

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

**“ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGO PARA UNA PLANTA  
DE PRUEBA DE PRODUCCIÓN DE UN POZO DE  
PERFORACIÓN”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR**

**GARCÍA RODRÍGUEZ RENZO AURELIO**

**ASESOR**

**ING<sup>º</sup> RICARDO RODRIGUEZ VILCHEZ**

**Callao – 2024**

**PERÚ**



# TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL - GARCIA RODRIGUEZ RENZO AURELIO



Nombre del documento: TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL - GARCIA RODRIGUEZ RENZO AURELIO.pdf  
ID del documento: a50cd0389f7cd6352d2fc12eff879e7acb77af51  
Tamaño del documento original: 2,04 MB

Depositante: FIQ PREGRADO UNIDAD DE INVESTIGACION  
Fecha de depósito: 3/4/2024  
Tipo de carga: interface  
fecha de fin de análisis: 3/4/2024

Número de palabras: 21.653  
Número de caracteres: 143.783

Ubicación de las similitudes en el documento:



## Fuentes de similitudes

### Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	1library.co   Identificación y descripción de peligros - Análisis de los resultados <a href="https://1library.co/article/identificación-descripción-peligros-análisis-resultados.q2m506ry">https://1library.co/article/identificación-descripción-peligros-análisis-resultados.q2m506ry</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (75 palabras)
2	1library.co   Fase 2: Estimación de Frecuencias y Consecuencias <a href="https://1library.co/article/fase-estimación-de-frecuencias-y-consecuencias.q2m506ry">https://1library.co/article/fase-estimación-de-frecuencias-y-consecuencias.q2m506ry</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (54 palabras)
3	scielo.org.co   Análisis espacial de datos: la provisión de servicios públicos básicos... <a href="http://s.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S1657-63572022000200002">http://s.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S1657-63572022000200002</a> 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (24 palabras)

### Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	1library.co   Fase 1: Identificación y descripción de los peligros <a href="https://1library.co/article/fase-identificación-y-descripción-de-los-peligros.q2m506ry">https://1library.co/article/fase-identificación-y-descripción-de-los-peligros.q2m506ry</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (15 palabras)
2	1library.co   Análisis Cuantitativo de los Errores de Posicionamiento del Sistema d... <a href="https://1library.co/document/4zpm8xvz-analisis-cuantitativo-errores-posicionamiento-sistema-coli...">https://1library.co/document/4zpm8xvz-analisis-cuantitativo-errores-posicionamiento-sistema-coli...</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (19 palabras)
3	Documento de otro usuario #ebd8e4 El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (26 palabras)
4	link.springer.com   Fuzzy fault tree analysis: a review of concept and application   ... <a href="https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13198-013-0145-x.pdf">https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13198-013-0145-x.pdf</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (13 palabras)
5	www.scielo.org.mx   Estimación del efecto de la alternancia sobre la provisión de ... <a href="https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-84212018000100195&amp;script=sci_abstract">https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-84212018000100195&amp;script=sci_abstract</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (10 palabras)

### Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas) Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

- <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp>
- <https://doi.org/10.1002/qre.3271>

## PRÓLOGO DEL JURADO

El presente Trabajo de Suficiencia Profesional fue expuesto por el Bachiller **GARCIA RODRIGUEZ RENZO AURELIO** ante el Jurado de Exposición del Informe de Trabajo de Suficiencia Profesional conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

ING° ANCIETA DEXTRE CARLOS ALEJANDRO	Presidente
ING° MEDINA COLLANA JUAN TAUMATURGO	Secretario
ING° AVELINO CARHUARICRA CARMEN GILDA	Vocal
ING° RODRIGUEZ VILCHEZ RICARDO	Asesor

Tal como está asentado en el Libro de actas N° 02 Folio N° 46 y Acta N° 239 de fecha 29 de abril del 2024, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Titulación por Trabajo de Suficiencia Profesional, de conformidad a lo dispuesto en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 150–2023–CU del 15 de junio de 2023

# ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS .....	3
ÍNDICE DE FIGURAS .....	4
I. ASPECTOS GENERALES .....	5
1.1. Objetivos .....	5
1.1.1. Objetivo General.....	5
1.1.2. Objetivos Específicos .....	5
1.2. Organización de la empresa o Institución .....	5
1.2.1. Reseña de Empresa .....	5
II. FUNDAMENTACION DE LA EXPERIENCIA PROFESIONAL .....	7
2.1. Marco Teórico .....	7
2.1.1. Seguridad Industrial y Seguridad de los Procesos .....	7
2.1.2. Evolución del ACR .....	8
2.1.3. Definición de ACR.....	9
2.1.4. Seguridad Industrial y Seguridad de los Procesos .....	11
2.1.5. Aplicación del ACR .....	12
2.1.6. Proceso General para la Elaboración de un Estudio ACR .....	13
2.1.7. Definiciones Básicas.....	14
2.1.8. Metodologías para Sintetizar Frecuencias .....	22
2.2. Descripción de las actividades desarrolladas.....	26
2.2.1. Identificación de Peligros .....	26
2.2.2. Definición de Escenarios de Accidentes .....	27
2.2.3. Orificios de Fuga .....	29
2.2.4. Criterios de Daño.....	30
2.2.5. Estimación de Consecuencias .....	37
III. APORTES REALIZADOS.....	44
3.1. Datos meteorológicos .....	44
3.2. Descripción detallada de las áreas de procesos y servicios.....	44
3.2.1. Colección y Separación .....	44
3.2.2. Almacenamiento .....	45
3.2.3. Sistema de carga de cisternas.....	47

3.2.4.	Sistema de Antorcha.....	47
3.2.5.	Equipos Auxiliares .....	48
3.3.	Condiciones de Operación.....	49
3.4.	Propiedades de Materiales .....	51
3.4.1.	Propiedades del Diésel .....	51
3.4.2.	Características del Crudo .....	52
3.5.	Identificación de Peligros .....	52
3.5.1.	Descripción general de la metodología .....	52
3.5.2.	Revisión Inicial.....	53
3.5.3.	Revisión detallada del Proceso.....	53
3.5.4.	Revisión del balance de materia .....	54
3.5.5.	Revisión de estudios de seguridad previos .....	54
3.5.6.	Lista final de potenciales áreas peligrosas.....	54
3.5.7.	Elaboración de escenarios de eventos mayores .....	54
3.6.	Modelamiento de Consecuencias .....	59
3.6.1.	Tamaño de Agujeros .....	59
3.6.2.	Criterios de Daño.....	60
3.6.3.	Modelamiento de Daños para eventos mayores .....	61
3.6.4.	Resultados del cálculo de Consecuencias.....	63
3.7.	Análisis de Resultados y Observaciones para los distintos escenarios	66
IV.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	72
V.	RECOMENDACIONES .....	73
5.1.	Medidas de Prevención .....	73
5.2.	Medidas de Mitigación .....	73
VI.	BIBLIOGRAFÍA .....	75
VII.	ANEXOS .....	78

# ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Comparativo entre Seguridad Ocupacional y Seguridad de los Procesos..	8
<b>Tabla 2</b>	Transformación de Probits a % de afectación .....	32
<b>Tabla 3</b>	Efectos de la radiación térmica .....	33
<b>Tabla 4</b>	Efectos de la sobrepresión.....	35
<b>Tabla 5</b>	Constantes de Probit, toxicidad.....	36
<b>Tabla 6</b>	Condiciones climáticas.....	44
<b>Tabla 7</b>	Condiciones de Operación y dimensiones de Equipos de Procesos ...	50
<b>Tabla 8</b>	Condiciones de Operación y dimensiones de Almacenamiento de Crudo y Diésel ..	50
<b>Tabla 9</b>	Condiciones de Operación de bombas de despacho de Crudo.....	50
<b>Tabla 10</b>	Condiciones de Operación de bombas de despacho de Crudo .....	51
<b>Tabla 11</b>	Propiedades del Diésel .....	51
<b>Tabla 12</b>	Propiedades del Crudo .....	52
<b>Tabla 13.</b>	Lista final de potenciales áreas peligrosas .....	54
<b>Tabla 14</b>	Escenarios por Ubicación .....	58
<b>Tabla 15</b>	Escenarios de Incendio por tamaño de agujero .....	61
<b>Tabla 16</b>	Resultados Incendio.....	64
<b>Tabla 17</b>	Efectos y consecuencias peligrosas sobre la instalación, personas y ambiente debido a escenarios de incendio .....	66
<b>Tabla 18</b>	Estimación de Distancias Seguras .....	71

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Organigrama de la empresa .....	6
<b>Figura 2</b>	Secuencia de un accidente .....	14
<b>Figura 3</b>	Árbol de fallas .....	24
<b>Figura 4</b>	Árbol de eventos .....	26
<b>Figura 5</b>	Etapas de los Estados de un Accidente .....	28
<b>Figura 6</b>	Ecuación Probit radiación térmica .....	32
<b>Figura 7</b>	Ecuación Probit, sobrepresión.....	34
<b>Figura 8</b>	Ecuación Probit, toxicidad .....	35
<b>Figura 9</b>	Disposición de Equipos .....	51
<b>Figura 10</b>	Árbol de eventos para una fuga continua de gas.....	56
<b>Figura 11</b>	Árbol de eventos para una fuga de líquidos.....	57
<b>Figura 12</b>	Árbol de eventos para una fuga continua de líquidos .....	57

## **I. ASPECTOS GENERALES**

### **1.1. Objetivos**

#### **1.1.1. Objetivo General**

Dar a conocer la labor realizada en el área de Técnica de la empresa QHSE Energy Services SAC

#### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- 1) Describir la metodología del PSM (Process Safety Management), seguridad de los procesos
- 2) Describir la metodología del ACR (Análisis Cuantitativo de Riesgos) y su desarrollo para la planta de Prueba de Producción del Pozo de perforación

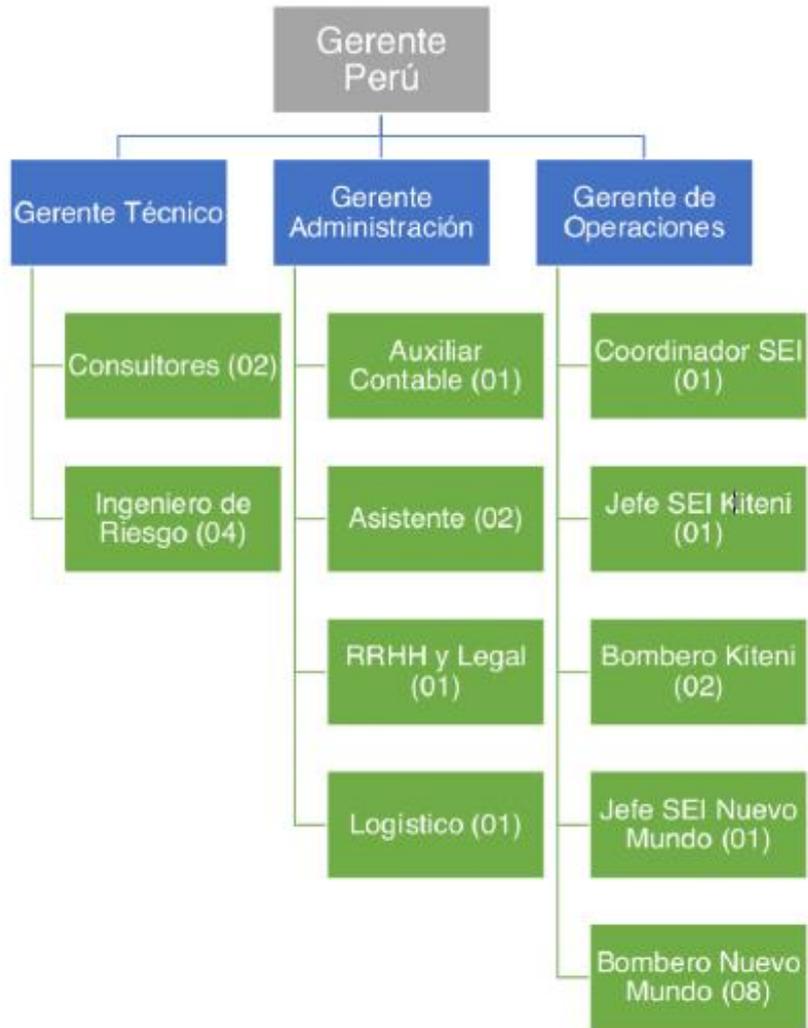
### **1.2. Organización de la empresa o Institución**

#### **1.2.1. Reseña de Empresa**

QHSE ENERGY SERVICES SAC se especializa en proporcionar alternativas globales e innovadoras para el ámbito energético, que demandan Asesoramiento, Consultoría y Servicios vinculados al diseño, abastecimiento, instalación, funcionamiento, formación, asistencia técnica, proyectos especiales, supervisión, certificación, implementación de sistemas de gestión y administración de riesgos, inspecciones y gestión de crisis.

