaguardas también se denominan barreras, capas de protección, defensas, controles o contramedidas (Rausand & Haugen, 2020).

Gasohol: Gasolina que se vende al público usuario, el cual es una mezcla de la gasolina producida en Refinería y Alcohol Carburante en un porcentaje en volumen de Alcohol Carburante de 7,8% (siete coma ocho por ciento) (MINEM, 2007a).

Gasohol Regular: Gasolina de 91 octanos (RON) como mínimo, de color rojo y con contenido de azufre menor a 50 ppm (MINEM, 2021b; PETROPERÚ, 2024).

Gasohol Premium: Gasolina de 96 octanos (RON) como mínimo, de color amarillo y con contenido de azufre menor a 50 ppm (MINEM, 2021b; PETROPERÚ, 2024).

Diésel B5 S-50: Es la mezcla que contiene Diésel N° 2 y Biodiesel B100, con un 5% en base volumétrica de Biodiesel B100 contenido en la mezcla; siendo el diferencial volumétrico el porcentaje de Diésel N° 2 (MINEM, 2007a).

Diésel N.° 2 S-50: Combustible derivado de hidrocarburos y obtenido de procesos de refinación, presenta un contenido de azufre máximo de 50 partes por millón (MINEM, 2021b).

Biodiésel B100: Biodiesel puro, sin mezcla alguna, que cumple las especificaciones establecidas en las Normas Técnicas Peruanas o, mientras éstas no sean aprobadas, la norma ASTM D 6751-06 en su versión actualizada o las correspondientes normas internacionales (MINEM, 2007a).

Alcohol carburante: Es el Etanol Anhidro Desnaturalizado, obtenido de la mezcla del Etanol Anhidro con la Sustancia Desnaturalizante en una proporción volumétrica no inferior a 2% (dos por ciento) ni superior a 3% (tres por ciento) en el caso de ser gasolina motor sin contenido de plomo (MINEM, 2007a).

Áreas de Alta Consecuencia: Áreas geográficas de terreno en donde una fuga o derrame de líquido o gas podría tener un impacto significativamente adverso para la población, el ambiente, las propiedades o la navegación comercial (MINEM, 2007c).

También se puede definir como:

- (1) Una vía navegable comercialmente, lo que significa una vía fluvial donde existe una probabilidad sustancial de navegación comercial;
- (2) Un área de alta población, lo que significa un área urbanizada, según lo definido y delineado por la Oficina del Censo, que contiene 50,000 o más personas y tiene una densidad de población de al menos 1,000 personas por milla cuadrada;

- (3) Otra área poblada, que significa un lugar, según lo definido y delineado por la Oficina del Censo, que contiene una población concentrada, como una ciudad, pueblo, pueblo u otra área residencial o comercial incorporada o no incorporada;
- (4) Un área inusualmente sensible, como se define en § 195.6. (API, 2019)

2.3 Glosario.

ASME: Siglas de la “Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos”

ASTM: Siglas de la “Sociedad Americana para Pruebas y Materiales”

D.S.: Siglas de “Decreto Supremo”

E.R.S.: Acrónimo de “Estudio de Riesgo de Seguridad”

IOGP: Siglas de “La Asociación Internacional de Productores de Petróleo y Gas”

MINEM: Siglas del “Ministerio de Energía y Minas”

NFPA: Siglas de la “Asociación Nacional de Protección contra Incendios”

OSINERGMIN: Acrónimo de “Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería”

R.C.D.: Siglas de “Resolución del Consejo Directivo”

P&ID: Siglas de “Diagrama de Tuberías e Instrumentación”

Riesgo aceptable. Riesgo sobre el cual se ha tomado la decisión informada de aceptarlo. Están sujetos a monitoreo (MINEM, 2021a).

Riesgo no aceptable. Riesgo que no puede justificarse, salvo en circunstancias extraordinarias (MINEM, 2021a).

Riesgo tolerable. Riesgo sobre el cual hay la disposición de aceptarlo, después de su tratamiento previo (MINEM, 2021a).

Probabilidad: También llamado en este informe como frecuencia, es una expresión de que un evento ocurra o no, en una secuencia de eventos durante un intervalo de tiempo. Por defecto, la probabilidad debe expresarse como un número comprendido entre 0 y 1 (MINEM, 2021a).

Frecuencia de ocurrencia: La frecuencia de ocurrencia es el número de veces que ocurre un suceso en un periodo de tiempo. También puede hacer referencia al número de veces que aparece un valor o modalidad en una distribución de datos, en términos absolutos o relativos (Ikusmira, 2025).

Riesgo: Combinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento peligroso (en un período de tiempo), o la frecuencia de ocurrencia de dicho evento, y la severidad o magnitud de sus consecuencias (lesiones, daño al ambiente, pérdidas económicas, etc.) (MINEM, 2021a).

Consecuencias: Resultado de un evento que afecta los objetivos. Un evento puede conducir a una serie de consecuencias, las cuales pueden ser expresadas cualitativa o cuantitativamente (MINEM, 2021a).

Análisis Cualitativo de Riesgos: Metodología de escrutinio de riesgos estructurada habitualmente en formato tabular o de planilla, en la cual se consignan las amenazas detectadas susceptibles de originar eventualidades de magnitud, con el propósito de inferir la probabilidad y la severidad de sus repercusiones. A través de la aplicación de categorías preestablecidas de verosimilitud y gravedad, se determina un gradiente de riesgo para cada eventualidad examinada. Para llevar a cabo el Análisis Cualitativo de Riesgos, es imprescindible transponer las amenazas reconocidas al marco conceptual de “escenarios” (MINEM, 2021a).

Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR): Procedimiento analítico destinado a cuantificar el riesgo de fatalidades derivadas del manejo, traslado o acopio de sustancias de naturaleza peligrosa. La estimación del riesgo se efectúa mediante técnicas numéricas y la simulación de los efectos potenciales, los cuales se representan mediante Curvas de Isoriesgo, Riesgo Individual y Curvas FN asociadas al Riesgo Social. Esta metodología computa un riesgo de carácter acumulativo, resultante de la exposición a la totalidad de eventualidades plausibles originadas por la actividad en cuestión, susceptibles de incidir en la integridad de las personas (MINEM, 2021a).

Análisis de Riesgos: Procedimiento mediante el cual se establece el umbral de riesgo, a través de la ponderación de la magnitud de las secuelas asociadas a un eventual suceso y la frecuencia estimada de su manifestación. El análisis de riesgo provee la base para la evaluación de los impactos provenientes de estos y para las decisiones sobre su tratamiento (MINEM, 2021a).

Estudio de Riesgos de Seguridad: Aquel que abarca dimensiones vinculadas a la salvaguarda en las infraestructuras y operaciones relativas a hidrocarburos, así como en su zona de injerencia, con la finalidad de dilucidar y/o constatar las condiciones y disposiciones instaladas en el entorno. Asimismo, contempla la anticipación de los efectos y repercusiones derivadas de la implantación y funcionamiento de la instalación, señalando los protocolos, disposiciones y mecanismos de control que deberán implementarse con el fin de suprimir potenciales condiciones adversas que pudieran emerger durante su operatividad (MINEM, 2020).

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Alcance del estudio.

Debido a la alta demanda de combustibles en el país, en especial del diésel B5 S-50, una Refinería al sur de la ciudad de Lima se decidió instalar un nuevo ducto submarino para la carga/descarga de combustibles líquidos. El alcance del estudio de este nuevo ducto submarino incluyó la carga/descarga de diésel B5 S-50, gasohol premium y gasohol regular, desde el ingreso de este al mar hasta la recepción del producto en un buque carguero mar adentro, y no se consideró la parte playa del ducto submarino de transporte como parte del proyecto.

Este alcance nos obliga a evaluar si el alcance del estudio cumple con los requisitos para que el área donde será instalado el nuevo ducto submarino debe ser considerada una zona de alta consecuencia, tal como lo señala el Artículo 26° del Anexo 2 del D.S. 081-2007-EM o lo descrito por la norma en la 49 CFR Part 195.450 "Definición de áreas de alta consecuencia" (CFR, 2000; MINEM, 2007c).

En el caso del DS-081-2007-EM, el Artículo 26° del Anexo 2 indica:

"Artículo 26°.- Determinación de Áreas de Alta Consecuencia

La determinación de Áreas de Alta Consecuencia se puede realizar de dos maneras:

Método A: El Área de Alta Consecuencia está determinada por:

- a) La Localización Clase 3²
- b) La Localización Clase 4³

² Localización Clase 3: Es cualquier sección de 1,600 metros que tiene 46 o más edificaciones previstas para la ocupación humana, en un ancho de 200 metros a cada lado del eje de la tubería. Esta división deberá probarse a no menos de 1.4 veces de la máxima presión de operación (MOP). Abarca las áreas de desarrollo urbano, centros comerciales, áreas residenciales, áreas industriales, y otras áreas pobladas no consideradas en los requerimientos en Localización Clase 4.

³ (d) Localización Clase 4: Incluye áreas donde los edificios multifamiliares de 4 o más pisos son predominantes, el tráfico vehicular es denso y se tiene instalaciones subterráneas. Esta división deberá probarse a no menos de 1.4 veces de la máxima presión de operación (MOP).

c) Áreas fuera de los límites de las Localizaciones 3 ó 4 en donde el Radio Circular de Impacto es mayor de doscientos (200) metros y dentro del Área Circular de Impacto se encuentran veinte (20) o más edificaciones destinadas a ser ocupadas

d) El área dentro del Área Circular de Impacto en donde se encuentra una Localización identificada

Método B: El Área de Alta Consecuencia está determinada por:

a) Cuando dentro del Área Circular de Impacto se encuentra una Localización Identificada

b) Cuando dentro del Área Circular de Impacto se encuentra veinte (20) ó más edificaciones para ser ocupadas

c) En el caso de Radios Circulares de Impacto mayores que 200 metros se calcula el número de edificaciones para ser ocupadas de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{Número de edificaciones} = 20 \times (660/\text{Radio Circular de Impacto})^2$$

Radio Circular de Impacto: en pies”

Como podemos apreciar, los métodos A y B no estarían dentro de nuestro análisis debido a que no se tienen edificaciones alrededor del ducto y tampoco localizaciones identificadas.

Sin embargo, la norma en la 49 CFR Part 195.450 define un área de alta consecuencia como:

- Una vía navegable comercialmente, lo que significa una vía acuática donde existe una probabilidad sustancial de navegación comercial.
- Un área de alta población, lo que significa un área urbanizada, según lo definido y delineado por la Oficina del Censo, que contiene 50,000 o más personas y tiene una densidad de población de al menos 1,000 personas por milla cuadrada;

- Otra área poblada, que significa un lugar, según lo definido y delineado por la Oficina del Censo, que contiene una población concentrada, como una ciudad, pueblo, aldea u otra área residencial o comercial incorporada o no incorporada;
- Un área inusualmente sensible, como se define en § 195.6.

Según lo indicado en la norma 49 CFR 195.6, un área inusualmente sensible significa un área de agua potable o de recursos ecológicos que es inusualmente sensible al daño ambiental de una liberación peligrosa de tubería líquida.

(a) Un recurso de agua potable de un área inusualmente sensible es:

(1) La toma de agua para un Sistema de agua comunitario (CWS) o un Sistema de agua no comunitario no transitorio (NTNCWS) que obtiene su suministro de agua principalmente de una fuente de agua superficial y no tiene una fuente de agua potable alternativa adecuada;

(2) El Área de Protección de la Fuente de Agua (SWPA) para un CWS o un NTNCWS que obtiene su suministro de agua de un acuífero Clase I o Clase IIA y no tiene una fuente alternativa adecuada de agua potable. Cuando un estado aún no ha identificado el SWPA, se utilizará el Área de Protección de Wellhead (WHPA) hasta que el estado haya identificado el SWPA; o

(3) El área de recarga del acuífero de origen único donde el acuífero de origen único es un acuífero kárstico en la naturaleza.

(b) Un recurso ecológico en áreas inusualmente sensibles es:

(1) Un área que contiene una especie o comunidad ecológica en peligro crítico;

(2) Un área de ensamblaje de especies múltiples;

(3) Una concentración de aves acuáticas migratorias zona;

(4) Un área que contiene un peligro especies, especies amenazadas o en peligro de extinción, especies de mamíferos marinos agotados, o una comunidad ecológica en peligro donde está la especie o comunidad acuático, acuático dependiente o terrestre con un rango limitado; o

(5) Un área que contiene un peligro especies, especies amenazadas o en peligro de extinción, especies de mamíferos marinos agotados, o comunidad ecológica en peligro donde la especie o comunidad ocurre se considera uno de los más viable, de mayor calidad o en el mejor estado, identificado por un elemento ranking de ocurrencia (EORANK) de A (excelente calidad) o B (buena calidad).

En la bahía de Lurín, bien pudiera presentar especies de fauna en peligro que estuvieran clasificadas en el D.S. N° 004-2014-MINAGRI: “Decreto Supremo que aprueba la actualización de la lista de clasificación y categorización de las especies amenazadas de fauna silvestre legalmente protegidas que aprueba la actualización de la lista de clasificación y categorización de las especies amenazadas de fauna silvestre legalmente protegidas”. A su vez la costa peruana sirve de corredor ecológico para decenas de especies de aves migratorias que viajan desde el hemisferio norte al hemisferio sur, como parte de su ciclo de vida (MINAGRI, 2014).

Además, el D.S. 081-2007-EM. hace referencia a la norma API 1160 “Gestión de la integridad del sistema para tuberías de líquidos peligrosos”, la cual es una práctica recomendada aplicable a los sistemas de tuberías utilizados para transportar líquidos peligrosos, tal como se define en la norma 49 CFR Parte 195.2 (API, 2019).