Los servicios ofrecidos son soluciones completas adaptadas a las demandas específicas de nuestros clientes, garantizando la sostenibilidad de sus operaciones en armonía con el entorno y las comunidades afectadas, y contribuyendo a la salvaguarda de sus empleados, instalaciones y activos, con el propósito de minimizar los riesgos, controlar los peligros y mitigar el impacto de cualquier eventualidad indeseada.

**FIGURA 1**  
**ORGANIGRAMA DE LA EMPRESA**



El autor

## **II. FUNDAMENTACION DE LA EXPERIENCIA PROFESIONAL**

### **2.1. Marco Teórico**

#### **2.1.1. Seguridad Industrial y Seguridad de los Procesos**

En el marco del avance industrial, los métodos han alcanzado una mayor complejidad y extensión, integrando frescas fuentes primordiales, equipamiento y actores, lo que resulta en la aparición de riesgos y peligros suplementarios que, si no son identificados y manejados de manera apropiada, podrían originar sucesos con consecuencias adversas para la salud humana, la actividad económica y la imagen pública de la compañía, llegando incluso a cuestionar su sostenibilidad a largo plazo.

Según Čepin (2011), en sectores como la industria química, petroquímica y la mayoría de otras industrias, todas las compañías deben implementar un plan de seguridad ocupacional, centrándose especialmente en la seguridad laboral. Este plan puede ser un requisito legal en distintos países, estados y áreas locales, aplicando tanto a los trabajadores en entornos de manufactura, laboratorios de investigación o plantas piloto, como a aquellos en oficinas. Su enfoque principal reside en la protección del personal.

Estos programas tienen como objetivo principal prevenir lesiones a los empleados debido a accidentes laborales, tales como caídas, cortes, esguinces, distensiones, impactos con objetos, y lesiones por movimientos repetitivos, según señalan Roberts et al. (1981) Son altamente valiosos y, de hecho, imprescindibles. Sin embargo, no abordan la esencia de la seguridad del proceso.

Esta disciplina se define como la práctica que se enfoca en prevenir incendios, explosiones y fugas químicas no planificadas en instalaciones de procesamiento químico, como lo indican Virtanen et al. (2006) Estos incidentes no solo tienen lugar en instalaciones químicas, sino también en refinerías, plataformas petroleras en alta mar, entre otros lugares.

Otra definición plantea que la seguridad del proceso implica la preparación, mitigación, respuesta o restauración ante la eventualidad de liberaciones catastróficas de productos químicos o energía relacionadas con un proceso asociado a una instalación, según lo expuesto por Aslansefat et al. (2020)

Un comparativo entre la seguridad ocupacional y la seguridad de los procesos, se observa en la **Tabla 1**

**TABLA 1**  
**COMPARATIVO ENTRE SEGURIDAD OCUPACIONAL Y SEGURIDAD DE LOS PROCESOS**

<b>Seguridad Ocupacional</b>	<b>Seguridad de los Procesos</b>
Normalmente pueden detectarse por personal entrenado y prestando atención a los detalles.	Se encuentran ocultos dentro de tuberías y equipos, y requieren evaluaciones de ingeniería para su detección.
Aunque pueden ser graves no tienen el potencial para afectar a una gran cantidad de personas.	Una fuga moderada puede desencadenar una catástrofe que impacte seriamente a comunidades enteras y al medioambiente.
Generalmente tienen bajo impacto en la estabilidad financiera y en la reputación de la compañía.	Pueden afectar dramáticamente la estabilidad y la sostenibilidad del negocio.
No requieren competencias técnicas especializadas para su manejo y mitigación.	Su evaluación y manejo requiere usualmente la intervención de técnicos y especialistas en disciplinas de ingeniería.

El autor

### **2.1.2. Evolución del ACR**

Es evidente que el Análisis de Riesgos y Consecuencias (ACR) ha experimentado un significativo y constante desarrollo, convirtiéndose en una herramienta base necesaria para la toma de decisiones basada en la evaluación del riesgo (Mahmood et al., 2013) En este sentido, durante las últimas tres décadas, se ha observado un progreso notable en las herramientas a disposición para llevar a cabo la gestión del riesgo (Lavasani, 2015)

En la actualidad, contamos con la capacidad de calcular diversas medidas de riesgo al considerar una variedad de posibles eventos de fallo, del cual cuyas consecuencias y probabilidad se estiman mediante modelos matemáticos altamente sofisticados (Yazdi et al., 2023) Estos modelos nos permiten calcular desde tasas de liberación de sustancias peligrosas hasta el impacto que estas pueden tener en las personas, el medio ambiente y los equipos, e incluso la dispersión de dichas sustancias en la atmósfera circundante (Leu y Chang, 2015) Una vez examinados los aspectos mencionados anteriormente, también disponemos de otros modelos matemáticos altamente avanzados para calcular el riesgo (Ramzali et al., 2015) Con la obtención de diferentes medidas de riesgo,

resulta sencillo determinar, si es necesario, las correspondientes medidas de control.

En algunas situaciones, la identificación de las medidas de control implica llevar a cabo un Análisis Costo – Beneficio, cuyo propósito principal es reducir los riesgos hasta alcanzar un nivel aceptable (Shi et al., 2014)

Por lo general, se consideran cuatro enfoques diferentes para seleccionar efectivamente las medidas de reducción y control de riesgos. En primer lugar, está la eliminación, que implica establecer medidas para erradicar por completo el riesgo, como cambiar la tecnología utilizada en la instalación. Luego, está la reducción, que implica implementar controles para disminuir el riesgo a niveles tolerables, lo que generalmente requiere una combinación de medidas administrativas e ingenieriles, como ajustar el espacio entre equipos o mejorar el sistema de ventilación de una sala de control. En tercer lugar, está la aceptación, donde la dirección de la empresa determina que el riesgo es tolerable, generalmente basándose en una evaluación cualitativa o cuantitativa del mismo. Por último, está la transferencia, donde el riesgo se transfiere a otros, como asegurarlo.

### **2.1.3. Definición de ACR**

Un proceso formal de Análisis de Riesgos (ACR) tiene como objetivo abordar una serie de preguntas clave de manera sistemática y estructurada (ISO GUIDE 73, 2009) Este enfoque se concentra en identificar posibles eventos adversos, evaluar su probabilidad de ocurrencia, determinar las posibles consecuencias de tales eventos y, finalmente, analizar si el riesgo asociado es aceptable o si se requieren acciones adicionales para mitigarlo. Este proceso integral proporciona una sólida base para la toma de decisiones informadas y la gestión efectiva de riesgos en diversos ámbitos y sectores (ISO 31000, 2009)

En este contexto, el ACR se puede definir como el proceso mediante el cual se estiman las posibilidades de fatalidades, sea dentro del personal de una instalación, el público en general o ambos.

Estas posibilidades de fatalidades se expresan a través de varias medidas de riesgo interrelacionadas. Por lo tanto, para comprender e interpretar completamente el riesgo de una instalación específica, se requiere la estimación

y el análisis de todas estas medidas de riesgo. Estas medidas incluyen (ISO GUIDE 73, 2009):

**a) Riesgo Individual Específico de una Localización**

El LSIR (Location Specific Individual Risk), conocido por sus siglas en inglés, ofrece una medida del peligro inherente asociado a diversas ubicaciones geográficas dentro de una planta o instalación. La determinación del LSIR se fundamenta en la suposición de que cada ubicación geográfica considerada está constantemente ocupada por un individuo. Por lo general, el cálculo del LSIR se lleva a cabo en puntos distribuidos en una malla ortogonal que abarca el área de interés. Los riesgos estimados se representan mediante curvas o contornos de iso-riesgo para facilitar su comprensión. Estos contornos de riesgo indican la posible magnitud o intensidad del riesgo, si bien el riesgo solo se concreta en una ubicación específica si hay personas presentes en ella durante un tiempo suficiente (ISO 31000, 2009) Es importante señalar que el LSIR únicamente considera las fuentes de riesgo que emanan de ubicaciones fijas, por lo que no aborda riesgos como los asociados al transporte o los relacionados con la ocupación.

**b) Riesgo Individual**

El IR (Individual Risk), también conocido como IRPA (Individual Risk Per Annum) en inglés, se calcula de manera individual para cada trabajador en una instalación. Sin embargo, en la práctica, no existe una definición suficiente de los datos que determinan la exposición y las ubicaciones específicas donde los individuos están expuestos. Por ende, los cálculos del IR se efectúan para grupos representativos de trabajadores en lugar de para cada individuo (ISO GUIDE 73, 2009)

La contribución del proceso industrial al IR de cada grupo representativo de trabajadores se estima mediante una ponderación del tiempo de los valores del LSI determinados en cada ubicación donde el grupo representativo pasa tiempo. Se consideran en este caso las contribuciones al riesgo de factores como el transporte y los riesgos ocupacionales. En situaciones donde el personal permanece en la instalación durante sus horas libres, se incluye este riesgo adicional dentro del cálculo del IR (ISO 31000, 2009)

### **c) Pérdida Potencial de Vidas**

El IR (Individual Risk), también conocido como IRPA (Individual Risk Per Annum) en inglés, se calcula individualmente para cada trabajador en una instalación. Sin embargo, en la práctica, la definición de los datos que determinan la exposición y las ubicaciones donde los individuos están expuestos no es lo suficientemente clara. Por consiguiente, los cálculos del IR se realizan para grupos representativos de trabajadores en lugar de hacerlo para cada individuo (ISO GUIDE 73, 2009)

La contribución del proceso industrial al IR de cada grupo representativo de trabajadores se estima ponderando el tiempo de los valores del LSI determinados en cada ubicación donde el grupo pasa tiempo. Se toman en cuenta las contribuciones al riesgo de factores como el transporte y los riesgos ocupacionales. Además, se considera el riesgo adicional cuando el personal permanece en la instalación durante sus horas libres (ISO 31000, 2009)

### **d) Riesgo Social**

El SR (Societal Risk), también conocido como F–N Curves (Curvas F–N), ilustra la relación entre la frecuencia acumulada (F) de eventos que causan N o más fatalidades. Estas curvas muestran cómo varía la frecuencia acumulada de eventos mortales a medida que aumenta el número de fatalidades (N) La configuración de la curva implica que el valor máximo de F corresponde al valor más bajo de N, y viceversa, lo que significa que F disminuye a medida que N aumenta. De esta manera, las curvas F–N ofrecen una visión de cómo se distribuye el riesgo entre eventos que resultan en un pequeño número de fatalidades y aquellos que resultan en un gran número de fatalidades (ISO 31000, 2009)

#### **2.1.4. Seguridad Industrial y Seguridad de los Procesos**

El Análisis de Riesgos (ACR) presenta una serie de ventajas distintivas que lo diferencian de otras metodologías de evaluación de riesgos. En primer lugar, su aplicación ofrece una serie de beneficios significativos: Se busca minimizar la subjetividad en la identificación de áreas críticas, abarcando todos los posibles escenarios de accidentes, incluso aquellos que poseen una baja probabilidad o que son desconocidos previamente, y examina detalladamente las secuencias

potenciales de accidentes, evaluando tanto su frecuencia como su gravedad para priorizarlos según su relevancia relativa (Baskoro et al., 2021)

Además, proporciona una base objetiva y cuantitativa que facilita la toma de decisiones, tomando siempre en cuenta el contexto específico de la instalación para lograr una evaluación exhaustiva y precisa del riesgo.

Sin embargo, es fundamental reconocer que el ACR presenta limitaciones. Un estudio realizado por el Health and Safety Executive (HSE) del Reino Unido ha identificado diversas deficiencias persistentes en su aplicación a lo largo del tiempo. Estas deficiencias han contribuido significativamente a diversas situaciones indeseables, que van desde la falta de implementación hasta el escepticismo sobre la confiabilidad de los resultados, pasando por prácticas inadecuadas y la manipulación de los resultados.

Entre estas limitaciones se incluye la manipulación de los resultados para respaldar decisiones preestablecidas, la falta de alineación entre las medidas de reducción del riesgo y los peligros identificados, el uso de modelos y datos poco precisos o irreales, la omisión de la incertidumbre inherente al proceso de análisis y gestión de riesgos, y la falta de participación de un equipo con experiencia práctica en la actividad, operación o instalación objeto de estudio.

#### **2.1.5. Aplicación del ACR**

Es una metodología aplicable en todas las etapas del ciclo de vida de una instalación que maneja, procesa o transporta hidrocarburos y/o sustancias peligrosas en condiciones propensas a explosiones, incendios o liberaciones de nubes tóxicas (Villamizar et al., 2019) Por lo tanto, el ACR puede y debe ser utilizado en diversas fases del proceso, que incluyen la Ingeniería Conceptual, la Ingeniería Básica, la Ingeniería de Detalles, la Operación, los Cambios y Modificaciones, así como el Abandono y Desmantelamiento. Esta metodología proporciona un enfoque sistemático y cuantitativo para evaluar y mitigar los riesgos asociados en cada etapa del ciclo de vida de la instalación, lo que contribuye significativamente a mejorar la seguridad y reducir la probabilidad de accidentes y eventos no deseados.

### **2.1.6. Proceso General para la Elaboración de un Estudio ACR**

La realización de un estudio de Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR) implica el manejo de una gran cantidad de datos y modelos con un alto grado de incertidumbre. Por esta razón, los expertos en análisis de riesgos suelen sugerir interpretar los resultados del riesgo en términos comparativos en lugar de absolutos (Cicero – Oneto et al., 2012) No obstante, existen circunstancias en las que puede ser necesario interpretar los resultados del riesgo en términos absolutos, como para demostrar el cumplimiento con estándares basados en el desempeño o al establecer prioridades en la determinación de medidas de mitigación costo – efectivas. Sin embargo, esta interpretación debe realizarse con precaución y solo cuando no haya otra opción (Villamizar et al., 2019)

Es esencial recordar que el riesgo asociado a un evento se define como el producto de la probabilidad de que ocurra y la magnitud (severidad) del resultado del evento. La probabilidad que ocurra el evento se define en términos de la frecuencia anual de su resultado, mientras que la magnitud del resultado se define como la cantidad de fatalidades causadas por el evento (Cicero–Oneto et al., 2012)

Es importante destacar que el riesgo calculado es lineal con respecto tanto a la frecuencia como a la cantidad de fatalidades. Sin embargo, la reacción del público y los medios de comunicación ante estos eventos tiende a ser considerablemente mayor cuando resultan en múltiples fatalidades. Esto demuestra que eventos con riesgos estimados iguales pueden generar reacciones o impactos en la reputación de la empresa muy diferentes por parte del público y los medios.

Este hecho subraya que el riesgo va más allá de ser simplemente el producto de la frecuencia por las consecuencias, porque está influenciado por los valores individuales y el contexto específico en el que se presenta el riesgo. Por lo tanto, se puede concluir que el riesgo no es igual para todas las personas y depende de la percepción y aversión individual al riesgo (Yazdi et al., 2023) Además, la aversión al riesgo está aumentando cada día más debido a la influencia de los reguladores, las regulaciones y, sobre todo, los medios de comunicación.

La aversión al riesgo es un factor crucial al evaluar la tolerabilidad de los riesgos y al tomar decisiones para su control. Sin embargo, es difícil, sino imposible, incorporarla en modelos matemáticos para calcular el riesgo.

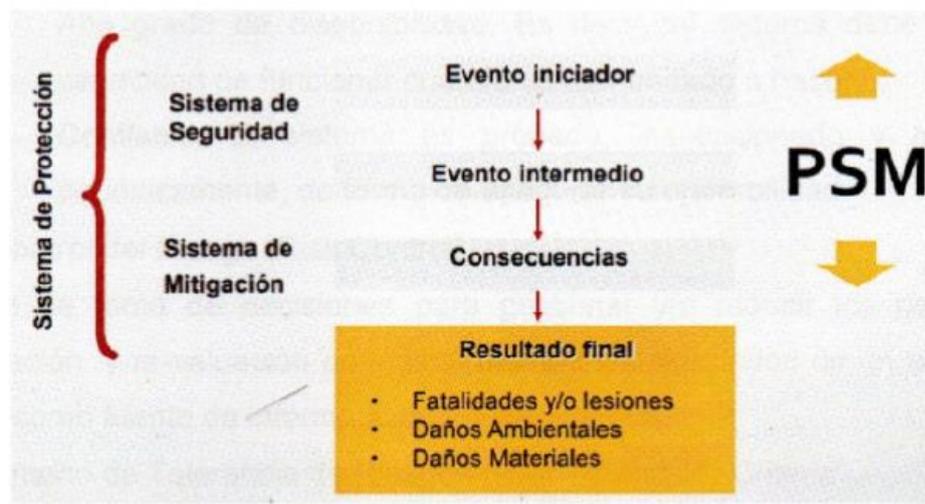
### 2.1.7. Definiciones Básicas

A continuación, se presentan las definiciones de algunos de los términos más importantes utilizados en el tema del ACR

#### a) Accidente

Un suceso o secuencia de sucesos no deseados e inesperados tiene lugar, resultando en lesiones personales y/o daños al medio ambiente y/o pérdidas materiales, según MINAM (2010) Estos eventos son el resultado de causas específicas que se desarrollan gradualmente hasta que se produce un resultado no deseado. Esta secuencia comienza con el evento iniciador, continúa con las respuestas de los sistemas de seguridad y/o mitigación y/o del operador que pueden minimizar o agravar las consecuencias del evento iniciador, y finalmente, los posibles resultados de la secuencia del accidente o consecuencias. La Figura 2 ilustra un esquema de ocurrencia de un accidente.

**FIGURA 2**  
**SECUENCIA DE UN ACCIDENTE**



Mata (2019)

**b) Análisis Coste – Beneficio (Cost Benefit Analysis (CBA))**

Se trata de una metodología que proporciona un contexto para evaluar y comparar los beneficios derivados o relacionados a la reducción de riesgos con los costos asociados a una opción específica (IEG, 2010)

**c) Capa Independiente de Protección (Independent Protection Layer (IPL))**

Un sistema no instrumentado (no SIS) desempeña las funciones de seguridad necesarias para alcanzar o mantener un estado considerado seguro del equipo protegido, según Jin & Summers (2016) Los sistemas designados como Instrumentos de Protección Independientes (IPL) deben cumplir con varios criterios clave para su inclusión. En primer lugar, deben demostrar independencia entre sí, aunque no necesariamente respecto al Sistema Básico de Control (BPCS) Esto implica que un IPL puede estar asociado al BPCS, pero debe ser independiente de otros sistemas de protección para ser considerado como tal. Además, deben ser auditables de manera clara y su capacidad, eficiencia e integridad deben ser demostrables sin lugar a duda.

Asimismo, cada IPL debe ser diseñado específicamente para proporcionar protección contra uno o más eventos peligrosos específicos o sus causas, y debe ser capaz de reducir el riesgo en un rango entre  $10^{-1}$  y  $10^{-2}$  para calificar como tal (Rashid et al., 2023) Sin embargo, se puede solicitar una reducción superior, siempre que se demuestre que el IPL cumple con esa reducción. Además, deben poseer un alto grado de disponibilidad, es decir, deben ser capaces de funcionar cuando se les demande, y deben ser confiables. Esto implica que deben ser probados, inspeccionados y mantenidos periódicamente para garantizar su operabilidad.

**d) Control del Riesgo (Risk Control)**

Este proceso de toma de decisiones para gestionar y/o reducir los riesgos implica una serie de pasos que incluyen la implantación y la reevaluación periódica, utilizando los resultados de un análisis de riesgos como fuente de información, según Čepin (2011)

**e) Criterio de Tolerancia de Riesgos (Risk Tolerability Criterion)**

Los criterios utilizados para expresar un nivel de riesgo considerado tolerable para una actividad de interés son determinados por la UE y se basan en el

análisis de riesgos, como señalan Roberts et al. (1981) Estos criterios de tolerancia de riesgos actúan como punto de partida para una posterior reducción del riesgo según el principio de ALARP (As Low As Reasonably Practicable, tan bajo como sea razonablemente posible). Dichos criterios pueden ser cualitativos o cuantitativos, dependiendo de la naturaleza de la actividad y la información disponible.

**f) Daño (Harm)**

Una lesión física o afectación a la salud, propiedad o ambiente se refiere a cualquier daño o perjuicio causado a la integridad física de una persona, a la salud, a la propiedad o al medio ambiente, como se describe en Čepin (2011)

**g) Dosis**

Hace referencia a la cantidad de una sustancia o agente que se ha absorbido, inhalado o ingerido por un organismo en un período de tiempo específico (Gómez, 2012) Se expresa típicamente como la concentración integrada en un tiempo determinado.

**h) Dosis Equivalente**

La dosis de los diferentes tipos de efecto, como la radiación térmica, la sobrepresión y la toxicidad, que representan el mismo grado de peligrosidad, se debe seleccionar de manera equitativa para permitir una comparación significativa entre ellos, según Belizón (2012) Este concepto es crucial, porque la comparación directa entre los diferentes tipos de daño puede resultar difícil debido a las diferencias inherentes en sus características y efectos. Se deben elegir dosis equivalentes para los diversos materiales y diferentes tipos de peligro, de modo que el grado de peligrosidad sea similar para todos los efectos (Gómez, 2012) Siempre que esta selección se realice de manera razonable, las diversas contribuciones al riesgo para los distintos tipos de peligro se pueden integrar en un riesgo total y tratarlos como una sola entidad coherente.

**i) Ecuación Probit**

Esta constituye una herramienta estadística empleada para modelar la relación entre la probabilidad de fatalidad y la dosis de un riesgo específico, como la sobre – presión, la radiación térmica o la toxicidad (Soto – Zazueta & Figueroa – Elenes, 2018). Esta ecuación se utiliza comúnmente en toxicología y evaluación

de riesgos para estimar la relación entre la dosis de un agente y la probabilidad de un efecto específico, como la muerte. Ayuda a cuantificar la respuesta biológica a diferentes niveles de exposición a un agente peligroso y puede ser útil en la evaluación de riesgos, así como en la toma de decisiones relacionadas con la seguridad.

**j) Estudio de Peligros y Operabilidad (Hazard and Operability Studies (HAZOP))**

El Estudio de Peligros y Operabilidad (HAZOP, Hazard and Operability Studies) es un método cualitativo y sistemático utilizado para identificar y evaluar los peligros y problemas operacionales de un proceso, según lo descrito por Belizón (2012). Este enfoque implica el uso de una serie de palabras guía predefinidas para examinar posibles desviaciones de las condiciones normales de operación del proceso. Durante un estudio HAZOP, un equipo multidisciplinario analiza sistemáticamente cada aspecto del proceso y considera cómo podrían surgir situaciones peligrosas o problemas operacionales (Pitt, 1994). El objetivo es identificar y mitigar cualquier riesgo potencial antes de que pueda causar daños a las personas, el medio ambiente o los activos de la empresa.