Según lo que indica la norma 49 CFR Parte 195.2., una tubería o línea de tubería significa un tubo, generalmente cilíndrico, a través del cual un líquido peligroso o dióxido de carbono fluye de un punto a otro; y un líquido peligroso “significa petróleo, productos derivados del petróleo, amoníaco anhidro y etanol u otro combustible no relacionado con el petróleo, incluido el biocombustible, que es inflamable, tóxico o dañino para el medio ambiente si se libera en cantidades significativas”.

Sumado a esto, considerando la presencia de un ecosistema marino costero, donde se interrelacionan poblaciones de diferentes especies, partiendo desde el plancton como sustento de la cadena trófica, pasando por peces, aves y mamíferos marinos, y todos ellos potencialmente podrían ser afectados de darse un derrame de hidrocarburos provenientes de las líneas submarinas o de las actividades en el terminal multiboyas.

En consecuencia, la bahía de Lurín constituye una vía acuática con potencial de tráfico marítimo de carácter comercial, y, en caso de producirse un evento de liberación de hidrocarburos, podría generarse una afectación ambiental de magnitud significativamente adversa. Por ello, el área destinada a la instalación de los ductos submarinos será clasificado como una zona de alta consecuencia, dada su susceptibilidad a impactos severos.

3.2 Materiales.

3.2.1 Propiedades fisicoquímicas del combustible líquido.

Dentro de las propiedades fisicoquímicas del diésel B5 S-50, el gasohol premium y el gasohol regular se consideró:

- Densidad y Gravedad API.
- Masa molar aproximada de cada combustible.

3.2.2 Variables operativas del ducto submarino.

Dentro de las variables operativas del ducto submarino se tuvo:

- Presión máxima de carga/descarga
- Temperatura del fluido
- Caudal máximo de carga/descarga
- Diámetro nominal de la tubería
- Características mecánicas de la tubería.
- Altura a la que se encuentra el buque carguero mar adentro con respecto al nivel del mar.

3.2.3 Factores climatológicos de la zona del proyecto.

Dentro de los factores climatológicos de la zona del proyecto operativas del ducto submarino se tuvo:

- Temperatura ambiental.
- Velocidad del viento.
- Corrientes marinas.

3.3 Metodología del Trabajo de Investigación.

3.3.1 Análisis cualitativo de riesgos

Como se ha definido en el ítem 2.1.1. “Estudio de Riesgos de Seguridad en el marco normativo peruano”, la técnica cualitativa utilizada para la determinación de los peligros y eventos críticos del nuevo ducto submarino fue la metodología “*Hazard and Operability Analysis: HAZOP*”, tal como lo señala el D.S. N° 081-2007-EM, la RCD N° 088-2022-OS/CD y la R.D. N° 129-2021-MINEM/DGH, (MINEM, 2007c, 2021a; OSINERGMIN, 2022).

3.3.1.1 Metodología HAZOP

El análisis HAZOP constituye una metodología sistemática de indagación utilizada para la detección y abordaje de potenciales desviaciones operativas que podrían derivar en situaciones de peligro dentro de entornos industriales, antes de la materialización de incidentes con capacidad de comprometer la integridad del personal, los activos físicos o la continuidad operativa. Este tipo de estudios se ejecuta preferentemente durante las fases de concepción y construcción de instalaciones nuevas, ante la incorporación de modificaciones sustanciales o ampliaciones en los procesos existentes. Asimismo, su implementación periódica es frecuentemente exigida por entidades reguladoras como parte de los requerimientos normativos asociados a la gestión de riesgos en instalaciones industriales (SPHERA, 2021).

La metodología comenzó con la desagregación del proceso en una secuencia de subsistemas funcionales o “nodos”, los cuales fueron sometidos a un escrutinio colaborativo por parte de un equipo multidisciplinario de especialistas. Dicho análisis se centró en la identificación de potenciales desviaciones de las variables operativas con respecto a las premisas originales de diseño, a fin de evaluar su impacto sobre la integridad y desempeño del sistema.

Se utilizaron palabras claves (NO, MÁS, MENOS, etc.) que aplicadas a los parámetros de proceso (CAUDAL, PRESIÓN, TEMPERATURA, etc.) dan lugar a desviaciones (MÁS PRESIÓN, MENOS TEMPERATURA, etc.) del desarrollo normal del proceso, además, de identificar sus posibles causas y consecuencias (NSW Government Planning, 2008)

3.3.1.2 Etapas

3.3.1.2.1 Definición del área de estudio

Consistió en delimitar las áreas a las cuales se aplica la técnica. En una determinada instalación de proceso, se considera el área como objeto de estudio, donde se definirán para mayor comodidad una serie de subsistemas o líneas de proceso que correspondan a entidades funcionales propias: línea de carga a un depósito, separación de productos, entre otros (IEC, 2016).

3.3.1.2.2 Definición de nodos

En cada uno de estos subsistemas o trayectos funcionales se delimitaron una serie de nodos o puntos de control estratégicamente localizados dentro de la arquitectura del proceso. Estos corresponden, por ejemplo, a segmentos de conducción para la recepción del fluido, etapas de impulsión asociadas al accionamiento de equipos dinámicos como bombas, o unidades de confinamiento tales como reservorios de almacenamiento, entre otros.

Cada nodo fue individualizado y enumerado de forma correlativa dentro de cada subsistema, siguiendo la secuencia lógica del proceso, con el fin de optimizar la claridad y facilitar su manejo. Además, fueron caracterizados por un conjunto de variables de proceso.

Para asegurar la operatividad de esta técnica, fue necesario representar mediante esquemas simplificados y diagramas de flujo todos los subsistemas involucrados, especificando con precisión su localización dentro del conjunto.

El documento que actuó como soporte principal del método es el diagrama de flujo de proceso, o de tuberías e instrumentos, P&ID, entre otros (IEC, 2016).

3.3.1.2.3 Aplicación de palabras guía

Las denominadas palabras guía fueron empleadas como vectores conceptuales que permiten caracterizar el comportamiento funcional de cada uno de los nodos previamente definidos, en relación con los flujos que ingresan o egresan de un componente determinado del sistema. Estas fueron aplicadas tanto a operaciones funcionales (transformaciones químicas, transferencias de materia), como a magnitudes operativas específicas, tales como presión, régimen de flujo, temperatura, entre otras variables críticas (IEC, 2016).

3.3.1.2.4 Definición de las desviaciones a estudiar

Para cada nodo se formularon de manera metódica todas las desviaciones inherentes a la aplicación de cada palabra guía sobre una variable o actividad específica. Con el propósito de efectuar un análisis riguroso, se consideraron todas las combinaciones factibles entre palabra guía y variable de proceso, eliminándose aquellas desviaciones carentes de pertinencia para el nodo en cuestión. De forma concomitante a la identificación de las desviaciones, se deben señalar las causas potenciales que las originan y, subsecuentemente, las repercusiones derivadas de dichas anomalías (IEC, 2016).

En la tabla 3 se presentan algunos ejemplos de aplicación de palabras guía y desviaciones.

Tabla 3.

Ejemplos de desviaciones y sus palabras guía asociadas

Tipo de desviación	Palabra guía	Ejemplo de interpretación para la industria de procesos	Ejemplo de interpretación para un sistema electrónico programable, PES
Negativo	No	Ninguna parte de la intención se logra, por ejemplo, ningún flujo	No se pasa ninguna señal de datos o control
Modificación cuantitativa	Más	Aumento cuantitativo, p. ej. aumento de la temperatura	Los datos se transmiten a una velocidad superior a la prevista

Tipo de desviación	Palabra guía	Ejemplo de interpretación para la industria de procesos	Ejemplo de interpretación para un sistema electrónico programable, PES
Modificación cuantitativa	Menos	Una disminución cuantitativa, por ejemplo, menor temperatura	Los datos se transmiten a una velocidad inferior a la prevista
Modificación cualitativa	Tan bueno como	Impurezas presentes Ejecución simultánea de otra operación/paso	Alguna señal adicional o espuria está presente
Modificación cualitativa	Parte de	Solo se logra una parte de la intención, es decir, solo se realiza una parte de la transferencia de fluido	Los datos o señales de control están incompletos
Sustitución	Reversa	Cubre el flujo inverso en tuberías y reacciones químicas inversas	Normalmente no es pertinente
	Otro que	Se logra un resultado distinto de la intención original, es decir, la transferencia de material erróneo	Los datos o señales de control son incorrectos
Tiempo	Temprano	Algo ocurre temprano en relación con el tiempo del reloj, por ejemplo, enfriamiento o filtración	Las señales llegan demasiado pronto con referencia a la hora del reloj
	Tarde	Algo ocurre tarde en relación con la hora del reloj, por ejemplo, enfriamiento o filtración	Las señales llegan demasiado tarde con referencia a la hora del reloj
Orden o secuencia	Antes	Algo ocurre demasiado pronto en una secuencia, por ejemplo, mezclar o calentar	Las señales llegan antes de lo previsto dentro de una secuencia

Tipo de desviación	Palabra guía	Ejemplo de interpretación para la industria de procesos	Ejemplo de interpretación para un sistema electrónico programable, PES
Orden o secuencia	Después	Algo ocurre demasiado tarde en una secuencia, por ejemplo, mezclar o calentar	Las señales llegan más tarde de lo previsto dentro de una secuencia

Nota: (IEC, 2016)

3.3.1.3 Recursos Necesarios

Los encargados de conducir la implementación de la metodología HAZOP constituyeron un colectivo selecto de especialistas dotados de conocimiento experto en cada disciplina correspondiente; su función fue responder a interrogantes precisas y evaluar la operatividad de los procesos (IEC, 2016).

El equipo multidisciplinario estuvo conformado por:

- Facilitador / Líder HAZOP
- Escriba del estudio HAZOP
- Personal de la empresa solicitante con suficiente experiencia en la operación, mantenimiento, control y/o diseño de la instalación y/o modificación.
- Operaciones
- Ingeniería de Procesos
- Seguridad de Procesos
- Ingeniería de Proyectos
- Instrumentación & Control
- Mantenimiento
- Seguridad e Higiene
- Confiabilidad
- Entre otros.

Se han implementado diversos algoritmos y aplicaciones informáticas que posibilitan la sistematización del análisis y la documentación en tiempo real de las sesiones de HAZOP, optimizando así la trazabilidad y eficiencia del proceso evaluativo. En el presente Trabajo se utiliza el *software* especializado en análisis de riesgo PhaPro 8 de Dyadem actualmente perteneciente a Sphera.

3.3.2 Análisis cuantitativo de riesgos

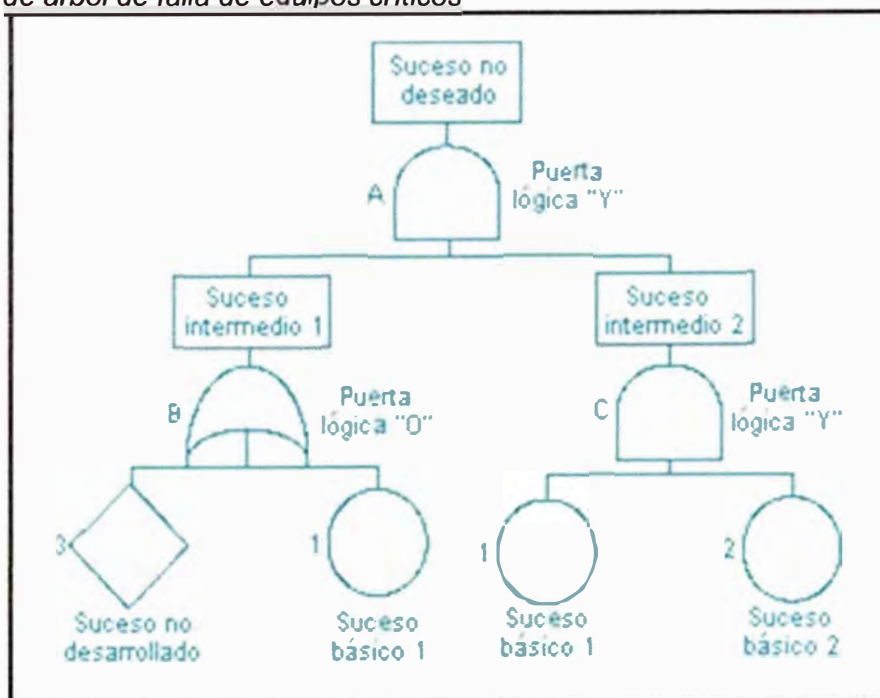
3.3.2.1 Determinación de la frecuencia de cada uno de los eventos críticos identificados.

3.3.2.1.1 Análisis de Árbol de Falla (FTA)

El Análisis mediante Árboles de Fallas (Fault Tree Analysis - FTA) constituye una técnica de carácter deductivo orientada al estudio de un evento adverso específico, proporcionando un marco metodológico estructurado para la identificación de las cadenas causales subyacentes que han conducido a la materialización del accidente, tal como se puede apreciar en la figura 6. El hecho de su gran utilización se basa en que puede proporcionar resultados tanto cualitativos mediante la búsqueda de caminos críticos, como cuantitativos, en términos de probabilidad de fallos de componentes (AIChE, 2000).

Figura 6.