**k) Evento Iniciador**

Hace referencia al evento inicial de una secuencia de sucesos, que podría desembocar en un accidente con resultados no deseados, a menos que intervengan sistemas de protección o acciones del operador para evitarlo o reducir sus efectos, es conocido como el evento iniciador (Antor et al., 2014) Este evento marca el comienzo de una cadena de sucesos que podrían llevar a situaciones peligrosas si no se controlan adecuadamente. La detección temprana y la respuesta efectiva a este evento iniciador son fundamentales para prevenir accidentes graves y proteger la seguridad de las personas y los activos (Antor et al., 2014)

**l) Identificación de Peligros (Hazard Identification (HAZID))**

La Identificación de Peligros (HAZID, por sus siglas en inglés: Hazard Identification) es un método cualitativo que se utiliza para identificar posibles secuencias de accidentes, así como para identificar peligros, consecuencias y algunas posibles vías de reducción del riesgo asociadas (Notermans & Teunis,

1996). Este enfoque implica un examen minucioso de las posibles desviaciones con respecto a la intención de diseño, construcción, modificación y operación de un sistema o proceso. Durante una sesión de HAZID, un equipo multidisciplinario revisa sistemáticamente cada aspecto del sistema o proceso, identificando y evaluando cualquier situación que pueda dar lugar a un accidente o incidente no deseado (Notermans & Teunis, 1996) El objetivo principal es anticipar y mitigar los riesgos antes de que se conviertan en problemas reales, lo que contribuye a mejorar la seguridad y proteger los activos y recursos.

#### **m) Incidente**

Un evento imprevisto y no deseado el cual interrumpe o perturba el curso normal de una actividad, pero que no resulta en consecuencias significativas., se puede denominar como un contratiempo o contrariedad (Jaimes, 2015) Es una situación inesperada que puede generar una pausa o interrupción temporal en el flujo normal de las actividades, pero no causa daños ni pérdidas significativas.

#### **n) Peligro (Hazard)**

Una fuente con el potencial de causar daño, o una situación que podría dar lugar a daños, se refiere a cualquier elemento, circunstancia o condición que podría causar perjuicio, lesión o impacto negativo en personas, bienes o el medio ambiente. Es una entidad que, si no se gestiona adecuadamente, tiene la capacidad de provocar accidentes, incidentes o eventos no deseados. Identificar y abordar estas fuentes potenciales de daño es fundamental para prevenir riesgos y garantizar la seguridad en diversas actividades y entornos (Jaimes, 2015)

#### **o) Probabilidad de Falla en Demanda (Probability of Failure on Demand (PFD))**

La Probabilidad de Falla en Demanda (PFD, por sus siglas en inglés: Probability of Failure on Demand) se refiere a la probabilidad de que un Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) falle al responder a una demanda o a una iniciación manual. También se conoce como Fracción de Tiempo Muerto (FDT) (Liu, 2014) Esta medida es crucial en la evaluación de la confiabilidad de un sistema de seguridad, porque indica la probabilidad de que el SIS no cumpla su función cuando se le solicite, lo que podría resultar en un evento peligroso o una

situación de riesgo no mitigado. Un PFD bajo es deseable para garantizar la efectividad y la confiabilidad del SIS en la gestión de riesgos.

**p) Probit**

En el contexto de los modelos de estimación de daños causados por los peligros, el Probit se refiere a una variable con una media de 5 y una varianza de 1, según lo descrito por Gorsky et al. (2000) Este término se utiliza para representar una medida estadística que se emplea para cuantificar la respuesta biológica o el impacto de los peligros en una población o en un sistema específico. El método Probit se emplea ampliamente en la evaluación de riesgos y para estimar los impactos de los peligros en la salud humana, el medio ambiente o los activos.

**q) Riesgo (Risk)**

La combinación de la frecuencia de ocurrencia y las consecuencias de un evento peligroso específico es fundamental para evaluar adecuadamente su riesgo (Liu, 2014)

**r) Riesgo Individual (Individual Risk)**

El Riesgo Individual (Individual Risk) se define como la frecuencia con la que se espera que un individuo pueda estar expuesto a un nivel de daño específico debido a la manifestación de un peligro (Liu, 2014) Esta medida cuantifica las probabilidades de que un individuo pueda sufrir un determinado grado de daño como resultado de la exposición a una situación peligrosa o a un evento riesgoso. El riesgo individual se calcula considerando factores como la probabilidad de ocurrencia del evento peligroso y la vulnerabilidad del individuo expuesto, y es fundamental en la evaluación y gestión de riesgos para garantizar la seguridad a la vez que el bienestar de las personas.

**s) Riesgo Residual (Residual Risk)**

Hace referencia al nivel de riesgo que persiste una vez que se han aplicado todas las medidas de control para mitigar los peligros asociados a ese riesgo específico (Notermans & Teunis, 1996). Este riesgo residual persiste incluso después de que se hayan identificado, cuantificado y analizado los peligros, y después de que se hayan comunicado a todos los niveles pertinentes de la organización. Además, el riesgo residual es aceptado después de una evaluación adecuada de los riesgos, lo que implica que se ha considerado la eficacia de las medidas de

control implementadas y se ha determinado que el riesgo restante es aceptable en relación con los objetivos de seguridad y las tolerancias al riesgo establecidas.

**t) Riesgo Social (Societal Risk)**

Hace referencia a la relación entre la frecuencia y la cantidad de personas que pueden estar expuestas a un nivel de daño especificado en una población determinada, debido a la manifestación de un peligro específico (Notermans & Teunis, 1996). Este concepto considera tanto las probabilidades de ocurrencia de un evento peligroso como la cantidad de personas que podrían llegar a verse afectadas por dicho evento. El riesgo social es una medida importante en la evaluación y gestión de riesgos, porque ayuda a comprender el impacto potencial de los peligros en la sociedad en su conjunto, y permite tomar decisiones informadas para mitigar estos riesgos y proteger la seguridad y el bienestar de la población.

**u) Riesgo Tolerable (Tolerable Risk)**

El Riesgo Tolerable (Tolerable Risk) se refiere al nivel de riesgo que ha sido reducido a un punto en el cual es considerado aceptable por las partes interesadas involucradas (Jaimes, 2015) Este nivel de riesgo tolerable es alcanzado después de implementar medidas de control y mitigación adecuadas para reducir los peligros a un nivel aceptable para las personas, el medio ambiente, o los activos involucrados. El riesgo tolerable es determinado mediante una evaluación y valoración cuidadosa de los riesgos, considerando factores como los objetivos de seguridad, las normativas, a la vez que estándares aplicables, así como las percepciones y tolerancias al riesgo de las partes interesadas. Una vez que el riesgo ha sido reducido a un nivel tolerable, se considera aceptable y se puede proceder con las actividades planificadas (Notermans & Teunis, 1996)

**v) Seguridad (safety)**

La Seguridad (Safety) se refiere a la condición en la cual existe la ausencia de riesgos intolerables (Jaimes, 2015) En otras palabras, se trata de un estado en el cual los peligros y riesgos se han reducido a niveles aceptables o tolerables, lo que permite proteger la vida, la salud y el bienestar de las personas, así como los activos y el medio ambiente. La seguridad se logra mediante la identificación,

evaluación y gestión efectiva de los riesgos, así como a través de la implementación de medidas de control y mitigación adecuadas. Al alcanzar este estado, se promueve un entorno libre de peligros significativos, donde se pueden llevar a cabo las actividades sin riesgos para las personas o el entorno circundante.

**w) Sistema Básico de Control del Proceso (Basic Process Control System (BPCS))**

Es un sistema diseñado para reaccionar ante las señales provenientes del proceso, su equipo correspondiente, otros sistemas programables y/o las acciones del operador (Liu, 2014) Este sistema genera señales de respuesta que controlan el funcionamiento del proceso y su equipo asociado según lo planificado. Sin embargo, es importante destacar que el BPCS no cumple con ninguna función específica de seguridad instrumentada con un nivel de integridad de seguridad (SIL) igual o superior a SIL 1 En otras palabras, aunque el BPCS desempeña un papel crucial en la operación y control del proceso, no se considera un sistema de seguridad funcionalmente independiente y no está diseñado para proporcionar una protección específica contra riesgos o peligros (Jaimes, 2015)

**x) Sistema Instrumentado de Seguridad (Safety Instrumented System (SIS))**

Hace referencia a un sistema empleado para implementar una o más Funciones de Seguridad (Liu, 2014). Un SIS está compuesto por una combinación de componentes, que incluyen uno o más transmisores para detectar condiciones peligrosas, un procesador de lógica para evaluar y procesar la información recibida, y uno o más elementos finales de control para tomar medidas correctivas o preventivas en caso de que se detecte un peligro. Estos elementos finales pueden ser válvulas de cierre, activadores de alarmas, entre otros dispositivos. El propósito principal de un SIS es reducir o mitigar los riesgos asociados a peligros específicos en un proceso industrial, ayudando a prevenir accidentes graves o situaciones peligrosas.

#### **y) Sistema de Parada de Emergencia (Emergency Shutdown (ESD) System)**

Es un sistema compuesto por una serie de componentes, que incluyen válvulas, tuberías, sensores, actuadores y procesadores de lógica (Soto-Zazueta & Figueroa-Elenes, 2018) Su función principal es llevar el proceso, o un equipo específico del proceso, a un estado seguro en situaciones de emergencia. Esto se logra mediante la activación del sistema, que puede detener, aislar, desenergizar o despresurizar una planta, tren o unidad de proceso en respuesta a condiciones peligrosas o eventos críticos. El ESD System se activa automáticamente o manualmente en caso de emergencia para evitar daños a las personas, el equipo o el medio ambiente, y para prevenir accidentes graves o situaciones peligrosas en la instalación industrial.

#### **z) Tan Bajo como Razonablemente Posible (As Low As Reasonably Practicable (ALARP))**

El concepto se refiere a alcanzar un nivel de riesgo que haya sido reducido de manera sistemática y documentada hasta un punto en el cual no sea factible identificar ninguna medida adicional de reducción que sea económicamente viable (Jaimes, 2015) En otras palabras, implica tomar todas las medidas razonables para reducir el riesgo a un nivel tan bajo como sea posible, considerando tanto los beneficios de reducción del riesgo como los costos asociados con la implementación de medidas adicionales de mitigación. El objetivo es encontrar un equilibrio entre la prevención de accidentes y la viabilidad económica, asegurando que el riesgo residual sea aceptable y esté en línea con los estándares de seguridad y las mejores prácticas de la industria.

### **2.1.8. Metodologías para Sintetizar Frecuencias**

Para el desarrollo de los estudios de ACR se utilizan fundamentalmente 2 metodologías para determinar las frecuencias de los eventos peligrosos.

#### **a) Árbol de Fallas**

Se trata de una técnica deductiva que se enfoca en un evento o accidente específico, elaborando un diagrama lógico que incluye todas las secuencias posibles de acontecimientos, tanto mecánicos como humanos, que podrían desencadenar dicho accidente (Čepin, 2011). El árbol de fallas, utilizado como

una herramienta cualitativa, resulta útil porque desglosa el accidente hasta llegar a la falla básica y a los errores que la causaron. Además, permite al analista determinar los efectos de cambiar o añadir componentes al sistema, como instalar alarmas de alto nivel, independientes y redundantes o de cierre (Leu y Chang, 2015)

A continuación, se describen los componentes de la técnica del análisis de árbol de fallas y sus respectivas aplicaciones (Leu y Chang, 2015) Este enfoque se emplea para identificar las posibles rutas de fallas en equipos y errores humanos que podrían desencadenar un accidente. Es útil en diversas etapas, como el diseño, modificaciones y operación, especialmente en procesos nuevos donde no existe historial operativo.