Diagrama de árbol de falla de equipos críticos














Nota: (AIChE, 2000)

Para el tratamiento del problema se utilizó un modelo gráfico que muestra las distintas combinaciones de fallos de componentes y/o errores humanos cuya ocurrencia simultánea es suficiente para desembocar en un suceso accidental, y que permite determinar la expresión de sucesos complejos estudiados en función de los fallos básicos de los elementos que intervienen en él. El procedimiento consiste en la descomposición jerárquica y sistemática de un evento complejo en eventos intermedios hasta alcanzar eventos elementales, comúnmente vinculados a fallas de componentes, equivocaciones humanas o disfunciones operativas. Esta desagregación se articula mediante el empleo de compuertas lógicas, las cuales simbolizan operadores del álgebra de eventos. Cada elemento del análisis se plasma gráficamente durante la construcción del árbol, utilizando notaciones diferenciadas que representan las tipologías de eventos, las compuertas lógicas, así como las transferencias o extensiones subsiguientes del árbol de fallas, los cuales han sido detalladas y descritas en la figura 7.

Figura 7.

Simbología.

SÍMBOLOS	SIGNIFICADO DEL SÍMBOLO
	SUCESO BÁSICO. No requiere de posterior desarrollo al considerarse un suceso de fallo básico.
	SUCESO NO DESARROLLADO. No puede ser considerado como básico, pero sus causas no se desarrollan, sea por falta de información o por su poco interés.
	SUCESO INTERMEDIO. Resultante de la combinación de sucesos más elementales por medio de puertas lógicas. Asimismo se representa en un rectángulo el "suceso no deseado" del que parte todo el árbol.
	<p>PUERTA "Y"</p>  <p>El suceso de salida (S) ocurrirá si, y sólo si ocurren todos los sucesos de entrada (E1 B1).</p>
	<p>PUERTA "O"</p>  <p>El suceso de salida (S) ocurrirá si ocurren uno o más de los sucesos de entrada (E1 B1).</p>
	SÍMBOLO DE TRANSFERENCIA. Indica que el árbol sigue en otro lugar.
	PUERTA "Y" PRIORITARIA. El suceso de salida ocurrirá si, y sólo si todas las entradas ocurren en una secuencia determinada, que normalmente se especifica en una elipse dibujada a la derecha de la puerta.
	PUERTA "O" EXCLUSIVA. El suceso de salida ocurrirá si lo hace una de las entradas, pero no dos o más de ellas.
	PUERTA DE INYECCIÓN. La salida ocurrirá si, y sólo si lo hace su entrada y además se satisface una condición dada (X).

Nota: (AIChE, 2000)

El análisis del árbol es una estructura lógica para poder determinar las combinaciones mínimas de sucesos básicos que hagan que se produzca el suceso no deseado o evento que se pretende evitar (noción de "conjunto mínimo de fallos"). Además, la estructura lógica de los árboles de falla puede ser expresada en términos de ecuaciones algebraicas de Boolean, la cual es usada para reducir ecuaciones compuestas de variables que pueden ser tomadas en solo dos valores utilizando las "Reglas selectas del álgebra de Boolean" , las cuales se describen en la tabla 4 (AIChE, 2000).

Tabla 4.

Reglas selectas del álgebra de Boolean

Regla	Forma matemática
Regla asociativa	$A+B = B+A$
Regla distributiva	$A+(B+C) = (A+B)+C$
Regla idempotente	$A \cdot A = A$
Regla de absorción	$A \cdot (A+B) = A$

Nota: (AIChE, 2000)

Para la elaboración del árbol de falla propuesto, se usaron estas reglas ya que muchos eventos básicos son repetitivos. Además, para poder determinar los valores de las frecuencias de cada uno de estos eventos básicos tuvimos en consideración que dichas valoraciones de frecuencia se encuentran en fuentes bibliográficas reconocidas a nivel internacional hasta obtener las frecuencias de los eventos iniciales no deseados (MINEM, 2021a).

Para el cálculo de dichas frecuencias se tuvo en consideración el “*Reference Manual Bevi Risk Assessments version 3.2 - module C*” (RIVM, 2009).

Debido a que el nuevo ducto submarino está enterrado y que la parte más probable donde puede ocurrir los eventos críticos es en la manguera de carga/descarga, la “*Reference Manual Bevi Risk Assessments version 3.2*” nos indicó los valores de probabilidad de fallas para dichas mangueras, tal como se aprecia en la figura 8 (RIVM, 2009).

Figura 8.

Frecuencias para los escenarios de actividades de carga/descarga.

	Frequency Loading/unloading arm (per hour)	Frequency Loading/unloading hose (per hour)
1. Rupture of loading/unloading arm or loading/unloading hose	3×10^{-8}	4×10^{-6}
2. Leak in loading/unloading arm or loading/unloading hose with an effective diameter of 10% of the nominal diameter, up to a maximum of 50 mm.	3×10^{-7}	4×10^{-5}

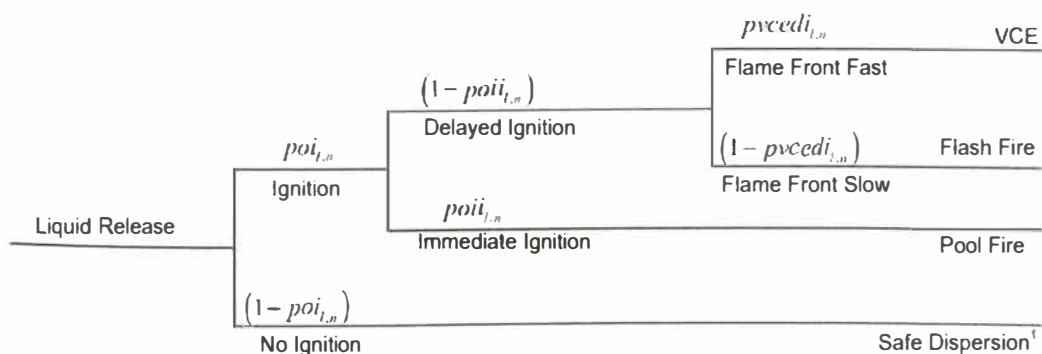
Nota: (RIVM, 2009)

3.3.2.1.2 Análisis de Árbol de Eventos (ETA)

Como se obtuvo el valor de la probabilidad inicial de falla para la manguera de carga/descarga, la norma API RP 581 “*Risk-Based Inspection Technology*” nos permitió desarrollar el árbol de eventos considerando la probabilidad de ignición del derrame, ya sea una ignición inmediata o una ignición tardía. Para mayor detalle de los árboles de eventos considerados, ver las figuras 9 y 10. Sin embargo, para nuestro análisis se consideró que los valores de probabilidad de ignición son 0 debido a que en el mar no se tendría el mencionado incendio (API, 2016).

Figura 9.

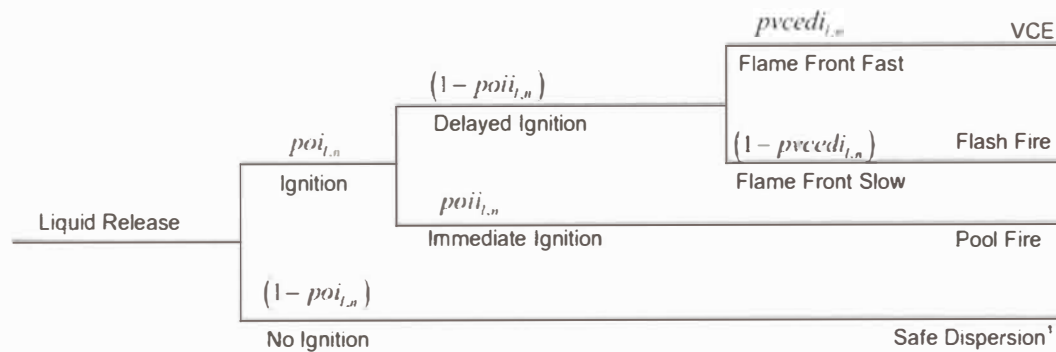
Proceso análisis de árbol de eventos para el caso de liberaciones.



Nota: (API, 2016)

Figura 10.

Proceso análisis de árbol de eventos para el caso de ruptura



Nota: (API, 2016)

3.3.2.2 Determinación de las consecuencias de los eventos críticos identificados.

3.3.2.2.1 Criterios de selección de los tamaños de orificio del derrame en la manguera flexible de carga/descarga.

Se tiene tres tamaños de orificio del derrame en la manguera de carga/descarga (RIVM, 2009):

- Un derrame a través de un agujero con diámetro equivalente al 10% de diámetro nominal de la manguera de carga/descarga (RIVM, 2009).
- Un derrame a través de un agujero de 50 mm de diámetro de la manguera de carga/descarga (RIVM, 2009).
- Un derrame a través de la rotura total de la manguera de carga/descarga (RIVM, 2009).

3.3.2.2.2 Determinación del caudal de derrame a través del orificio de derrame en la manguera de carga/descarga

Para determinar el caudal del derrame, a través de la ecuación 1, primero se tuvo que hallar la velocidad de descarga del fluido a través de un orificio de derrame y el área del orificio del derrame.

$$Q = v \times A = v \times A = v \times \frac{\pi d^2}{4} \quad (1)$$

Donde:

- Q: Caudal del derrame
- v : Velocidad del fluido en la sección considerada
- d : diámetro del orificio del derrame

Y la velocidad del fluido en la sección considerada se determinó a través del Principio de Bernoulli mediante la ecuación 2. (Bernoulli, 1738).

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_f \quad (2)$$

Donde:

- P_1 y P_2 : Presión a lo largo de la línea de corriente
- v_1 y v_2 : Velocidad del fluido en la sección considerada
- z_1 : Altura relativa hasta la mitad de la tubería
- z_2 : Altura relativa hasta la parte baja de la tubería (ubicación del orificio)
- ρ : Densidad del fluido
- g : Aceleración gravitatoria
- h_f : Sumatoria de pérdidas de fricción en la tubería

3.3.2.2.3 Criterios para la selección del tiempo de la duración del derrame.

Para determinar el tiempo de la duración del derrame, se verificó si el sistema posee un sistema de bloqueo automático, un sistema de bloqueo semiautomático o posee un sistema de bloqueo no automatizado (RIVM, 2009).

- Un sistema de bloqueo automático es un sistema en el que la detección de fugas y el cierre de las válvulas de bloqueo se realizan automáticamente sin la necesidad de la intervención de un operador. El tiempo estimado para el cierre de las válvulas de bloqueo es igual a 2 minutos automatizado (RIVM, 2009).
- Un sistema de bloqueo semiautomático es un sistema en el que la detección de la fuga se realiza automáticamente y conduce a una señal de alarma en una sala de control con personal continuo.

- Tras la validación de la señal, el operador cierra las válvulas de bloqueo accionando un interruptor en la sala de control. El tiempo estimado para cerrar las válvulas de bloqueo es de 10 minutos automatizado (RIVM, 2009).
- Un sistema de bloqueo no automatizado es un sistema en el que la detección de la fuga se realiza automáticamente y conduce a una señal de alarma en una sala de control con personal permanente. El operador no dispone de los medios para desconectar las válvulas de bloqueo accionando un interruptor en la sala de control, sino que debe actuar fuera de la sala de control. En un sistema de este tipo, el tiempo estimado máximo es de 30 minutos (RIVM, 2009).

3.3.2.2.4 Determinación del volumen derramado

Como ya se tiene el tamaño del orificio y el tiempo del derrame, se pudo calcular el volumen derramado mediante la ecuación 3.

$$V = Q \times t \quad (3)$$

Donde:

- V: Volumen derramado (m³)
- Q: Caudal del derrame (m³/s)
- t: Tiempo del derrame (s)

3.3.2.2.5 Determinación del diámetro de alcance del derrame

Se hizo la consideración de que el derrame posee una capa fina de espesor (se asumió el valor de 1 mm de espesor), y con ello pudimos hallar el diámetro de alcance del derrame a través de la fórmula básica del círculo mediante lo señalado en la ecuación 4 y 5.

$$V = A \times e = \frac{\pi d_d^2}{4} \times 0.001 \quad (4)$$

$$d_d = \sqrt{\frac{4 \times V}{0.001 \times \pi}} \quad (5)$$

Donde:

- V: Volumen derramado (m³)
- d_d : Diámetro del derrame
- e: espesor del derrame.

3.3.3 Determinación del nivel de riesgo.

Para determinar el nivel de riesgo, se tuvo presente los criterios de probabilidad de ocurrencia del evento crítico y la consecuencia que generaría este evento, como se detalla en la Tabla 5 y Tabla 6 (NFPA, 2022).

Tabla 5.

Niveles de probabilidad.

Probabilidad	Descripción	Eventos por año
Frecuentes	Es probable que ocurran con frecuencia, han sido experimentadas.	De 10 ⁻¹ a 10 ⁻² eventos/año
Probable	Ocurrirá varias veces durante la vida del sistema	De 10 ⁻² a 10 ⁻³ eventos/año
Ocasional	Es poco probable que ocurra en el funcionamiento de un sistema determinado.	De 10 ⁻³ a 10 ⁻⁴ eventos/año
Remoto	Tan improbable, puede asumirse que este peligro no se experimentará.	De 10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁵ eventos/año
Improbable	Probabilidad de ocurrencia no distinguible de cero.	De 10 ⁻⁵ a 10 ⁻⁶ eventos/año

Nota: Elaboración propia a partir de (NFPA, 2022)

Tabla 6.

Categorías de consecuencia

Consecuencia	Impacto
Insignificante	<ul style="list-style-type: none">• El impacto de la pérdida será tan pequeño que no tendrá un efecto discernible en la instalación, sus operaciones o el medio ambiente.• Derrames menores a 10 metros de diámetro.