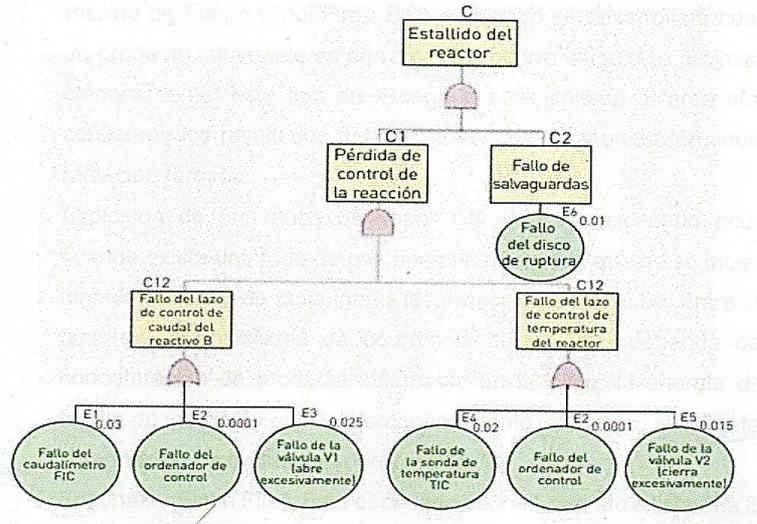
Los resultados del análisis se representan mediante diagramas lógicos que muestran las fallas y errores que pueden provocar un accidente, pudiendo ser cuantificados si se conocen la frecuencia y probabilidad de los eventos (Shi et al., 2014). Para realizar este análisis, se requiere información como diagramas de instrumentación y tuberías (P&ID), diagramas de flujo (PFD), especificaciones de equipos y comprensión de los procedimientos operativos.

Los pasos para construir el árbol de fallas implican definir el evento principal, elaborar el árbol de demandas identificando todas las posibles causas, integrar estas causas con las fallas del sistema de protección, y asignar frecuencias y probabilidades a cada causa y falla respectivamente (Roberts et al., 1981) Se utilizan compuertas lógicas "Y" y "O" para simplificar el árbol de fallas, donde "Y" indica que los eventos deben ocurrir simultáneamente y "O" que pueden ocurrir de manera independiente.

La cuantificación del árbol de fallas consiste en asignar valores numéricos a las entradas y procesarlos matemáticamente para obtener la frecuencia del evento principal (Virtanen et al., 2006) Esto se basa en la frecuencia y probabilidad de ocurrencia de los eventos, donde la frecuencia se define como el número total de eventos ocurridos en un período de tiempo dado y la probabilidad como una relación entre cero y la unidad.

La **Figura 3 (Ver pag N° 24)** presenta un ejemplo de un árbol de fallas desarrollado para el estallido de un reactor.

**FIGURA 3**  
**ÁRBOL DE FALLAS**



Trujillo (2017)

### b) **Árbol de Eventos**

El Árbol de Eventos es una herramienta que traza las secuencias de eventos a partir de un evento inicial hasta un escenario de accidente, vinculando las fallas en equipos con los errores humanos (Shi et al., 2014) Un evento se conceptualiza como un suceso que incide en el funcionamiento de un equipo, una acción llevada a cabo por un individuo, o la intervención de un agente externo al sistema, desviando su funcionamiento normal. Representado gráficamente de manera binaria y lógica, este modelo identifica y cuantifica los posibles escenarios que surgen tras la ocurrencia de un evento inicial.

Proporciona una cobertura metódica y sistemática de la secuencia de propagación del accidente, abarcando acciones de sistemas de protección, así como funciones habituales de la planta, entre otros aspectos relevantes. Los tipos de escenarios de accidentes identificados mediante esta metodología incluyen el Jet Fire, que implica una ignición inmediata de una fuga de gas o vapor inflamable, y el Pool Fire, que se produce cuando un material inflamable se derrama y luego se enciende, representan escenarios de accidentes distintos con riesgos específicos, generalmente confinado al área del derrame y con efectos expresados en términos de radiación térmica (Virtanen et al., 2006)

Otro escenario es La Explosión de una nube de vapor (VCE) es otro escenario que se presenta cuando hay una fuga de gas o vapor inflamable que no se enciende inmediatamente, lo que conduce a la formación de una nube. La posibilidad de que ocurra un VCE está determinada por varios factores, incluida la concentración del producto inflamable, la energía de la fuente de ignición y el grado de confinamiento. El principal efecto de este tipo de explosión es la generación de ondas de sobrepresión.

El Fogonazo (Flash Fire) se presenta cuando hay una fuga de gas o vapor inflamable que no se incendia inmediatamente, creando una nube de gas que se enciende sin llegar a explotar, debido a condiciones insuficientes para una explosión (Lindhe et al., 2009) Los efectos se evalúan en función de la radiación térmica, limitada por el límite inferior de inflamabilidad del gas.

Finalmente, la Nube Tóxica se produce por una fuga de un producto tóxico, como el H<sub>2</sub>S, alcanzando niveles de concentración que pueden amenazar la salud de las personas expuestas.

El árbol de Evento se emplea tanto en la etapa de operación para evaluar las posibles consecuencias de fallos de equipos, como en la etapa de diseño para explorar los posibles accidentes que podrían surgir como resultado de un evento iniciador (Roberts et al., 1981)

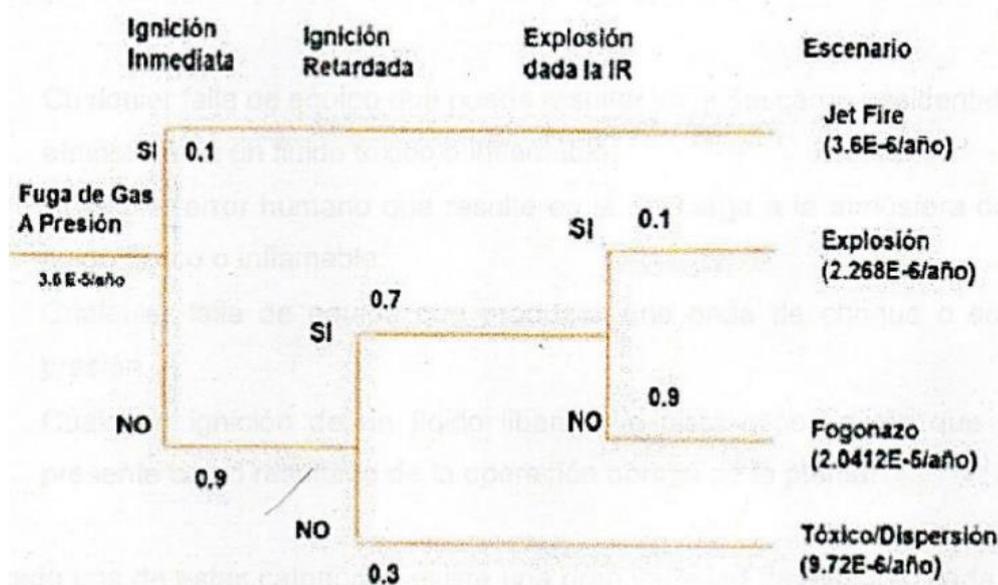
Cada rama del árbol representa un escenario distinto. El proceso de desarrollo de un árbol de eventos, según lo descrito por Čepin (2011), implica varios pasos esenciales. En primer lugar, se identifica el evento iniciador, que puede ser la liberación de un material peligroso debido a la ruptura de una tubería, entre otras causas. Después, se procede a identificar las funciones de seguridad que tienen el potencial de interrumpir la secuencia desde el evento inicial hasta un escenario peligroso. Estas funciones pueden incluir sistemas de seguridad automáticos o alarmas diseñadas para alertar al operador en caso de cualquier anomalía.

A continuación, se elabora el árbol de eventos para todos los escenarios relevantes, analizando diversas alternativas para cada modificador hasta llegar al escenario final. Los escenarios se agrupan en categorías según sus consecuencias similares, y se estima la probabilidad de cada rama del árbol, asegurando que las probabilidades asociadas sumen uno para cada modificador.

Después, los escenarios se cuantifican calculando la frecuencia de cada uno. Esto se logra multiplicando la frecuencia del evento iniciador por la probabilidad condicional a lo largo del desarrollo del árbol de eventos.

Finalmente, se someten los escenarios a una revisión con sentido común y se contrastan con registros históricos para evitar resultados incorrectos o imprecisos debido a datos insuficientes. La Figura 4 refleja un ejemplo de un árbol de eventos.

**FIGURA 4**  
**ÁRBOL DE EVENTOS**



Mata (2019)

## 2.2. Descripción de las actividades desarrolladas

La ejecución de un estudio de Análisis de Riesgos (ACR) implica tener en cuenta varios elementos cruciales que influyen en los resultados obtenidos. Entre ellos, tres se destacan por su importancia: la identificación de peligros, la definición de escenarios y la selección de orificios (Lindhe et al., 2009)

### 2.2.1. Identificación de Peligros

Los peligros relevantes en el análisis de riesgos para plantas de procesamiento se clasifican en varias categorías (Mahmood et al., 2013) En primer lugar, se consideran las fallas de equipos que podrían provocar la liberación accidental a

la atmósfera de sustancias tóxicas o inflamables. En segundo lugar, se incluyen los errores humanos que podrían resultar en una descarga similar. Además, se abordan las fallas de equipos que pueden generar ondas de choque o sobrepresión, así como cualquier ignición de fluidos liberados o piscinas de líquido como consecuencia de la operación normal de la planta.

Cada una de estas categorías engloba una amplia gama de eventos, cada uno con su propia frecuencia de ocurrencia y consecuencias. Por ejemplo, en el caso de las fallas de equipos que pueden resultar en la descarga accidental de sustancias tóxicas o inflamables, algunos de los eventos que podrían desencadenar este peligro incluyen la ruptura de una tubería, el fallo de un sello en una bomba o compresor, la apertura no deseada de un dispositivo de alivio de presión, la falla de un recipiente, el escape de un quemador en frío, el fallo de una empaquetadura, la fuga a través del vástago de una válvula, y el fallo en el cuerpo de una válvula, bomba, filtro, u otros dispositivos (Roberts et al., 1981).

### **2.2.2. Definición de Escenarios de Accidentes**

Existen numerosos accidentes que pueden surgir como consecuencia de la liberación accidental de materiales peligrosos en la atmósfera. Esta liberación inicial puede manifestarse en forma de gas, una liberación en dos fases, un líquido, o incluso puede originarse a partir de un evento explosivo, tal como se ilustra en la **Figura 5 (Ver pag N° 28)**

Las descargas de gas comienzan típicamente con un chorro de alta velocidad que gradualmente disminuye en velocidad y concentración a medida que se mezcla con el aire circundante (Lindhe et al., 2009) Se considera que el chorro termina cuando su velocidad es inferior a la del viento. Una vez que cesa el chorro de gas, éste se dispersa y se diluye con el viento debido a la mezcla turbulenta con la atmósfera.

Las descargas en dos fases pueden involucrar una combinación de gas y líquido, como podría ser el caso del petróleo y el gas natural durante un reventón de un pozo (Roberts et al., 1981) Esto genera una dispersión de gas y gotas de líquido. Estas gotas pueden dispersarse en forma de rocío o pueden acumularse para formar una piscina. En el caso de una descarga de gas licuado, almacenado a una temperatura superior a su punto de ebullición, parte o todo el líquido se

evaporará repentinamente, lo que provocará una disminución brusca de la temperatura hasta el punto de ebullición del líquido. Cualquier líquido que no se evapore por completo formará finas gotas que generalmente se dispersarán como rocío.

**FIGURA 5**  
**ETAPAS DE LOS ESTADOS DE UN ACCIDENTE**



Mata (2019)

El gas y cualquier rocío se dispersan inicialmente como un chorro y luego como una nube. Si una nube de gas inflamable se enciende, puede dar lugar a un fognazo (flash fire) En entornos parcialmente confinados o con congestión, como tuberías y recipientes, la turbulencia puede provocar una explosión que genere sobrepresiones significativas, conocida como explosión de nube de vapor (VCE)

Los accidentes con materiales peligrosos pueden originarse tanto fuera como dentro de recipientes. Las explosiones debido a reacciones fuera de control y las explosiones dentro de los tanques son dos tipos principales. Se requieren modelos para simular estos fenómenos. Un enfoque completo incluiría vincular modelos individuales para la descarga, dispersión, y en caso necesario, fuego y explosión, para obtener un modelo físico completo.