Consecuencia	Impacto
Marginal	<ul style="list-style-type: none"> • La pérdida tendrá un impacto en la instalación, que podría tener la suspensión breve de algunas operaciones. • Es posible que se necesiten algunas inversiones monetarias para restablecer el funcionamiento pleno del servicio. • Pueden producirse daños personales menores. • El incendio podría causar daños ambientales localizados. • Derrames mayores a 10 metros pero menores a 100 metros de diámetro.
Crítico	<ul style="list-style-type: none"> • La pérdida tendrá un alto impacto en la instalación, que puede tener que suspender sus operaciones. • Pueden ser necesarias importantes inversiones monetarias para restablecer las operaciones en su totalidad. • Pueden producirse lesiones personales y posibles muertes. • El incendio podría causar importantes daños ambientales reversibles. • Derrames mayores a 100 metros pero menores a 1000 metros de diámetro.
Catastrófico	<ul style="list-style-type: none"> • El fuego producirá muertes o múltiples muertes o lesiones, o el impacto en las operaciones será desastroso, resultando en un cierre a largo plazo o permanente. • La instalación dejaría de funcionar inmediatamente después de que ocurriera el incendio. • El incendio podría causar importantes daños ambientales irreversibles. • Derrames mayores a 1000 metros.

Nota: Elaboración propia a partir de (NFPA, 2022)

Sin embargo, debido a que la RCD N° 088-2022-OS/CD indica que los niveles de riesgos en la matriz de riesgos son riesgos “aceptables”, riesgos “no aceptables” y riesgos “tolerables”, se tuvo que adecuar la misma a la normativa nacional, tal como se muestra en la Figura 11 y en la Figura 12 (MINEM, 2021a; NFPA, 2022; OSINERGMIN, 2022).

Figura 11.

Matriz de riesgos

PROBABILIDAD	Frecuente	TOLERABLE	NO ACEPTABLE	NO ACEPTABLE	NO ACEPTABLE
	Probable	TOLERABLE	TOLERABLE	NO ACEPTABLE	NO ACEPTABLE
	Ocasional	ACEPTABLE	TOLERABLE	TOLERABLE	NO ACEPTABLE
	Remoto	ACEPTABLE	ACEPTABLE	TOLERABLE	NO ACEPTABLE
	Improbable	ACEPTABLE	ACEPTABLE	ACEPTABLE	TOLERABLE
		Despreciable	Marginal	Critico	Catastrófico
		CONSECUENCIA			

Nota: Elaboración propia a partir de (MINEM, 2021a; NFPA, 2022; OSINERGMIN, 2022).

Figura 12.

Clasificación del riesgo

CLASIFICACIÓN DEL RIESGO	ACCIONES
RIESGO NO ACEPTABLE	•Las medidas de mitigación deben ser implementadas, sin tener en cuenta el costo de dichas medidas hasta llegar a un nivel de Riesgo Tolerable, o en el mejor de los casos a Riesgo Aceptable.
RIESGO TOLERABLE	•Las medidas de mitigación a implementar deben ser estudiadas, y se debe realizar un análisis costo - beneficio de las mismas.
RIESGO ACEPTABLE	•No se deben añadir mayores medidas de mitigación; sin embargo, se deben mantener las medidas de mitigación implementadas.

Nota: Elaboración propia a partir de (MINEM, 2021a; NFPA, 2022; OSINERGMIN, 2022).

Finalmente, se estableció el umbral de riesgo haciendo coincidir el criterio de la probabilidad y el criterio de la consecuencia dentro de la matriz de riesgos.

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

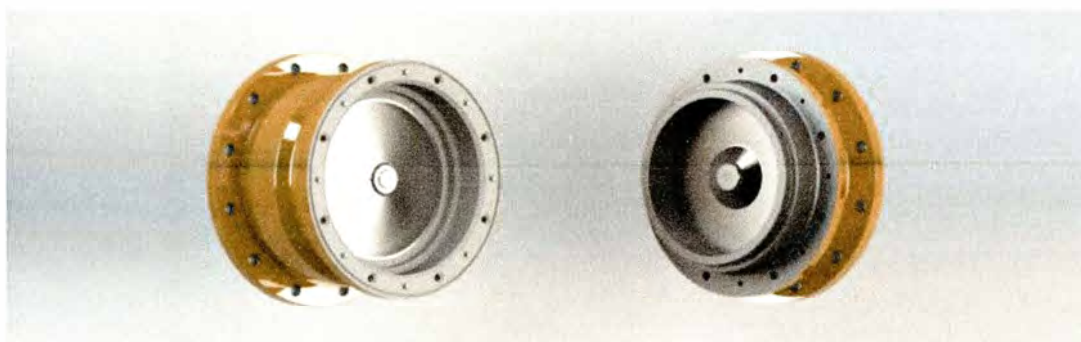
4.1 Desarrollo del análisis HAZOP

Como se indicó en las generalidades, el uso de ductos submarinos como sistema de transporte es común en las refinerías de petróleo requiere incluir mayores capas de seguridad o salvaguardas para asegurar una operación segura a lo largo del tiempo. Es por ello que se realizó el análisis HAZOP para el nuevo ducto submarino, considerando que el sistema estará transportando diésel, por ser el de mayor consumo en el país (MINEM, 2023).

Además, se consideró la implementación de la válvula submarina de desacople rápido (*Marine Breakaway Coupling*) en la manguera de carga/descarga, cuyo esquema se puede apreciar en la figura 13, la cual se separa de la manguera en caso de sobrecarga indebida durante la carga o descarga del buque, cerrándose ambos lados de la válvula de forma automática para así evitar el paso del fluido y aliviar inmediatamente la tensión aguda en el sistema de transferencia.

Figura 13.

Esquema del cierre del Marine Breakaway Coupling.



Nota: (Gall Thomson Environmental Ltd., 2024).

4.1.1 Lista de nodos

De acuerdo a lo señalado por la metodología HAZOP, lo primero que tuvimos que realizar fue separar el alcance del proyecto en nodos, los cuales nos permitió realizar el análisis cualitativo de una manera más ordenada. El listado de nodos que fue desarrollado se observa en la figura 14.

Figura 14.

Listado de nodos.

Nodo	Tipo	Condiciones de diseño / Parámetros	Planos	Comentarios
1. Mangueras flexibles de 16" con acople Camlock que llega hasta PLET - carga/descarga de producto diésel	Tren de mangueras	Diámetro nominal de las mangueras: 16" Longitud: 30 pies +/- 1% Característica de las mangueras: doble carcaza Sistema conector al manifold: Camlock 16" Número de mangueras por ducto: 8 Válvula de seguridad para mangueras: Marine coupling Breakaway "PIGABLE" full port Flange 16" x 150 psi Temperatura del fluido: -20°C a 82°C	P&ID ducto submarino	Este nodo abarca lo siguiente: La conexión de la manguera flexible desde el buque tanque hasta el PLET para la carga/descarga de producto diésel

Nodo	Tipo	Condiciones de diseño / Parámetros	Planos	Comentarios
		Temperatura ambiental: -29°C a 52°C ⁴ Profundidad de operación: 80 pies Velocidad de flujo max.: 70 pies/seg Presión de prueba: 225psig		
2. PLET hasta válvulas de bloqueo - carga/descarga de producto diésel	Ductos submarinos	Diámetro nominal de los ductos: 18" Material: API 5L PSL2 Gr. X42 sin costura, de acuerdo al Anexo J de la norma API 5L Revestimiento anticorrosión: 3 capas PE, espesor 2.2mm, especificación DIN 30670	P&ID ducto submarino	Este nodo abarca lo siguiente: El ducto submarino que va desde el PLET hasta las válvulas de bloqueo en tierra para la carga/descarga de producto diésel

Nota: Elaboración propia

⁴ Información brindada por el operador del nuevo ducto submarino en su "Manual de Diseño del Sistema de Transporte por Ductos Submarinos" dentro del "Servicio de Ingeniería para la Instalación de un Nuevo Amarradero en el Terminal Marítimo"

4.1.2 Lista de desviaciones.

Posterior a la separación del alcance del proyecto en nodos, la metodología HAZOP nos indicó que debemos listar las desviaciones al proceso que afectaron el proceso en cada uno de los nodos, a fin de analizar finalmente las causas y consecuencias que se produjeron por estas afectaciones. Este listado de desviaciones al proceso que afectaron el proceso en cada uno de los nodos se observa en las figuras 15 y 16.

Figura 15.

Listado de desviaciones del Nodo 1.

Desviación	Parámetro	Palabra guía
1. Más presión (Carga de productos a buque tanque)	Presión	Más
2. Más presión (Descarga de productos desde buque tanque)	Presión	Más
3. Menos presión (Carga de productos a buque tanque)	Presión	Menos
4. Menos presión (Descarga de productos desde buque tanque)	Presión	Menos
5. Más flujo (Carga de productos a buque tanque)	Flujo	Más
6. Más flujo (Descarga de productos desde buque tanque)	Flujo	Más
7. Bajo/No flujo (Carga de productos a buque tanque)	Flujo	Bajo/No
8. Bajo/No flujo (Descarga de productos desde buque tanque)	Flujo	Bajo/No

Nota: Elaboración propia

Figura 16.

Listado de desviaciones del Nodo 2.

Desviación	Parámetro	Palabra guía
1. Alta corrosión	Corrosión	Alta
2. Más temperatura	Temperatura	Más
3. Más presión (Carga de productos a buque tanque)	Presión	Más
4. Más presión (Descarga de productos desde buque tanque)	Presión	Más
5. Menos presión (Carga de productos a buque tanque)	Presión	Menos
6. Menos presión (Descarga de productos desde buque tanque)	Presión	Menos
7. Más flujo (Carga de productos a buque tanque)	Flujo	Más
8. Más flujo (Descarga de productos desde buque tanque)	Flujo	Más
9. Bajo/No flujo (Carga de productos a buque tanque)	Flujo	Bajo/No
10. Bajo/No flujo (Descarga de productos desde buque tanque)	Flujo	Bajo/No

Nota: Elaboración propia

4.1.3 Desarrollo del HAZOP.

Como último paso del desarrollo de la metodología HAZOP hicimos el análisis de cada una de las causas y consecuencias que se produjeron por las desviaciones al proceso. Este análisis fue desarrollado a través de un Software especializado, cuyos reportes se pueden observar desde la figura 17 a la figura 35.

4.1.3.1 Nodo 1. Mangueras flexibles de 16" con acople Camlock que llega hasta PLET - carga/descarga de producto diésel

Figura 17.

Desviación 1: Más presión (Carga de productos a buque tanque).

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
1. Cierre de válvulas de buque tanque por error operativo o electromecánico	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames	1. Instalar una Válvula submarina de desacople rápido (Marine Breakaway Coupling)	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por liberación de productos por rotura o desacople de las mangueras	Catastrófico	Ocasional	No Aceptable	2. Procedimiento de carga de productos a buque tanque 3. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación			Critico	Remoto	Tolerable

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
2. Error operativo o electromecánico en las bombas booster	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames	1. Instalar una Válvula submarina de desacople rápido (Marine Breakaway Coupling)	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por liberación de productos por rotura o desacople de las mangueras	Catastrófico	Ocasional	No Aceptable	2. Procedimiento de carga de productos a buque tanque 3. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación			Crítico	Remoto	Tolerable

Nota: Elaboración propia

Figura 18.

Desviación 2: Más presión (Descarga de productos desde buque tanque)

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
1. Desconexión por desplazamiento de mangueras, debido a malas maniobras en el fondeo y acoderamiento del buque	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Conexión rápida Camlock	1. Instalar una Válvula submarina de desacople rápido (Marine Breakaway Coupling)	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por liberación de productos por rotura o desacople de las mangueras	Catastrófico	Ocasional	No Aceptable	2. Procedimiento de descarga de productos desde buque tanque			Crítico	Remoto	Tolerable
					3. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames					
					4. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación					
2. Desconexión por desplazamiento de mangueras, debido a fenómenos naturales tales como marea alta, movimientos sísmicos, tsunamis, entre otros	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Conexión rápida Camlock	1. Instalar una Válvula submarina de desacople rápido (Marine Breakaway Coupling)	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por liberación de productos por rotura o desacople de las mangueras	Catastrófico	Ocasional	No Aceptable	2. Procedimiento de descarga de productos desde buque tanque			Crítico	Remoto	Tolerable
					3. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames					
					4. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación					
	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Procedimiento de descarga de productos desde buque tanque		Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
3. Error operativo o electromecánico de buque tanque	2. Contaminación del mar por liberación de productos por rotura o desacople de las mangueras	Catastrófico	Ocasional	No Aceptable	2. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames	1. Instalar una Válvula submarina de desacople rápido (Marine Breakaway Coupling)		Crítico	Remoto	Tolerable
				3. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación						
4. Cierre de válvulas de bloqueo o del manifold	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Procedimiento de descarga de productos desde buque tanque	1. Instalar una Válvula submarina de desacople rápido (Marine Breakaway Coupling)	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por liberación de productos por rotura o desacople de las mangueras	Catastrófico	Ocasional	No Aceptable	2. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames					Crítico
					3. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación					

Nota: Elaboración propia

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
	productos por rotura o desacople de las mangueras				3. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames 4. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación					
3. Error operativo o electromecánico en las bombas booster	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Procedimiento de carga de productos a buque tanque 2. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable

Nota: Elaboración propia

Figura 19.

Desviación 3: Menos presión (Carga de productos a buque tanque)

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
1. Desconexión por desplazamiento de mangueras, debido a malas maniobras en el fondeo y acoderamiento del buque	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Conexión rápida Camlock	1. Instalar una Válvula submarina de desacople rápido (Marine Breakaway Coupling)	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por liberación de productos por rotura o desacople de las mangueras	Catastrófico	Ocasional	No Aceptable	2. Procedimiento de carga de productos desde buque tanque			Crítico	Remoto	Tolerable
					3. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames					
					4. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación					
2. Desconexión por desplazamiento de mangueras, debido a fenómenos naturales tales como marea alta, movimientos sísmicos, tsunamis, entre otros	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Conexión rápida Camlock	1. Instalar una Válvula submarina de desacople rápido (Marine Breakaway Coupling)	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por liberación de	Catastrófico	Ocasional	No Aceptable	2. Procedimiento de carga de productos desde buque tanque			Crítico	Remoto	Tolerable

Figura 20.