Un análisis cuantitativo de riesgos exhaustivo debe considerar todos los posibles eventos peligrosos en la instalación bajo estudio. Estos eventos pueden

enumerarse sin la necesidad de métodos de identificación de peligros complejos. A continuación, se presenta un resumen de los escenarios que pueden surgir después de una fuga, basado en la **Figura 5 (Ver pag N° 28)**

#### **a) Incendio**

Combustión de los fluidos derramados o liberados. El daño asociado con los incendios puede evaluarse sobre la base de la dosis de radiación recibida (Mahmood et al., 2013) Una medida de la dosis recibida es la energía por unidad de área de la superficie expuesta a la radiación y el tiempo de exposición. Los incendios pueden manifestarse de cuatro formas distintas: a través de una piscina incendiada conocida como "Pool Fire", una bola de fuego denominada "Fireball", un chorro de fuego llamado "Jet Fire" y un fogonazo conocido como "Flash Fire".

#### **b) Explosión**

Las explosiones son eventos que se distinguen por la generación de una presión intensa (en sistemas confinados) o una onda de sobrepresión que resulta en daños mecánicos significativos (Virtanen et al., 2006) Para los gases licuados, los fenómenos incluyen la Explosión de Vapores de Líquidos en Ebullición (BLEVE, por sus siglas en inglés) y la Válvula de Control de Emergencia (VCE)

#### **c) Dispersión tóxica**

Los efectos que las sustancias tóxicas tienen sobre los humanos cubren un amplio rango debido a que hay muchos tipos diferentes de toxicidad y muchos órganos del cuerpo que responden y pueden ser afectados de forma diferente (Baskoro et al., 2021)

### **2.2.3. Orificios de Fuga**

No hay un consenso establecido sobre qué orificios de fuga utilizar en un Análisis Cuantitativo de Riesgos, y diversas metodologías se emplean para analizar las rupturas en tuberías. Algunos analistas optan por utilizar orificios de 2" y 4" para tuberías pequeñas, siguiendo la propuesta de HSE en 1989. Otros prefieren un enfoque más amplio, utilizando orificios de 0,2"; 1"; 2"; 4" y 6", y para tuberías menores de 6", consideran una ruptura total, según lo sugerido por Casal en 2002 Por otro lado, hay quienes proponen un procedimiento más detallado, como Wiley en 2016, que incluye el uso de rupturas de 5 mm y ruptura total para

tuberías con diámetros entre 2” y 6”, y rupturas de 5 mm, 25 mm, 100 mm y ruptura total para tuberías con diámetros entre 8” y 12”. En el caso de las bombas, se consideran fugas por los sellos, utilizando orificios de 5 mm, 25 mm y 100 mm, en función del diámetro de las tuberías tanto en la succión como en la descarga.

Una vez que los escenarios han sido definidos, se avanza hacia la estimación de los riesgos y la adopción de una unidad común de medida para las diferentes consecuencias posibles, sea muerte, lesión o pérdidas económicas. La complejidad de comparar distintos tipos de efectos ha promovido el uso prevalente de las fatalidades (pérdidas humanas) como el principal criterio de comparación, lo que conlleva a la definición de criterios de daño.

#### **2.2.4. Criterios de Daño**

Para obtener resultados significativos al emplear el método de Análisis Cuantitativo de Riesgos, es esencial evaluar las consecuencias derivadas de posibles accidentes. Para llevar a cabo esta evaluación, se establecen criterios de daño que aborden efectos asociados con productos tóxicos, incendios y explosiones que podrían surgir de los diferentes escenarios de accidentes.

Uno de los métodos utilizados para evaluar las consecuencias o efectos de un accidente es el modelo de efecto directo, el cual pronostica los impactos en personas o estructuras utilizando criterios previamente establecidos. Por ejemplo, al evaluar los efectos en seres humanos, las consecuencias pueden ser cuantificadas en términos de fatalidades o lesiones. Por otro lado, al evaluar los daños a las estructuras, las consecuencias pueden manifestarse en forma de pérdidas económicas.

El uso de la “Dosis de Daño Equivalente” representa grados de peligros similares para los efectos de radiación, sobrepresión y tóxicos. Las dosis de daño equivalente se obtienen a través de relaciones probabilísticas de afectación llamadas “Ecuaciones Probit”, las cuales representan una correlación entre la probabilidad de fatalidad y la dosis de un peligro particular (sobre – presión, radiación térmica, toxicidad)

#### **d) Ecuaciones Probit**

Las ecuaciones Probit fueron inicialmente concebidas para determinar la proporción de especímenes de pruebas de laboratorio que fallecerían debido a diferentes dosis de biocida (HSE, 1989) Su aplicación en humanos se basa en la extrapolación de datos experimentales sobre la respuesta a diversas dosis y en la evaluación de accidentes previos para calcular la tasa de fatalidades esperadas para una población promedio expuesta al peligro. Estas ecuaciones presuponen que todos los individuos tienen la misma probabilidad de ser gravemente afectados por una dosis específica, y que esta probabilidad es equivalente a la proporción de muertes en una población grande expuesta.

Para considerar sensibilidades especiales a la exposición, como la de preescolares o pacientes hospitalarios, se incorporan ajustes en etapas posteriores del procedimiento de evaluación. A continuación, se presentan las ecuaciones Probit específicas para los efectos derivados de la radiación térmica, la sobrepresión y la toxicidad, las cuales serán empleadas en el caso concreto.

#### **e) Radiación Térmica**

Los efectos fisiológicos de las radiaciones térmicas en los seres humanos están determinados por la velocidad a la que el calor se transfiere de la fuente emisora a la persona y la duración de la exposición al mismo. Exposiciones breves a niveles elevados de radiación pueden tener consecuencias mortales. Tal es el caso para personas que se encuentren dentro de una nube de vapor inflamable cuando esta es incendiada produciendo un fogonazo (flash fire) Por el contrario, las personas que se encuentren fuera de la nube de vapor estarán expuestas a niveles de radiación térmica mucho más bajos. Si las personas se encuentran alejadas de los límites que definen la nube inflamable, el flujo de calor no será suficiente para causar daños fatales, independientemente del tiempo de exposición. Las personas que estén próximas a la nube, pero no dentro de ésta, podrán tomar acciones para protegerse del peligro alejándose rápidamente del frente de llama, buscando refugio dentro de estructuras o protección detrás de obstáculos sólidos.

En el caso de llamas continuas, como las presentes en Chorros de Fuego o las Piscinas de Líquido Incendiada, los niveles de radiación que pueden causar daño

a las personas expuestas deben ser definidos en función del tiempo de exposición. Las personas expuestas a los efectos de radiación son conscientes del peligro y casi instantáneamente saben en cual dirección moverse para disminuir la sensación de dolor.

Se han propuesto diversas ecuaciones Probit para cuantificar la afectación por radiación térmica. En este caso se presenta la ecuación desarrollada por Tsao y Perry (1979).

**FIGURA 6**  
**ECUACIÓN PROBIT RADIACIÓN TÉRMICA**

$$Pr = -12.8 + 2.56 \ln \left( \frac{tI^{4/3}}{10^4} \right)$$

Donde:

Pr = Probit

T = Tiempo de exposición (s)

I = Intensidad de radiación (W/m<sup>2</sup>)

Tsao y Perry (1979)

**TABLA 2**  
**TRANSFORMACIÓN DE PROBITS A % DE AFECTACIÓN**

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	---	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,87	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,62	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33

Crowl y Louva (1990)

Adicionalmente, la **Tabla 3 (Ver pag N° 33)** presenta los efectos para varios niveles de radiación. Es importante señalar que en la tabla se pueden distinguir

algunos de los niveles de radiación más usados en estudios de ACR, tales como 6; 12,5 y 37,5 kW/m<sup>2</sup>, las cuales se extraen del AICHE (2000)

**TABLA 3**  
**EFFECTOS DE LA RADIACIÓN TÉRMICA**

Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Efecto
1,58	Tolerable largo tiempo de exposición. Valor seguro de exposición (API 521)
4,73	Dolor a personal que no pueda protegerse después de 20 segundos, ampollas, quemaduras en 2do grado, probabilidad o fatalidad área interior, y 0,01 en área exterior.
9,50	Umbral del dolor en 6 segundos, quemaduras de 2 <sup>do</sup> grado después de 29 segundos.
12,50	Daños severos a materiales de bajo punto de fusión. Probabilidad de fatalidades de 0,5 en área exterior y 0,1 en área interior.
13,50	Daños a materiales con bajo punto de fusión. Separación entre tanques techo cónico.
25,00	Ignición de madera debido a exposición no piloteada.
37,50	Daños a equipos de proceso. Probabilidad de fatalidades 0,999

AICHE (2000)

#### **f) Sobrepresión**

Los efectos fisiológicos causados por la sobrepresión dependen del pico de sobrepresión al que es expuesta una persona. La exposición a altos niveles de sobrepresión pudiera ser fatal debido a daños en los pulmones rotura de los tímpanos o daños físicos causados por impactos con objetos en desplazamiento. Las personas localizadas lejos de la nube de vapor inflamable que explota estarán expuestas a niveles de sobrepresión bajos (Baskoro et al., 2021)

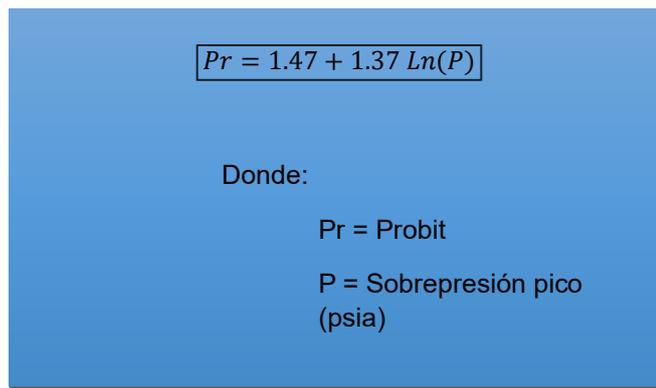
El nivel de afectación aumentará a medida que la persona se encuentre más cerca de la nube de vapor. Si la persona está suficientemente alejada de la nube, los efectos de la sobrepresión recibidos serán incapaces de causar daños fatales.

El nivel de sobrepresión necesarios para causar daño a personas es definido como una función del pico de sobrepresión. A diferencia de los peligros

asociados con fuego, las personas expuestas a sobrepresión por explosiones no tendrán tiempo para reaccionar o encontrar refugio. Por tal razón, el tiempo no es parámetro de las ecuaciones de Probit asociadas a niveles de daños por explosiones.

Para este caso, se sugiere el uso de la ecuación Probit presentada a continuación. Esta ecuación está basada en un estudio de los daños resultantes de diversos accidentes.

**FIGURA 7  
ECUACIÓN PROBIT, SOBREPRESIÓN**


$$Pr = 1.47 + 1.37 \ln(P)$$

Donde:

- Pr = Probit
- P = Sobrepresión pico (psia)

CCPS (1989)

Adicionalmente, la **Tabla 4 (Ver pag N° 35)** presenta efectos para varios niveles de sobrepresión. Es importante señalar que en la tabla se pueden distinguir algunos de los niveles de sobrepresión más usados en estudios de ACR, tales como 0,45; 2,2; 7,4 y 14,7 psig.

**TABLA 4**  
**EFFECTOS DE LA SOBREPRESIÓN**

Presión (psig)	Efecto
0,02	Ruido molesto (137 dB, baja frecuencia 10 — 15 Hz).
0,15	Presión típica para rotura de vidrios.
0,45	Daño estructural menor y limitado. Probabilidad de fatalidades en área exterior de 0 y 0,01 en áreas interiores.
2,20	Colapso parcial de viviendas. Probabilidad de fatalidades de 0,1
3,00	Acero estructural de edificios, distorsionado y sacado de las fundaciones.
5,00	Destrucción completa de viviendas.
7.40,	Daño estructural severo. Probabilidad de fatalidades en área exterior 0,31 y de 0,75 en área interior.
14,70	Destrucción total de edificios no protegidos. 0,99 probabilidad de fatalidades.

CCPS (1989)

### g) Toxicidad

La ecuación Probit para sustancias tóxicas se basa en una expresión logarítmica siguiente forma:

**FIGURA 8**  
**ECUACIÓN PROBIT, TOXICIDAD**

$$Pr = a + b \ln(C^n t)$$

Donde:

- Pr = Probit
- C = Concentración (ppm)
- t = Tiempo de exposición (min)
- a, b y n son constantes de letalidad para la ecuación Probit

CCPS (1989)

Las tres constantes a, b y n de la ecuación Probit se derivan de curvas con resultados experimentales. La **Tabla 5 (Ver pag N° 36)**, contiene los valores de estas constantes para varias sustancias tóxicas según TNO

**TABLA 5**  
**CONSTANTES DE PROBIT, TOXICIDAD**

<b>Sustancia</b>	<b>A</b>	<b>b</b>	<b>n</b>
Acroieina	-9,9315	2,0488	1,00
Ácido acrilonitrilo	-29,4224	3,0080	1,43
Amoniaco	-28,3300	2,2700	1,36
Tetracloruro de Carbono	-6,29000	0,4080	2,50
Cloro	-36,4500	3,1300	2,64
Ácido clorhídrico	-16,8500	2,0000	1,00
Cianuro de Hidrógeno	-29,4224	3,0080	1,43
Fluoruro de Hidrógeno	-25,8689	3,3545	1,00
Sulfuro de Hidrógeno	-31,4200	3,0080	1,43
Metil Bromuro	-56,8100	5,2700	1,00
Fosgeno	-19,2736	3,6861	1,00
Oxido de Propileno	-7,41500	0,5090	2,00
Dióxido de Azufre	-15,6700	2,1000	1,00
Tolueno	-6,79400	0,4080	2,50

CCPS (1989)

#### **h) Incertidumbre en el uso de Ecuaciones Probit**

Aunque las ecuaciones Probit son herramientas convenientes para el análisis de consecuencias y riesgos, es crucial tener en cuenta ciertas limitaciones al utilizarlas. En primer lugar, la mayoría de estas ecuaciones se basan en datos obtenidos de experimentos de respuesta/dosis realizadas en animales, lo que puede generar errores si se extrapolan a humanos de manera incorrecta, resultando en la existencia de varias ecuaciones Probit diferentes para un mismo peligro. Además, para sustancias altamente tóxicas, la falta de información experimental para exposiciones cortas (menos de 5 o 10 minutos) cuestiona la confiabilidad de las ecuaciones Probit en tales situaciones. Por último, la mayoría de los experimentos de respuesta/dosis exponen al sujeto a niveles fijos de peligro durante todo el tiempo de exposición, lo que limita la aplicabilidad de las ecuaciones Probit a casos donde se asume que la población está expuesta a un

nivel constante de peligro por un período de tiempo determinado. Sin embargo, durante los accidentes industriales, los peligros suelen variar con el tiempo, lo que requiere simplificaciones y suposiciones antes de aplicar las ecuaciones Probit.

Adicionalmente a estas limitaciones, hay otras consideraciones que se deben tener en cuenta por cualquiera que desee usar las ecuaciones Probit. Se debe estar pendiente de las unidades involucradas en cada ecuación Probit específica. Por ejemplo, algunas ecuaciones Probit usan partes por millón (ppm) en volumen como unidad de concentración; otras pueden usar miligramos por metro cúbico (mg/m).

Se han propuesto ecuaciones Probit para varios tipos de peligros diferentes investigadores y analistas. Es muy común que las ecuaciones originales de Probit sean nombradas y renombradas en diferentes artículos de literatura. Desafortunadamente, esta práctica ha resultado en varios errores en la compilación de ecuaciones Probit. Siempre es mejor obtener las ecuaciones Probit de su fuente original.

### **2.2.5. Estimación de Consecuencias**

Esta sección presenta los modelos de estimación de consecuencias (también llamados códigos). Estos modelos están concebidos dentro de un determinado rango de aplicabilidad y en consecuencia tienen una serie de limitaciones que deben ser consideradas.

#### **a) Ruptura de un Recipiente que contiene Gas Licuado**

Cuando una ruptura o un orificio grande (mayor que  $\frac{1}{10}$  del diámetro del recipiente) se origina en la pared de un recipiente que contenga gas licuado presurizado, la presión en el recipiente disminuye y el líquido está a más de unos 6°C por encima de su punto de ebullición a presión atmosférica, la ebullición es muy violenta. En este caso, el líquido es derramado hacia afuera como un rocío de gotitas y gas y se mezcla violentamente con el aire.

La evaporación inicial del gas depende de a qué el líquido ceda su calor, y de que la temperatura del líquido disminuya hasta el punto de ebullición, a menos que el líquido se evapore completamente, en cuyo caso la temperatura bajará hasta algún lugar entre la temperatura inicial y el punto de ebullición del líquido

a presión atmosférica. El volumen del gas que se evapora inicialmente de esta forma puede ser calculado usando el código FLASH

La mezcla de gas con aire hace que el aire se enfríe, porque cede el calor al líquido no evaporado. El resultado es una mezcla fría de aire, gas y rocío. La cantidad de aire que se mezcla en la nube es aproximadamente 10 veces el volumen inicial de gas evaporado. El grado de dilución se calcula utilizando el código BLOMUP

La mezcla resultante de gas y aire será más pesada que el aire circundante en casi todos los casos. Esto aplica incluso para un gas que generalmente es menor denso que el aire, porque la nube resultante es principalmente de aire frío y gas. Se proporciona un solo código para calcular este caso, HECATE6a si el gas es inflamable y se enciende este se quemará como un fogonazo (Flash Fire). Se ofrece dos formas de calcular este fenómeno, una se trata de un modelo de bola de fuego, VESTA2, el cual aplicará si el encendido es inmediato.

El otro modelo es uno más realista basado en la progresión de la llama a través de una nube de gas. Si el gas pasa a un área confinada o semiconfinada, como la caseta de un compresor o entre dos plataformas, la ignición de dicha nube de gas puede resultar en una explosión. Lo mismo podrá ocurrir si los gases pasan a espacios confinados, tales como alcantarillas o faldas de columnas de destilación o también si el gas pasa a un área con un alto grado de congestiónamiento, conteniendo recipientes y tuberías.

#### **b) Orificio en la parte de la Fase de Gas n Recipiente que contiene Gas Licuado**

Un orificio en la fase de gas de un recipiente que contiene gas licuado bajo presión, se comportará diferente al caso de la rotura descrita anteriormente sobre todo si el orificio tiene un tamaño menor que  $\frac{1}{20}$  de la sección transversal del recipiente, o si el orificio está en una tubería larga pegada al recipiente.

El código GASREL permite estimar la tasa inicial de descarga. Note que a medida que el gas es liberado, el líquido en el recipiente se evaporará para reemplazar el gas perdido, y como resultado se enfriará. Por lo tanto, la presión en el recipiente se reducirá. Requiriendo de esta manera de un buen juicio para

estimar la presión correcta para el cálculo del accidente. La tasa inicial de descarga será conservadora.

Una vez el gas sale del recipiente se forma un chorro. Para cualquier presión sobre 1,2 bar el chorro será turbulento. A medida que el chorro se aleja del recipiente se mezcla con el aire y se diluye. Se considera que el chorro ha terminado, bien cuando la velocidad del chorro disminuye hasta la velocidad del viento, o cuando la concentración del chorro cae hasta el límite que se ha fijado, ya sea el límite inferior de inflamabilidad para un gas inflamable, o el LC10 o el IDLH, por ejemplo, para un gas tóxico. La fase de chorro turbulento del escape puede ser calculada utilizando el código TUJET3 para escapes horizontales.

La temperatura del gas será baja, parcialmente debido al efecto Joule Thompson, pero sobre todo porque la evaporación del líquido en el recipiente va a causar un enfriamiento. La temperatura puede bajar por un período de tiempo hasta que llegue al punto de ebullición del gas licuado a presión atmosférica.

El código utilizado para hacer el cálculo del chorro es un programa de dispersión turbulenta del chorro. Este calcula la longitud del chorro, la concentración final, la densidad y el factor de dilución. Esto será necesario si el cálculo procede a la siguiente etapa. Si el chorro no termina antes que la concentración de gas haya disminuido hasta el límite de concentración deseado, el gas se dispersará como una nube. La forma de dispersión dependerá del gas involucrado.

Para gases livianos (en particular el amoníaco, metano e hidrógeno) el programa HPLUME proporciona un cálculo adecuado. Para los gases que son más pesados que el aire, tomando en cuenta la temperatura y el aire mezclado, se puede utilizar el código HECATEE6b para el cálculo de la nube pesada de gas, o de igual forma se pueden utilizar los códigos basados en los modelos de SLAB o DEGADIS

Si el gas es inflamable y se enciende, este puede ocasionar un fognazo (flash fire) o la explosión de una nube de vapor.

### **c) Fuga de la Fase Líquida de un recipiente que contiene Gas Licuado**

El efecto inmediato de este tipo de fuga es un flujo de líquido desde el recipiente. Este fenómeno es adecuadamente descrito y estimado por el código de liberación de líquido LIGREL, siempre y cuando la fuga sale directamente desde

el recipiente, o desde una tubería muy corta. Ahora bien, en el caso en que la fuga sea desde una tubería, se debe utilizar el código TWOPHASE, el cual describe y estima mejor las consecuencias de este caso. La tasa de flujo está regida por la presión en la superficie del líquido (la presión fi vapor de líquido a la presión en el recipiente), y la altura del líquido entre la superficie del líquido y el orificio.

El líquido se evaporará violentamente (flashing) luego de salir de la tubería, algo de líquido se convertirá en vapor, y el remanente se enfriará alcanzando el punto de ebullición del líquido a presión atmosférica, a menos que todo el líquido se evapore. El código FLASH calcula la proporción del líquido que se evapora.

Una vez que el líquido se ha evaporado lentamente (flashing), la velocidad se va a incrementar significativamente, en comparación con la velocidad inicial del líquido (el momento permanece constante, y por lo tanto la velocidad del líquido puede ser utilizada para el cálculo de dispersión del chorro). Si el chorro tiene una alta velocidad, y la cantidad de líquido comparada con la cantidad de gas es baja, el chorro dispersará el líquido restante en forma de rocío. Si el chorro contiene una relación de líquido a gas de más de 4 veces, entonces habrá una tendencia a que el líquido caiga como lluvia (rain out)

La cantidad de rocío y la densidad de la mezcla de aire y gas se reducirán por la proporción correspondiente a la cantidad de líquido. El factor de 4 veces la cantidad de gas es un poco alto, comparado con las observaciones y por lo tanto se considera conservador. Luego de dejar la tubería, la mezcla de gas y líquido se mezclará con el aire y se reducirá su concentración. La longitud del chorro y el grado de mezcla se pueden calcular utilizando un programa de dispersión de chorro turbulento y la dispersión subsiguiente es calculada utilizando un programa de nube pesada de gas.

#### **d) Escape de un Gas Presurizado**

La secuencia de los procesos físicos aquí es similar al de los gases licuados. Sin embargo, lo más probable es que el gas sea más liviano que el aire, porque está ausente el efecto de la evaporación. Habrá algo de refrigeración, debido al efecto de Joule Thompson. A medida que el gas es liberado, la presión se reduce en el recipiente, con lo cual será necesario repetir los cálculos para diferentes

presiones si la presión cae rápidamente, o de otra forma se puede utilizar el código VAPREL para calcular el perfil de presión vs tiempo, y el perfil de la tasa de descarga resultante.