Desviación 4: Menos presión (Descarga de productos desde buque tanque)

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
1. Desconexión por desplazamiento de mangueras, debido a malas maniobras en el fondeo y acoderamiento del buque	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Conexión rápida Camlock	1. Instalar una Válvula submarina de desacople rápido (Marine Breakaway Coupling)	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por liberación de productos por rotura o desacople de las mangueras	Catastrófico	Ocasional	No Aceptable	2. Procedimiento de descarga de productos desde buque tanque			Crítico	Remoto	Tolerable
					3. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames					
4. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación										
2. Desconexión por desplazamiento de mangueras, debido a fenómenos naturales tales como marea alta, movimientos sísmicos, tsunamis, entre otros	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Conexión rápida Camlock	1. Instalar una Válvula submarina de desacople rápido (Marine Breakaway Coupling)	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por liberación de	Catastrófico	Ocasional	No Aceptable	2. Procedimiento de descarga de productos desde buque tanque			Crítico	Remoto	Tolerable

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
	productos por rotura o desacople de las mangueras				3. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames 4. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación					
3. Error operativo o electromecánico de buque tanque	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Procedimiento de descarga de productos desde buque tanque 2. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable

Nota: Elaboración propia

Figura 21.

Desviación 5: Más flujo (Carga de productos a buque tanque)

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
1. Error operativo o electromecánico en las bombas booster	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames	1. Instalar una Válvula submarina de desacople rápido (Marine Breakaway Coupling)	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por liberación de productos por rotura o desacople de las mangueras	Catastrófico	Ocasional	No Aceptable	2. Procedimiento de carga de productos a buque tanque 3. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación			Critico	Remoto	Tolerable

Nota: Elaboración propia

Figura 22.

Desviación 6: Más flujo (Descarga de productos desde buque tanque)

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
1. Error operativo o electromecánico de buque tanque	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames	1. Instalar una Válvula submarina de desacople rápido (Marine Breakaway Coupling)	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por liberación de productos por rotura o desacople de las mangueras	Catastrófico	Ocasional	No Aceptable	2. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación			Critico	Remoto	Tolerable

Nota: Elaboración propia

Figura 23.

Desviación 7: Bajo/No flujo (Carga de productos a buque tanque)

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
1. Desconexión por desplazamiento de mangueras, debido a malas maniobras en el fondeo y acoderamiento del buque	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Conexión rápida Camlock	1. Instalar una Válvula submarina de desacople rápido (Marine Breakaway Coupling)	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por liberación de productos por rotura o desacople de las mangueras	Catastrófico	Ocasional	No Aceptable	2. Procedimiento de carga de productos desde buque tanque			Crítico	Remoto	Tolerable
					3. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames					
					4. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación					
2. Desconexión por desplazamiento de mangueras, debido a fenómenos naturales tales como marea alta, movimientos sísmicos, tsunamis, entre otros	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Conexión rápida Camlock	1. Instalar una Válvula submarina de desacople rápido (Marine Breakaway Coupling)	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por liberación de productos por rotura o desacople de las mangueras	Catastrófico	Ocasional	No Aceptable	2. Procedimiento de carga de productos desde buque tanque			Crítico	Remoto	Tolerable
					3. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames					
					4. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación					

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
3. Error operativo o electromecánico en las bombas booster	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Procedimiento de carga de productos desde buque tanque	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
					2. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación					
4. Cierre de válvulas de bloqueo o del manifold	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Procedimiento de carga de productos desde buque tanque	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
					2. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación					

Nota: Elaboración propia

Figura 24.

Desviación 8: Bajo/No flujo (Descarga de productos desde buque tanque)

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
1. Desconexión por desplazamiento de mangueras, debido a malas maniobras en el fondeo y acoderamiento del buque	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Conexión rápida Camlock	1. Instalar una Válvula submarina de desacople rápido (Marine Breakaway Coupling)	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por liberación de productos por rotura o desacople de las mangueras	Catastrófico	Ocasional	No Aceptable	2. Procedimiento de descarga de productos desde buque tanque			Crítico	Remoto	Tolerable
					3. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames					
					4. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación					
2. Desconexión por desplazamiento de mangueras, debido a fenómenos naturales tales como marea alta, movimientos sísmicos, tsunamis, entre otros	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Conexión rápida Camlock	1. Instalar una Válvula submarina de desacople rápido (Marine Breakaway Coupling)	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por liberación de	Catastrófico	Ocasional	No Aceptable	2. Procedimiento de descarga de productos desde buque tanque			Crítico	Remoto	Tolerable

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
	productos por rotura o desacople de las mangueras				3. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames 4. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación					
3. Cierre de válvulas de buque tanque por error operativo o electromecánico	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Procedimiento de descarga de productos desde buque tanque 2. Sistemas de instrumentación en línea para detectar cambios en los parámetros de operación	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable

Nota: Elaboración propia

4.1.3.2 Nodo 2. PLET hasta válvulas de bloqueo - carga/descarga de producto diésel

Figura 25.

Desviación 1: Alta corrosión

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
1. Alta corrosión debido al entorno	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Los ductos submarinos cuentan con un sistema de protección catódica por corriente impresa, cama anódica y rectificador, en concordancia con lo señalado en el ítem 10.3 de la norma API RP 1111.	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por daño a la estructura de los ductos de 18" o de sus accesorios	Critico	Ocasional	Tolerable	2. Pruebas hidrostáticas dos veces por año a una presión de 1.5 veces mayor que la presión de trabajo máxima permitida, según lo señalado en el Artículo 43 del D.S. 026-94-EM, por un tiempo no menor a las 8 horas según lo señalado en ítem 8.2.4.3 de la norma API RP 1111. En adición, se realizan pruebas de hermeticidad en cada operación de carga o descarga de productos por un periodo de 15 minutos. 3. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames 4. Recubrimiento tricapa 3 LPE polietileno de alta densidad			Marginal	Remoto	Aceptable

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
					5. Junta monolítica aislante para que el sistema de protección catódica se encuentre aislado eléctricamente					
					6. Sistema acústico de detección de fugas y sistema redundante mediante control de las diferencias de nivel de los tanques buque/tierra					
					7. Sistema de comunicaciones principal por fibra óptica y redundante mediante radioenlace WiFi					
					8. Inspecciones de los ductos mediante PIGs inteligentes de forma anual, según lo indicado en el Plan de Inspección, cumpliendo así lo dispuesto con lo indicado en el Artículo 57 del D.S. N° 081-2007-EM.					
					9. Sistema contra incendio					
					10. Tubería de especificación API 5L PSL2 Gr. X42 sin costura, cuya especificación cumple con lo señalado por la norma API RP 1111 y en la ASME B31.4.					
					11. Manual de Operación y Mantenimiento, que contiene y es actualizado cada dos (2) años o cuando se hagan cambios importantes en los ductos (Art. 62 del Anexo 1 del D.S N° 081-2007-EM)					

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo			
		S	P	RR				S	P	RR	
					<p>a) Procedimientos e instrucciones detalladas para la operación y mantenimiento del Ducto y sus instalaciones durante una operación normal (el desarrollo de este procedimiento está basado en lo señalado en la norma API RP 1111).</p> <p>b) Procedimientos de operación en condiciones de emergencia operativa (el desarrollo de este procedimiento está basado en lo señalado en la norma API RP 1111).</p> <p>c) Procedimientos para los trabajos de mantenimiento predictivo, correctivo y preventivo (el desarrollo de este procedimiento está basado en lo señalado en la norma API RP 1111).</p> <p>d) Programas de patrullaje del Derecho de Vía, que consiste en realizar inspecciones técnicas para observar y tomar acciones correctivas sobre factores existentes o potenciales que estuvieran afectando la seguridad e integridad del Ducto (el desarrollo de este procedimiento está basado en lo señalado en la norma API RP 1160).</p>						

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo			
		S	P	RR				S	P	RR	
					<p>e) Programa de inspecciones de detección de fugas en el Ductos (el desarrollo de este programa está basado en lo señalado en la norma API RP 1160).</p> <p>f) Procedimientos de reparación de las tuberías del Ducto, considerando el tipo de problema y su ubicación (el desarrollo de este procedimiento está basado en lo señalado en la norma API RP 1111).</p> <p>g) Programa de control de corrosión externa e interna (el desarrollo de este programa está basado en lo señalado en la norma API RP 1111).</p> <p>h) Programa de mantenimiento de válvulas de bloqueo, control y de alivio (el desarrollo de este programa está basado en lo señalado en la norma API RP 1111).</p>						
2. Corrosión bajo esfuerzo (SCC)	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Los ductos submarinos cuentan con un sistema de protección catódica por corriente impresa, cama anódica y rectificador, en concordancia con lo señalado en el ítem 10.3 de la norma API RP 1111.	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable	
	2. Contaminación del mar por daño a la	Critico	Ocasional	Tolerable	2. Pruebas hidrostáticas dos veces por año a una presión de 1.5 veces mayor que la presión de trabajo máxima permitida, según lo señalado en el Artículo 43			Marginal	Remoto	Aceptable	

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
	estructura de los ductos de 18" o de sus accesorios				<p>del D.S. 026-94-EM, por un tiempo no menor a las 8 horas según lo señalado en ítem 8.2.4.3 de la norma API RP 1111. En adición, se realizan pruebas de hermeticidad en cada operación de carga o descarga de productos por un periodo de 15 minutos.</p> <p>3. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames</p> <p>4. Recubrimiento tricapa 3 LPE polietileno de alta densidad</p> <p>5. Junta monolítica aislante para que el sistema de protección catódica se encuentre aislado electricamente</p> <p>6. Sistema acústico de detección de fugas y sistema redundante mediante control de las diferencias de nivel de los tanques buque/tierra</p> <p>7. Sistema de comunicaciones principal por fibra óptica y redundante mediante radioenlace WiFi</p> <p>8. Inspecciones de los ductos mediante PIGs inteligentes de forma anual, según lo indicado en el Plan de Inspección, cumpliendo así lo dispuesto con lo indicado en el Artículo 57 del D.S. N° 081-2007-EM.</p>					

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo			
		S	P	RR				S	P	RR	
					<p>9. Sistema contra incendio</p> <p>10. Tubería de especificación API 5L PSL2 Gr. X42 sin costura, cuya especificación cumple con lo señalado por la norma API RP 1111 y en la ASME B31.4.</p> <p>11. Manual de Operación y Mantenimiento, que contiene y es actualizado cada dos (2) años o cuando se hagan cambios importantes en los ductos (Art. 62 del Anexo 1 del D.S N° 081-2007-EM)</p> <p>a) Procedimientos e instrucciones detalladas para la operación y mantenimiento del Ducto y sus instalaciones durante una operación normal (el desarrollo de este procedimiento está basado en lo señalado en la norma API RP 1111).</p> <p>b) Procedimientos de operación en condiciones de emergencia operativa (el desarrollo de este procedimiento está basado en lo señalado en la norma API RP 1111).</p> <p>c) Procedimientos para los trabajos de mantenimiento predictivo, correctivo y preventivo (el desarrollo de este procedimiento está basado en lo señalado en la norma API RP 1111).</p>						

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo			
		S	P	RR				S	P	RR	
					<p>d) Programas de patrullaje del Derecho de Vía, que consiste en realizar inspecciones técnicas para observar y tomar acciones correctivas sobre factores existentes o potenciales que estuvieran afectando la seguridad e integridad del Ducto (el desarrollo de este procedimiento está basado en lo señalado en la norma API RP 1160).</p> <p>e) Programa de inspecciones de detección de fugas en el Ductos (el desarrollo de este programa está basado en lo señalado en la norma API RP 1160).</p> <p>f) Procedimientos de reparación de las tuberías del Ducto, considerando el tipo de problema y su ubicación (el desarrollo de este procedimiento está basado en lo señalado en la norma API RP 1111).</p> <p>g) Programa de control de corrosión externa e interna (el desarrollo de este programa está basado en lo señalado en la norma API RP 1111).</p> <p>h) Programa de mantenimiento de válvulas de bloqueo, control y de alivio (el desarrollo de este programa está basado en lo señalado en la norma API RP 1111).</p>						

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
3. Corrosión por anomalías por fatiga inducida por el ciclo de presión	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Los ductos submarinos cuentan con un sistema de protección catódica por corriente impresa, cama anódica y rectificador, en concordancia con lo señalado en el ítem 10.3 de la norma API RP 1111.	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por daño a la estructura de los ductos de 18" o de sus accesorios	Crítico	Ocasional	Tolerable	2. Pruebas hidrostáticas dos veces por año a una presión de 1.5 veces mayor que la presión de trabajo máxima permitida, según lo señalado en el Artículo 43 del D.S. 026-94-EM, por un tiempo no menor a las 8 horas según lo señalado en ítem 8.2.4.3 de la norma API RP 1111. En adición, se realizan pruebas de hermeticidad en cada operación de carga o descarga de productos por un periodo de 15 minutos. 3. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames 4. Recubrimiento tricapa 3 LPE polietileno de alta densidad 5. Junta monolítica aislante para que el sistema de protección catódica se encuentre aislado electricamente			Marginal	Remoto	Aceptable

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
					6. Sistema acústico de detección de fugas y sistema redundante mediante control de las diferencias de nivel de los tanques buque/terra					
					7. Sistema de comunicaciones principal por fibra óptica y redundante mediante radioenlace WiFi					
					8. Inspecciones de los ductos mediante PIGs inteligentes de forma anual, según lo indicado en el Plan de Inspección, cumpliendo así lo dispuesto con lo indicado en el Artículo 57 del D.S. N° 081-2007-EM.					
					9. Sistema contra incendio					
					10. Tubería de especificación API 5L PSL2 Gr. X42 sin costura, cuya especificación cumple con lo señalado por la norma API RP 1111 y en la ASME B31.4.					
					11. Manual de Operación y Mantenimiento, que contiene y es actualizado cada dos (2) años o cuando se hagan cambios importantes en los ductos (Art. 62 del Anexo 1 del D.S N° 081-2007-EM)					
					a) Procedimientos e instrucciones detalladas para la operación y mantenimiento del Ducto y sus instalaciones durante una operación normal (el					

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo			
		S	P	RR				S	P	RR	
					<p>desarrollo de este procedimiento está basado en lo señalado en la norma API RP 1111).</p> <p>b) Procedimientos de operación en condiciones de emergencia operativa (el desarrollo de este procedimiento está basado en lo señalado en la norma API RP 1111).</p> <p>c) Procedimientos para los trabajos de mantenimiento predictivo, correctivo y preventivo (el desarrollo de este procedimiento está basado en lo señalado en la norma API RP 1111).</p> <p>d) Programas de patrullaje del Derecho de Vía, que consiste en realizar inspecciones técnicas para observar y tomar acciones correctivas sobre factores existentes o potenciales que estuvieran afectando la seguridad e integridad del Ducto (el desarrollo de este procedimiento está basado en lo señalado en la norma API RP 1160).</p> <p>e) Programa de inspecciones de detección de fugas en el Ductos (el desarrollo de este programa está basado en lo señalado en la norma API RP 1160).</p> <p>f) Procedimientos de reparación de las tuberías del Ducto, considerando el tipo de problema y su</p>						

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
					ubicación (el desarrollo de este procedimiento está basado en lo señalado en la norma API RP 1111). g) Programa de control de corrosión externa e interna (el desarrollo de este programa está basado en lo señalado en la norma API RP 1111). h) Programa de mantenimiento de válvulas de bloqueo, control y de alivio (el desarrollo de este programa está basado en lo señalado en la norma API RP 1111).					

Nota: Elaboración propia

Figura 26.

Desviación 2: Más temperatura

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
1. Fluido a mayor temperatura en la carga a buque tanque	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Sistema de comunicaciones principal por fibra óptica y redundante mediante radioenlace WiFi	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Daño a la estructura de los ductos de 18" o de sus accesorios	Critico	Ocasional	Tolerable	2. Cada línea cuenta con un transmisor indicador de temperatura			Marginal	Remoto	Aceptable

Nota: Elaboración propia

Figura 27.

Desviación 3: Más presión (Carga de productos a buque tanque)

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
1. Error operativo o electromecánico en las bombas booster	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Sistema acústico de detección de fugas y sistema redundante mediante control de las diferencias de nivel de los tanques buque/tierra	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por daño a la estructura de los ductos de 18" o de sus accesorios	Crítico	Ocasional	Tolerable	2. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames			Marginal	Remoto	Aceptable
					3. Sistema de comunicaciones principal por fibra óptica y redundante mediante radioenlace WiFi			Marginal	Remoto	Aceptable
				4. Procedimiento de carga de productos a buque tanque						

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguadas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
2. Cierre de válvulas de buque tanque por error operativo o electromecánico	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Sistema acústico de detección de fugas y sistema redundante mediante control de las diferencias de nivel de los tanques buque/tierra	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por daño a la estructura de los ductos de 18" o de sus accesorios	Crítico	Ocasional	Tolerable	2. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames 3. Sistema de comunicaciones principal por fibra óptica y redundante mediante radioenlace WiFi			Marginal	Remoto	Aceptable

Nota: Elaboración propia

Figura 28.

Desviación 4: Más presión (Descarga de productos desde buque tanque)

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
1. Error operativo o electromecánico de buque tanque	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Sistema acústico de detección de fugas y sistema redundante mediante control de las diferencias de nivel de los tanques buque/terra	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por daño a la estructura de los ductos de 18" o de sus accesorios	Critico	Ocasional	Tolerable	2. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames 3. Sistema de comunicaciones principal por fibra óptica y redundante mediante radioenlace WiFi			Marginal	Remoto	Aceptable
2. Cierre de válvulas de bloqueo o del manifold	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Sistema acústico de detección de fugas y sistema redundante mediante control de las	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
					diferencias de nivel de los tanques buque/tierra					
	2. Contaminación del mar por daño a la estructura de los ductos de 18" o de sus accesorios	Crítico	Ocasional	Tolerable	2. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames			Marginal	Remoto	Aceptable
					3. Sistema de comunicaciones principal por fibra óptica y redundante mediante radioenlace WiFi					
					4. Procedimiento de descarga de productos a buque tanque					

Nota: Elaboración propia

Figura 29.

Desviación 5: Menos presión (Carga de productos a buque tanque)

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
1. Error operativo o electromecánico en las bombas booster	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Cada línea cuenta con un transmisor indicador de presión	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
					2. Procedimiento de carga de productos a buque tanque					
2. Rotura de líneas submarinas debido a anclaje de embarcaciones, caída de objetos contundentes o movimientos sísmicos	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Los ductos submarinos se encuentran enterrados en el lecho marino	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por daño a la estructura de los ductos de 18" o de sus accesorios	Critico	Ocasional	Tolerable	2. Sistema acústico de detección de fugas y sistema redundante mediante control de las diferencias de nivel de los tanques buque/tierra					

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
					3. Cada línea cuenta con un transmisor indicador de presión					
					4. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames					

Nota: Elaboración propia

Figura 30.

Desviación 6: Menos presión (Descarga de productos desde buque tanque)

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
1. Error operativo o electromecánico de buque tanque	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Cada línea cuenta con un transmisor indicador de presión	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
2. Rotura de líneas submarinas debido a anclaje de embarcaciones, caída de objetos contundentes o movimientos sísmicos	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Los ductos submarinos se encuentran enterrados en el lecho marino	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por daño a la estructura de los ductos de 18" o de sus accesorios	Crítico	Ocasional	Tolerable	2. Sistema acústico de detección de fugas y sistema redundante mediante control de las diferencias de nivel de los tanques buque/terresta			Marginal	Remoto	Aceptable
					3. Cada línea cuenta con un transmisor indicador de presión					

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
					4. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames					

Nota: Elaboración propia

Figura 31.

Desviación 7: Más flujo (Carga de productos a buque tanque)

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
1. Error operativo o electromecánico en las bombas booster	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Sistema acústico de detección de fugas y sistema redundante mediante control de las diferencias de nivel de los tanques buque/terresta	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por daño a la estructura de los ductos de 18" o de sus accesorios	Crítico	Ocasional	Tolerable	2. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames 3. Sistema de comunicaciones principal por fibra óptica y redundante mediante radioenlace WiFi 4. Procedimiento de carga de productos a buque tanque			Marginal	Remoto	Aceptable

Nota: Elaboración propia

Figura 32.

Desviación 8: Más flujo (Descarga de productos desde buque tanque)

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguadas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
1. Error operativo o electromecánico de buque tanque	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Sistema acústico de detección de fugas y sistema redundante mediante control de las diferencias de nivel de los tanques buque/terresta	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por daño a la estructura de los ductos de 18" o de sus accesorios	Crítico	Ocasional	Tolerable	2. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames 3. Sistema de comunicaciones principal por fibra óptica y redundante mediante radioenlace WiFi			Marginal	Remoto	Aceptable

Nota: Elaboración propia

Figura 33.

Desviación 9: Bajo/No flujo (Carga de productos a buque tanque)

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
1. Error operativo o electromecánico en las bombas booster	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Cada línea cuenta con un transmisor indicador de flujo	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
					2. Procedimiento de carga de productos a buque tanque					
2. Cierre de válvulas de bloqueo o del manifold	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Sistema acústico de detección de fugas y sistema redundante mediante control de las diferencias de nivel de los tanques buque/terra	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
					2. Contaminación del mar por daño a la estructura de los ductos de 18" o de sus accesorios					
						2. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames				
					3. Sistema de comunicaciones principal por fibra óptica y					

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
					<p>redundante mediante radioenlace WiFi</p> <p>4. Procedimiento de carga de productos a buque tanque</p>					
3. Rotura de líneas submarinas debido a anclaje de embarcaciones, caída de objetos contundentes o movimientos sísmicos	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Los ductos submarinos se encuentran enterrados en el lecho marino	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Acceptable
	2. Contaminación del mar por daño a la estructura de los ductos de 18" o de sus accesorios	Crítico	Ocasional	Tolerable	2. Sistema acústico de detección de fugas y sistema redundante mediante control de las diferencias de nivel de los tanques buque/terra			Marginal	Remoto	Acceptable
					3. Cada línea cuenta con un transmisor indicador de flujo					
					4. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames					

Nota: Elaboración propia

Figura 34.

Desviación 10: Bajo/No flujo (Descarga de productos desde buque tanque)

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
1. Error operativo o electromecánico de buque tanque	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Cada línea cuenta con un transmisor indicador de flujo	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
2. Rotura de líneas submarinas debido a andaje de embarcaciones, caída de objetos contundentes o movimientos sísmicos	1. Retrasos operativos	Marginal	Ocasional	Tolerable	1. Los ductos submarinos se encuentran enterrados en el lecho marino	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable
	2. Contaminación del mar por daño a la estructura de los ductos de 18" o de sus accesorios	Crítico	Ocasional	Tolerable	2. Sistema acústico de detección de fugas y sistema redundante mediante control de las diferencias de nivel de los tanques buque/tierra 3. Cada línea cuenta con un transmisor indicador de flujo	2. Mantener las demás mitigaciones implementadas, verificando su funcionamiento periódicamente.	Refinería	Marginal	Remoto	Aceptable

Causa	Consecuencia	Antes de la reducción del riesgo			Salvaguardas	Recomendaciones	Responsable	Después de la reducción del riesgo		
		S	P	RR				S	P	RR
					4. Sistema de tendido de barrera para contención de derrames					

Nota: Elaboración propia

4.2 Desarrollo del Análisis cuantitativo de riesgos

4.2.1 Determinación de la frecuencia de cada uno de los eventos críticos identificados.

4.2.1.1 Desarrollo del Árbol de Falla (FTA)

Para la determinación de la probabilidad inicial de ocurrencia del derrame, se consideró el tiempo estimado en horas de uso de la manguera de carga/descarga, tal como lo solicita la Figura 8. Para ello se obtuvo la producción anual de la Refinería y se consideró que el ducto submarino estaría despachando el diésel B5 S-50 en un régimen de 6000 de barriles en 18 horas (8000 barriles/día). Es decir, que la frecuencia de uso de la manguera de carga/descarga por hora sería de 0.75 horas.

Como la Figura 8 señala que en la manguera de carga/descarga se puede producir un derrame a través de un agujero con diámetro equivalente al 10% de diámetro nominal de la manguera de carga/descarga, es decir para 0.04 metros, y un derrame a través de la rotura total de la manguera de carga/descarga (0.41 metros), tendremos las siguientes frecuencias:

$$f_a = 4 \times 10^{-5} \times 0.75 = 3 \times 10^{-5}$$

$$f_r = 4 \times 10^{-6} \times 0.75 = 3 \times 10^{-6}$$

Siendo:

f_a : Frecuencia de una fuga a través de un agujero en la manguera

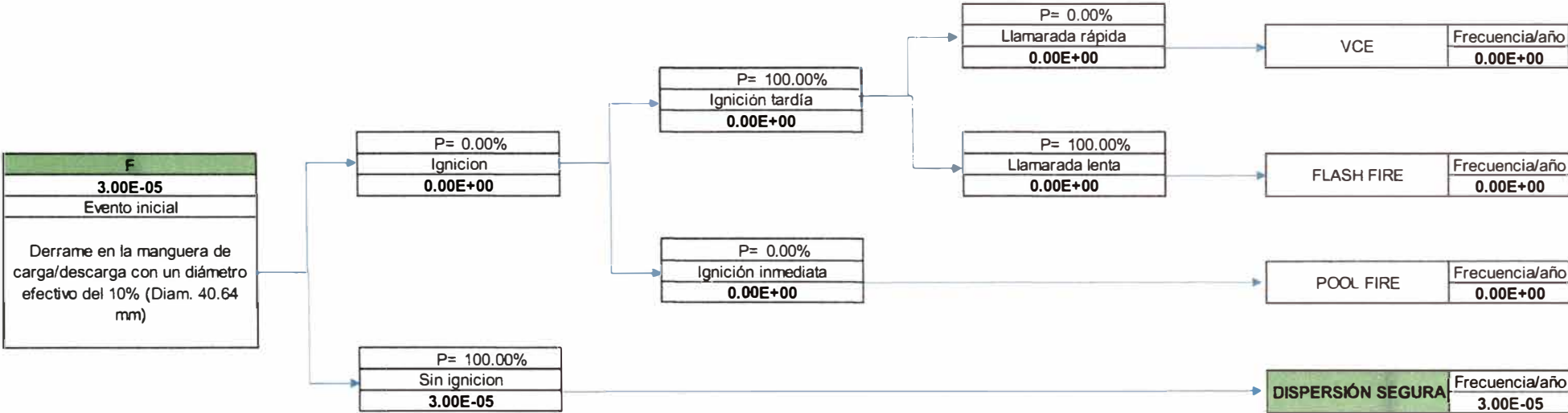
f_r : Frecuencia de la ruptura de la manguera

4.2.1.2 Desarrollo del Árbol de Eventos (ETA)

Como se obtuvo el valor de la probabilidad inicial de falla para la manguera de carga/descarga, se utilizaron las figuras 9 y 10 para determinar los valores de los eventos no deseados, tal como se muestra en la figura 36 y 37.

Figura 35.

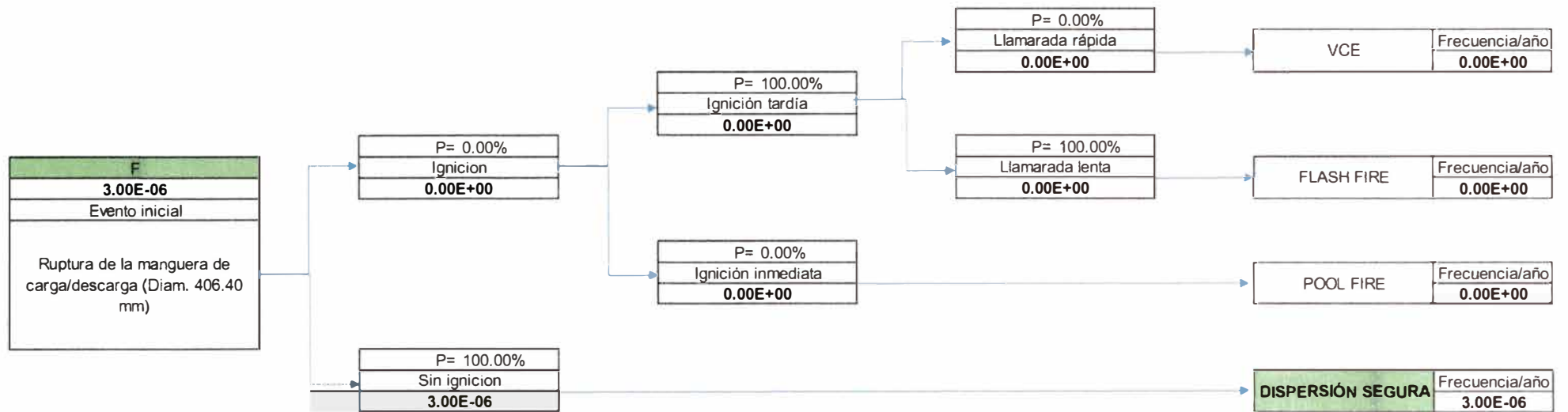
Proceso análisis de árbol de eventos para el caso de liberaciones



Nota: Elaboración propia a partir de (API, 2016)

Figura 36

Proceso análisis de árbol de eventos para el caso de ruptura



Nota: Elaboración propia a partir de (API, 2016)

Por lo tanto, de la figura 36 y 37 se dedujo que las probabilidades de ocurrencia del derrame a través de un agujero con diámetro equivalente al 10% de diámetro nominal de la manguera de carga/descarga y un derrame a través de la rotura total de la manguera de carga/descarga es:

$$f_{d,a} = 3 \times 10^{-5} \times 1.00 = 3 \times 10^{-5}$$

$$f_{d,r} = 3 \times 10^{-6} \times 1.00 = 3 \times 10^{-6}$$

Siendo:

$f_{d,a}$: Frecuencia del derrame a través de un agujero en la manguera

$f_{d,r}$: Frecuencia del derrame a través de la ruptura de la manguera

4.2.2 Determinación de las consecuencias de los eventos críticos identificados.

4.2.2.1 Determinación de los tamaños de orificio del derrame en la manguera flexible de carga/descarga.

Como la manguera de carga/descarga es de 16 pulgadas (0.41 metros), se realizó el análisis para los dos tamaños de orificio siguientes:

- Un derrame a través de un agujero con diámetro equivalente al 10% de diámetro nominal de la manguera de carga/descarga, es decir para 0.04 metros.
- Un derrame a través de la rotura total de la manguera de carga/descarga (0.41 metros).

4.2.2.2 Determinación del caudal de derrame a través del orificio de derrame en la manguera de carga/descarga

4.2.2.3 Determinación de la selección del tiempo de la duración del derrame.

4.2.2.3.1 Determinación de la selección del tiempo de la duración del derrame antes de las medidas de mitigación

Como se ha mencionado previamente, el ducto no posee ningún sistema de bloqueo automatizado; por lo tanto, se consideró al inicio un tiempo estimado máximo es de 30 minutos de derrame.

4.2.2.3.2 Determinación de la selección del tiempo de la duración del derrame después de las medidas de mitigación

Posterior a ello, el análisis se realizó considerando que el ducto se instaló un sistema de bloqueo automático, por lo que el tiempo disminuye a 2 minutos.

4.2.2.4 Determinación del volumen derramado

4.2.2.4.1 Determinación del volumen derramado antes de las medidas de mitigación

Para determinar el volumen derramado antes de las medidas de mitigación se utilizó la ecuación de Bernoulli, pero para ello primero debimos hallar la velocidad con la que viaja el fluido a través de la manguera, lo cual fue hallado utilizando la ecuación 1 descrita en el ítem 3.3.2.2.2. Como se tiene que el caudal de bombeo es de 8000 de barriles por día ($0.01 \text{ m}^3/\text{s}$), y el diámetro de la manguera es 16 pulgadas (0.41 metros) con un área transversal de 0.13 m^2 , se obtuvo que la v_1 es 0.11 m/s .

$$Q = v_1 \times A$$

$$0.01 = v_1 \times 0.13$$

$$v_1 = 0.11 \text{ m/s}$$

Luego, se procedió a determinar el valor de la velocidad de descarga del derrame, lo cual fue hallado utilizando la ecuación 2 descrita en el ítem 3.3.2.2.2.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_f$$

Siendo:

- $P_1 = 100$ psig (689,475.91 Pa)
- $P_2 = 1$ atm (101,325 Pa)
- $v_1 = 0.11$ m/s
- $z_1 = 5$ metros
- $z_2 = 0$ metros
- $\rho = 850$ Kg/m³
- $g: 9.81$ m/s²
- $h_f: 1.1$ m.

Reemplazando los valores, obtuvimos:

$$\frac{689,475.91}{850 \times 9.81} + \frac{(0.11)^2}{2 \times 9.81} + 5 = \frac{101,325}{850 \times 9.81} + \frac{v_2^2}{2 \times 9.81} + 0 + 1.1$$

$$v_2 = 38.22 \text{ m/s}$$

Como tenemos que analizar el caso del derrame en un agujero (0.04 metros) y el caso del derrame por la ruptura de la manguera (0.41 metros), hallamos dos valores de volumen derramado antes de las medidas de mitigación para los 30 minutos (1800 segundos) que se tiene como tiempo de respuesta al poseer un sistema de bloqueo no automatizado, lo cual fue hallado utilizando la ecuación 3 descrita en el ítem 3.3.2.2.4.

a) Caso 1: derrame en un agujero de 0.04 metros

En este primer caso, para determinar el volumen del derrame (V) debemos considerar que este volumen es el resultado de multiplicar el caudal (Q) que pasa por el agujero generado en la tubería y el tiempo (t) que demora el sistema en controlar la operación. Además, el caudal lo podemos determinar mediante la multiplicación de la velocidad del fluido (v) en ese punto y el área (A) del agujero generado en la tubería.

Como sabemos que el derrame se generó a través de un agujero de 0.04 metros, tenemos que su área (A) resulta ser de 0.0013 m^2 , con una velocidad del fluido (v) de 38.22 m/s , (resultado determinado en el ítem 4.2.2.4.1) y se consideró un tiempo (t) de 30 minutos (1800 segundos) ya que se tiene un sistema de bloqueo no automatizado (RIVM, 2009).

Finalmente, reemplazando los valores en la ecuación 6, tenemos como resultado que el volumen del derrame para este caso es de 89.25 m^3 .

$$V = Q \times t = v \times A \times t \quad (6)$$

$$V = 38.22 \times 0.0013 \times 1800 = 89.25 \text{ m}^3$$

b) Caso 2: derrame por la ruptura de la manguera de 0.41 metros de diámetro

En este segundo caso, para determinar el volumen del derrame (V) debemos considerar que este volumen es el resultado de multiplicar el caudal (Q) que pasa por la rotura de la tubería y el tiempo (t) que demora el sistema en controlar la operación. Además, el caudal lo podemos determinar mediante la multiplicación de la velocidad del fluido (v) en ese punto y el área (A) de la rotura en la tubería.

Como sabemos que el derrame se generó a través de la ruptura de la tubería de 0.41 metros de diámetro, tenemos que su área (A) resulta ser de 0.13 m^2 , con una velocidad del fluido (v) de 38.22 m/s , (resultado determinado en el ítem 4.2.2.4.1) y se consideró un tiempo (t) de 30 minutos (1800 segundos) ya que se tiene un sistema de bloqueo no automatizado (RIVM, 2009).

Finalmente, reemplazando los valores en la ecuación 7, tenemos como resultado que el volumen del derrame para este caso es de 8924.65 m^3 .

$$V = Q \times t = v \times A \times t \quad (7)$$

$$V = 38.22 \times 0.13 \times 1800 = 8924.65 \text{ m}^3$$

4.2.2.4.2 Determinación del volumen derramado después de las medidas de mitigación

Debido a que la velocidad de descarga del derrame es la misma, al no haber cambiado las condiciones del proceso, se realizó el análisis de manera similar para el caso del derrame en un agujero (0.04 metros) y el caso del derrame por la ruptura de la manguera (0.41 metros). Lo único que varío entre el volumen derramado del derrame antes y después de las medidas de mitigación, es el tiempo de respuesta, puesto que al poseer un sistema de bloqueo automatizado disminuye este tiempo a 2 minutos (120 segundos), lo cual fue hallado utilizando la ecuación 3 descrita en el ítem 3.3.2.2.4.

a) Caso 1: derrame en un agujero de 0.04 metros

En este primer caso, para determinar el volumen del derrame (V) debemos considerar que este volumen es el resultado de multiplicar el caudal (Q) que pasa por el agujero generado en la tubería y el tiempo (t) que demora el sistema en controlar la operación.

Además, el caudal lo podemos determinar mediante la multiplicación de la velocidad del fluido (v) en ese punto y el área (A) del agujero generado en la tubería.

Como sabemos que el derrame se generó a través de un agujero de 0.04 metros, tenemos que su área (A) resulta ser de 0.0013 m^2 , con una velocidad del fluido (v) de 38.22 m/s , (resultado determinado en el ítem 4.2.2.4.1) y se consideró un tiempo (t) de 2 minutos (120 segundos) ya que se tiene un sistema de bloqueo automatizado (RIVM, 2009).

Finalmente, reemplazando los valores en la ecuación 8, tenemos como resultado que el volumen del derrame para este caso es de 5.95 m^3 .

$$V = Q \times t = v \times A \times t \quad (8)$$

$$V = 38.22 \times 0.0013 \times 120 = 5.95 \text{ m}^3$$

b) Caso 2: derrame por la ruptura de la manguera de 0.41 metros de diámetro

En este segundo caso, para determinar el volumen del derrame (V) debemos considerar que este volumen es el resultado de multiplicar el caudal (Q) que pasa por la rotura de la tubería y el tiempo (t) que demora el sistema en controlar la operación. Además, el caudal lo podemos determinar mediante la multiplicación de la velocidad del fluido (v) en ese punto y el área (A) de la rotura en la tubería.

Como sabemos que el derrame se generó a través de la ruptura de la tubería de 0.41 metros de diámetro, tenemos que su área (A) resulta ser de 0.13 m^2 , con una velocidad del fluido (v) de 38.22 m/s , (resultado determinado en el ítem 4.2.2.4.1) y se consideró un tiempo (t) de 2 minutos (120 segundos) ya que se tiene un sistema de bloqueo automatizado (RIVM, 2009).

Finalmente, reemplazando los valores en la ecuación 9, tenemos como resultado que el volumen del derrame para este caso es de 594.98 m^3 .

$$V = Q \times t = v \times A \times t \quad (9)$$

$$V = 38.22 \times 0.13 \times 120 = 594.98 \text{ m}^3$$

4.2.2.5 Determinación del diámetro de alcance del derrame

4.2.2.5.1 Determinación del diámetro de alcance del derrame antes de las medidas de mitigación

Debido a que se determinó el volumen derramado antes de las medidas de mitigación, se halló el radio de alcance del derrame para cada uno de los casos analizados. Para ello se tuvo la asunción que el espesor promedio de la película del derrame sea de 1 mm (0.001 m), y se utilizó la ecuación 4 descrita en el ítem 3.3.2.2.5.

a) Caso 1: derrame en un agujero de 0.04 metros

De la ecuación 6 tenemos como que el volumen del derrame para este caso es de 89.25 m³. Si consideramos que el espesor promedio de la película del derrame sea de 1 mm (0.001 m), tendremos un área del derrame de 89246.53 m², y con ello pudimos deducir el diámetro de alcance del derrame a través de la fórmula básica del círculo (ver ecuación 5), cuyo desarrollo se observa en la ecuación 10, obteniendo un diámetro del derrame de 337.09 m.

$$d_d = \sqrt{\frac{4 \times V}{0.001 \times \pi}} \quad (10)$$

$$d_d = \sqrt{\frac{4 \times 89.25}{0.001 \times 3.14}} = 337.09 \text{ m}$$

b) Caso 2: derrame por la ruptura de la manguera de 0.41 metros de diámetro

De la ecuación 7 tenemos como que el volumen del derrame para este caso es de 8924.65 m³. Si consideramos que el espesor promedio de la película del derrame sea de 1 mm (0.001 m), tendremos un área del derrame de 8924652.55 m², y con ello pudimos deducir el diámetro de alcance del derrame a través de la fórmula básica del círculo (ver ecuación 5), cuyo desarrollo se observa en la ecuación 11, obteniendo un diámetro del derrame de 3370.94 m.

$$d_d = \sqrt{\frac{4 \times V}{0.001 \times \pi}} \quad (11)$$

$$d_d = \sqrt{\frac{4 \times 8,920.65}{0.001 \times 3.14}} = 3370.94 \text{ m}$$

4.2.2.5.2 Determinación del diámetro de alcance del derrame después de las medidas de mitigación

De manera similar se determinó el volumen derramado después de las medidas de mitigación. Al igual que en el derrame antes de las medidas de mitigación se tuvo la asunción que el espesor promedio de la película del derrame sea de 1 mm (0.001 m), y se utilizó la ecuación 4 descrita en el ítem 3.3.2.2.5.

a) Caso 1: derrame en un agujero de 0.04 metros

De la ecuación 8 tenemos como que el volumen del derrame para este caso es de 5.95 m³. Si consideramos que el espesor promedio de la película del derrame sea de 1 mm (0.001 m), tendremos un área del derrame de 5949.77 m², y con ello pudimos deducir el diámetro de alcance del derrame a través de la fórmula básica del círculo (ver ecuación 5), cuyo desarrollo se observa en la ecuación 12, obteniendo un diámetro del derrame de 87.04 m.

$$d_d = \sqrt{\frac{4 \times V}{0.001 \times \pi}} \quad (12)$$

$$d_d = \sqrt{\frac{4 \times 5.95}{0.001 \times 3.14}} = 87.04 \text{ m}$$

b) Caso 2: derrame por la ruptura de la manguera de 0.41 metros de diámetro

De la ecuación 10 tenemos como que el volumen del derrame para este caso es de 594.98 m³. Si consideramos que el espesor promedio de la película del derrame sea de 1 mm (0.001 m), tendremos un área del derrame de 594976.84 m², y con ello pudimos deducir el diámetro de alcance del derrame a través de la fórmula básica del círculo (ver ecuación 5), cuyo desarrollo se observa en la ecuación 13, obteniendo un diámetro del derrame de 870.37 m.

$$d_d = \sqrt{\frac{4 \times V}{0.001 \times \pi}} \quad (13)$$

$$d_d = \sqrt{\frac{4 \times 594.98}{0.001 \times 3.14}} = 870.37 \text{ m}$$

4.2.3 Determinación del nivel de riesgo.

Para determinar el nivel de riesgo, se tomaron en cuenta los resultados obtenidos para la probabilidad de ocurrencia y la consecuencia del derrame. Como se puede observar en el ítem 4.2.1.2, la probabilidad de ocurrencia del derrame antes y después de las medidas de mitigación es la misma, y según lo detallado en la Tabla 5, se determinó esta probabilidad como “Remota” para el derrame por un agujero e “Improbable” para la ruptura.

En el caso de la consecuencia, de la Tabla 6 se dedujo que la consecuencia antes de las medidas de mitigación es una consecuencia “Crítica” para el derrame por un agujero y “Catastrófica” para la ruptura, y que luego de implementadas las medidas de mitigación se termina siendo una consecuencia “Marginal” para el derrame por un agujero y “Crítica” para la ruptura.

Bajo estas premisas, se procedió a la determinación del nivel de exposición al riesgo en condiciones previas y posteriores a la implementación de las medidas de mitigación, concluyéndose que, en la etapa inicial, el riesgo se ubica dentro del umbral de "Tolerable". Posteriormente, tras la incorporación de las acciones mitigadoras propuestas, dicho nivel se reduce a un rango considerado "Aceptable", logrando así una atenuación significativa del riesgo residual y favoreciendo una operatividad más robusta y confiable del nuevo ducto submarino, en términos de salvaguarda para las personas, el entorno ecológico y la infraestructura asociada.

4.3 Discusión de resultados.

De la determinación de las consecuencias, se deduce que el diámetro del derrame se redujo de 337.09 metros a 87.04 metros para el derrame por un agujero de 0.04 metros de diámetro, y de 3370.94 metros a 870.37 metros para el derrame por la ruptura de la manguera de 0.41 metros de diámetro. Esta reducción significó una reducción del 74.18% del diámetro del derrame en ambos casos, tal como se puede observar en la Tabla 7.

Tabla 7.

Reducción del diámetro del derrame antes y después de las medidas de mitigación.

Diámetro del agujero	Diámetro del derrame (m)		Reducción (%)
	Antes de las medidas	Después de las medidas	
Agujero de 0.04 m.	337.09	87.04	74.18%
Ruptura de la manguera (0.41 m.)	3370.94	870.37	74.18%

Nota: Elaboración propia.

Conclusiones

- Los resultados obtenidos evidencian que las estrategias de mitigación contempladas en la fase de ingeniería básica resultan eficaces para la atenuación de los niveles de riesgo vinculados a la operatividad del ducto submarino. Tales medidas permiten consolidar una operación caracterizada por altos estándares de confiabilidad y seguridad, resguardando la integridad de las personas, el entorno natural y las instalaciones críticas asociadas.
- Se identificó que el peor evento no deseado en la operación del nuevo ducto submarino para el transporte de combustibles líquidos en una refinería de petróleo es el derrame de combustible líquido en el mar. Este suceso representa una amenaza sustancial desde el punto de vista humano, ambiental y para la infraestructura.
- Se evidenció que el diámetro del derrame se redujo de 337.09 metros a 87.04 metros para un derrame ocasionado por un agujero de 0.04 metros de diámetro. Asimismo, para un derrame originado por la ruptura de una manguera de 0.41 metros de diámetro, el diámetro se redujo de 3370.94 metros a 870.37 metros. Estas reducciones, equivalentes al 74.18% en ambos casos, representan una mitigación considerable de los posibles impactos económicos y ambientales asociados al evento.
- Como resultado del análisis de riesgo, se estableció que el nivel de exposición previo a la implementación de medidas mitigadoras se sitúa en la categoría de "Tolerable". Posteriormente, tras la aplicación de dichas medidas, el riesgo residual alcanza un umbral clasificado como "Aceptable", asegurando así un incremento en la robustez operacional del ducto submarino y un desempeño más confiable y seguro para todos los elementos involucrados.

Recomendaciones

- Dado que se logró una reducción del 74.18% del diámetro del derrame en ambos escenarios analizados, se recomienda que el Estado Peruano verifique, en el diseño de los ductos submarinos de combustibles líquidos, la inclusión de una válvula submarina de desacople rápido (Marine Breakaway Coupling), cumpliendo así lo dispuesto en el D.S. N° 081-2007-EM, la norma ASME B31.4 y la norma API RP 1111. Esta medida permitiría una mayor seguridad en la carga/descarga de combustibles líquidos en las operaciones marinas y reducirá significativamente los riesgos asociados a derrames en zonas de alta consecuencia.
- Se recomienda extrapolar la metodología de análisis cualitativo y cuantitativo desarrollada en el presente estudio a otros hidrocarburos líquidos transportados en el contexto operacional de una refinería de petróleo. Empleando una plataforma de simulación adecuada, deberán contrastarse los escenarios con y sin la implementación de medidas de mitigación adicionales, como la incorporación de una válvula submarina de desacople rápido, con el fin de evaluar la eficacia de dichas intervenciones en la atenuación del riesgo y en la minimización de externalidades negativas tanto económicas como ambientales.
- Asimismo, se plantea la instauración de un programa sistemático y periódico de evaluación del riesgo asociado a la operación de ductos submarinos, integrando enfoques tanto cualitativos como cuantitativos. Esta estrategia favorecerá el seguimiento continuo de la confiabilidad operativa y de la efectividad de las medidas mitigadoras implementadas, facilitando la adopción de decisiones informadas orientadas a la mejora progresiva y sostenida de la infraestructura crítica.

- Con el objetivo de fortalecer la rigurosidad en la evaluación de la eficacia de las medidas de mitigación, se recomienda la ejecución de simulaciones bajo condiciones límite, tales como fallas sistémicas múltiples o la ocurrencia de fenómenos naturales de alta severidad. Este enfoque analítico permitirá validar de manera más sólida la capacidad de resiliencia y respuesta de las estrategias propuestas frente a escenarios de contingencia de baja probabilidad, pero alto impacto.

Referencias Bibliográficas

- AICHe. (2000). *“Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis.”*
- API. (2016). *API 581: “Risk-Based Inspection Methodology.”*
- API. (2019). *API RP 1160: Gestión de la integridad del sistema para tuberías de líquidos peligrosos.*
- Bernoulli, D. (1738). *Hydrodynamica.*
- CFR. (2000). § 195.450 *Definitions.* Code of Federal Regulations (CFR).
<https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-D/part-195/subpart-F/subject-group-ECFR3f96666e5ed91ef/section-195.450>
- Crawley, F., & Tyler, B. (2015). *HAZOP: Guide to Best Practice Guidelines to Best Practice for the Process and Chemical Industries.*
- De Stefani, V., & Carr, P. (2010). A model to estimate the failure rates of offshore pipelines. *Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference, IPC.*
- Dziubiński, M., Fraczak, M., & Markowski, A. S. (2006). Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.*
- El Peruano. (2022). *Derrame de petróleo en Ventanilla causó afectación en 96 sitios.*
<https://www.elperuano.pe/noticia/168098-derrame-de-petroleo-en-ventanilla-causo-afectacion-en-96-sitios>
- Gall Thomson Environmental Ltd. (2024). *Flip-Flap Valve Marine Breakaway Coupling.* <https://www.gallthomson.com/en/products/marine-breakaway-couplings/mbc-flip-flap-valve>
- IEC. (2016). *IEC 61882 International Standard Hazard and operability studies (HAZOP studies) – Application guide (Vol. 2016).*
- Ikusmira. (2025). *Frecuencia de ocurrencia.* <https://ikusmira.org/p/frecuencia-de-ocurrencia>

- MINAGRI. (2014). *Decreto Supremo N° 004-2014-MINAGRI. Decreto Supremo que aprueba la actualización de la lista de clasificación y categorización de las especies amenazadas de fauna silvestre legalmente protegidas.*
- MINEM. (1993). *D.S. N° 052-93-EM: "Aprueban el Reglamento de Seguridad para el Almacenamiento de Hidrocarburos."*
- MINEM. (2002). *D.S. N° 032-2002-EM: Aprueban "Glosario, Siglas y Abreviaturas del Subsector Hidrocarburos." 1–43.*
- MINEM. (2007a). *D.S. N° 021-2007-EM: "Aprueban Reglamento para la Comercialización de Biocombustibles." 72–73.*
- MINEM. (2007b). *D.S. N° 043-2007-EM: "Aprueban el Reglamento de Seguridad para las Actividades de Hidrocarburos y modifican diversas disposiciones."*
- MINEM. (2007c). *D.S. N° 081-2007-EM: "Reglamento de transporte de hidrocarburos por ductos."*
- MINEM. (2020). *D.S. N° 036-2020-EM: "Decreto Supremo que modifica disposiciones de seguridad relacionadas al estudio de riesgos y planes de contingencia y establecen medidas complementarias."*
- MINEM. (2021a). *R.D. N° 129-2021-MINEM/DGH: "Lineamientos y disposiciones técnicas necesarias para la elaboración de los Estudios de Riesgos de Seguridad y Planes de Respuestas de Emergencia".*
- MINEM. (2021b). *R.M. N° 469-2021-MINEM/DM: "Resolución Ministerial que establece especificaciones técnicas de calidad de Gasolinas y Gasohol de uso Automotor, Premium y Regular."*
- MINEM. (2023). *Estadísticas del MINEM.*
https://www.minem.gob.pe/_estadisticaSector.php?idSector=5
- Nessim, M. A., Stephens, M. J., & Zimmerman, T. J. E. (2000). Risk-based maintenance planning for offshore pipelines. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, 2, 791–800. <https://doi.org/10.4043/12169-ms>

- NFPA. (2022). *NFPA 551: "Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments."*
<https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-551-standard-development/551>
- NSW Government Planning. (2008). *Advisory Paper No 8 HAZOP Guidelines.*
- OSINERGMIN. (2022). *RCD N° 088-2022-OS-CD: Aprueban el "Procedimiento para la emisión de opinión favorable de los Estudios de Riesgos de Seguridad y Planes de Respuesta a Emergencias de las Actividades e Instalaciones de Hidrocarburos", bajo el Reglamento de Seguridad para I.*
- PETROPERÚ. (2024). *Gasoholes.*
<https://www.petroperu.com.pe/comercial/gasolinas-regular-y-premium>
- Rausand, M., & Haugen, S. (2020). *Risk assessment Theory, Methods, and Applications.*
- RIVM. (2009). Reference Manual Bevi Risk Assessments. *Dutch National Institute for Health and Environment*, 189.
- Shalbolova, U. Z., Yegemberdiyeva, S. M., Uderbayev, S. S., Madina, Elpanova, A., & Kazbekova, L. A. (2014). Specifics of oil pipeline systems' risks management. *Life Science Journal.*
- Silvianita, Agustina, C., Hadiwidodo, Y. S., & Suntoyo Dhanistha, W. L. (2023). Risk assessment on offshore pipes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1198(1), 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1198/1/012033>
- SPHERA. (2021). *What Is a HAZOP?* <https://sphera.com/resources/glossary/what-is-a-hazop/>

Lima, 14 de octubre de 2025

Habiendo la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica

Otorgado el Título Profesional de Ingeniero Petroquímico

A JORGE ALBERTO BRAVO ROJAS

Expídase el Diploma N° 34432-G y archívese el Trabajo de Suficiencia Profesional

SECRETARÍA GENERAL