#### **e) Escapa de un Gas Criogénico**

Dado que, en este caso en la gran mayoría de los casos, el gas que se libera está almacenado a una temperatura igual o inferior a su punto de ebullición, entonces no habrá una evaporación violenta (flashing) de inmediato cuando el líquido sea liberado. El líquido se va a extender como una piscina en el suelo y va a hervir a medida que absorba el calor del suelo. La tasa de descarga del líquido puede ser calculada utilizando el código de descarga de líquidos LIREL. La tasa de evaporación puede ser calculada mediante el código de liberación de criogénico llamado CRYOVAP. Para ello será necesario determinar el tamaño máximo de la piscina, si se forma, dependiendo de la presencia de paredes, muros, drenajes, etc., porque la tasa de evaporación depende del área total cubierta sobre el suelo. En una fase avanzada de la descarga aportación de calor por conducción del suelo deja de ser significativa, y la transferencia de calor por el viento y por la radiación solar se hace cada vez más importante porque el suelo se enfría.

La dispersión del gas puede ser calculada utilizando el código para nubes de gases livianos HPLUME (amoníaco, metano, hidrógeno) y para nubes de clases más pesados que el aire se puede usar el código HECATE6b. Se debe tener en cuenta que hay una pequeña mezcla inicial con aire en la superficie de la piscina de criogénico, de modo que el punto de partida para los cálculos de estas nubes es la liberación de gas no diluido (puro)

#### **f) Descarga de un Líquido Volátil**

Cuando un líquido volátil se descarga, este se esparce sobre el suelo hasta que se encuentra con una barrera que puede ser una zanja, una pared, un drenaje o desniveles en el suelo. En QRA Pro se presentan varios modelos, tanto para un derrame simple desde un contenedor (código SPLASH) para la formación de una piscina simple (código POOL), para una piscina incendiada (código FIREPOOL), y hasta para una piscina en expansión proveniente de una descarga continua (código SPREAD). El líquido se evaporará en proporción al calor transferido

desde la atmósfera y por la radiación solar. Un modelo más antiguo es proporcionado en el código SUTTON, así como uno más reciente en el código Mand M basado en el trabajo de MacKay y Matsugo.

La tasa de descarga se puede calcular utilizando el programa de descarga de líquidos. La propagación de líquido generalmente se determina juzgando la naturaleza de la superficie, pero para superficies lisas se utiliza el código de esparcimiento de líquidos. La tasa de evaporación se calcula a través del código de evaporación de piscina, y la dispersión utilizando el código de nube de gas pesada HECATE6b

#### **g) Descarga de un Líquido Sobrecalentado**

Los líquidos tales como hexano y gasolina que se encuentran por encima de su punto de ebullición (por ejemplo, durante su destilación o extracción), se comportarán de una manera muy parecida a los gases licuados. No obstante, hay que tener en cuenta el hecho de que, en estos casos, la temperatura se reduce al mezclarse con aire.

#### **h) Escape de un Líquido de una Tubería**

Para los escapes de líquido desde una tubería, el caudal inicial va a depender del tamaño del orificio. Para un orificio pequeño, la tasa de descarga se puede calcular basándose en la presión de la tubería, utilizando el módulo LIREL para escape de líquido. Para una ruptura total, la tasa de descarga es dada por la tasa de bombeo hasta que el bombeo se detenga. Después de estos, la tasa de descarga depende de la diferencia de altura entre el punto más alto en la tubería y el punto de ruptura. La tasa de descarga se puede calcular utilizando este valor en el código de descarga de tuberías HIREL.

#### **i) Escapes de Tuberías de Gases Licuados**

Para tuberías de gas licuado bajo presión y por encima del punto de ebullición de la fase líquida, el cálculo es extremadamente complejo. El código proporcionado se basa en el trabajo de Tam y es una forma empírica, basada en experimentos llevados a cabo con tubos de 100 m llenos de propano (código TAM)

Las condiciones iniciales del escape pueden ser calculadas utilizando el código de descarga en dos fases. Las etapas posteriores se pueden calcular siguiendo el procedimiento descrito anteriormente.

#### **j) Escape de una Tubería o Pozo de Gas**

Para el cálculo de la tasa de escape desde un pozo se utiliza el código BLOWOUT. Este código permite considerar dos tamaños de "casing". El código BLOWPIPE permite estimar descargas de tuberías simples de gas (se puede evaluar un solo diámetro de tubería). Los escapes de gas y dispersión subsiguientes se pueden calcular mediante el programa de dispersión de chorro turbulento y el HPLUME o los programas de nubes de gas pesado, dependiendo si el gas es liviano o pesado.

#### **k) Incendios de Gas y Explosiones**

Los cálculos descritos en las secciones previas se pueden usar para determinar los tamaños de las nubes de gas, nubes y piscinas de líquidos. Los resultados de estos se pueden usar más o menos directamente en los cálculos de incendio y explosiones. Para las nubes es necesario conocer la cantidad de gas en la nube, por encima del límite inferior de inflamabilidad. Esto se calcula a partir de la longitud de la pluma, velocidad del viento y la tasa de escape para plumas (escapes continuos), para el caso de nubes se considera %inventario total de gas (escapes instantáneos). Si la nube se incendia en la mayoría de los casos se produce un fogonazo o flash fire con la nube quemándose desde el punto de ignición hasta el punto de escape.

Si la nube se mezcla con aire y existe una cantidad significativa de gas por encima del límite inferior de inflamabilidad y si hay, bien sea una fuente de ignición de muy alta energía como una explosión o si hay congestión producida por tuberías y recipientes, el gas puede explotar como una VCE.

### III. APORTES REALIZADOS

Se aplicará los métodos de análisis cuantitativo de riesgos, o una instalación típica para la prueba de producción de un pozo de perforación, ubicada en la selva peruana.

#### 3.1. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos fueron revisados para determinar los valores representativos de la temperatura y la humedad relativa. La velocidad del viento y la clase de estabilidad también se examinaron para determinar la gama de condiciones que son posibles en el sitio, en la siguiente tabla se muestran los datos meteorológicos utilizados. Se consideran:

**TABLA 6**  
**CONDICIONES CLIMÁTICAS**

<b>Condiciones climáticas</b>	<b>Medida</b>
Temperatura media °C	25,9
HR (%)	89,8
Velocidad del viento máx. (m/s)	25
Dirección del viento (viene del)	NE

Estación meteorológica San Alejandro, departamento de Ucayali

#### 3.2. Descripción detallada de las áreas de procesos y servicios

##### 3.2.1. Colección y Separación

El fluido proveniente del pozo fluye y atraviesa la Emergency Shut Down Valve (ESDV–101), el caudal es controlado manualmente mediante el choke manifold (CM–101)

La válvula ESD aislará las instalaciones de superficie del pozo en caso de parada o situación de emergencia. Esta válvula puede abrirse o cerrarse localmente mediante un switch manual y podrá cerrarse en remoto mediante botoneras estratégicamente localizadas en distintos puntos de las facilidades. Adicionalmente, la válvula cerrará automáticamente por alto nivel del separador (LAH01/02)

El sistema de entrada del proceso está previsto de esperas por si fuera necesaria una inyección de químicos y/o agua de dilución. El fluido es procesado mediante una única etapa de separación trifásica (V-101) para poder cumplir con la especificación de RVP y contenido en agua. Sin embargo, debido a que existe incertidumbre en el comportamiento de la formación, se ha provisto de un separador adicional (V-102) que podría operar en serie con el V-101 en el caso de que fuera necesario para alcanzar la especificación del crudo en tanques. La presión del separador está controlada mediante la válvula de control PCV-001. El agua, siendo más pesado que el crudo, es separada en la parte baja del separador y el crudo queda en la superficie del agua. La interface agua crudo es controlada mediante las válvulas LCV-003 y LCV-004 que son actuadas a través de los switches de nivel del separador (LC-003 & LC-004). El agua de producción fluye del separador a través de la válvula de control de nivel (LCV-002) para ser llevado al tanque de agua (TR-5101) El agua pasa por un medidor de turbina (FE-003 o FE-004), donde el caudal queda registrado.

El crudo sale del separador a través de un medidor de turbina (FE-001 o FE-002), donde el caudal queda registrado y es llevado a uno de los tanques de crudo (TR-2101/02/03) Estos medidores están provistos de un medidor de reserva (backup) y de un sistema de calibración fijo (ST-101) que puede utilizarse indistintamente para cada uno de los medidores, tanto para los de agua como para los del crudo. El gas asociado al crudo, fluye a través del medidor de orificio Daniel Box (FM-002) y se lleva al sistema de antorcha para su quemado.

### **3.2.2. Almacenamiento**

El crudo que sale del separador es enviado al tanque de estabilización (TR-2101/02/03), donde se dejará en reposo durante aproximadamente seis (6) horas.

Una vez pasado el tiempo de estabilización, se toma una muestra para verificar la especificación del crudo. A continuación, se mide el volumen mediante inmersión de cinta (medición “wincha” o “dipping”) según procedimiento de fiscalización para luego poder proceder al trasegado del crudo mediante la bomba centrífuga (P-101/P-102)

El protocolo de movimiento de tanques fijado por CEPESA indica que, de los tres (3) tanques, uno siempre estará llenándose con el crudo que sale del separador, otro estará en estabilización, y el tercero estará descargando a los camiones cisternas. De forma que un tanque nunca estará llenándose y descargando a las cisternas al mismo tiempo.

Los tres tanques de almacenamiento de crudo cuentan con una alarma sonora por alto nivel (LAH005/006/007) que se activa cuando el nivel alcanza 80% de la altura total para evitar el desbordamiento del tanque. De esta forma, el operador podrá parar la operación de llenado de tanques y cerrar el pozo activando una de las estaciones de parada de emergencia hasta que se restablezca la capacidad operativa de almacenamiento de los tanques. La salida de gas de los tanques es recogida en un colector común para enviarlo al sistema de antorcha. Cada línea de salida de gas estará provista por un arrestador de llama. El agua que fluye del separador se envía al tanque de agua (TR-5101) de 1 500 Bbls de capacidad. Al igual que los tanques de crudo, el tanque de almacenamiento de agua cuenta con una alarma de alto nivel (LAH-004) para que el operador pueda cerrar el pozo activando una de las estaciones de parada de emergencia hasta que se restablezca la capacidad operativa de almacenamiento de los tanques. El agua de producción es almacenada para su posterior medición, bombeo (P-103/104) y despacho en camiones cisterna. En caso de requerirse un drenaje de los tanques de almacenamiento de crudo, estos pueden ser drenados a través de una línea de 2", instalada en cada uno de los tanques para este fin.

Existe también un tanque de 500 bbl de capacidad (TR-5102), el cual estará disponible en caso de que se requiera mayor capacidad de almacenaje de agua o para drenajes de tanques. Adicionalmente el tanque TR-5101 está diseñado para un doble servicio, es decir, en caso de que no hubiera agua de producción asociado al crudo, este tanque puede utilizarse como almacenamiento de crudo, de forma que el sistema contaría con una capacidad extra en caso de que la operación lo requiera.

### **3.2.3. Sistema de carga de cisternas**

Las facilidades de superficie cuentan con dos sistemas de carga ventral de cisternas, uno para la descarga de tanques de agua a cisternas y otro para la descarga de tanques de crudo a cisternas.

Cada uno de los sistemas cuenta con dos bombas P-103/104 para el agua y P-101/102 para crudo. De forma que una de las bombas de cada uno de los sistemas estará en operación, y la otra estará de reserva (back-up)

El sistema de carga se compone de varios equipos fundamentales. En primer lugar, se encuentran las bombas de carga P-101/102/103/104, que son responsables de impulsar el fluido hacia el proceso de carga. A su vez, el sistema incluye un manifold de carga, el cual se encarga de dirigir el flujo del fluido hacia los destinos deseados de manera controlada. Además, el sistema cuenta con contómetros ubicados en cada uno de los brazos de carga, permitiendo al operador detener manualmente la bomba cuando se alcanza el caudal de carga requerido mediante una botonera, asegurando así una carga precisa y eficiente. El sistema ofrece una operación altamente flexible gracias a la presencia de variadores de frecuencia en las bombas, lo que permite un control automático según las necesidades operativas. El manifold de carga, ubicado aguas debajo de la bomba, facilita el direccionamiento del flujo para cargar varias cisternas simultáneamente. El modo de operación estándar implica la carga simultánea de tres cisternas, porque los convoyes de transporte están compuestos por tres cisternas, permitiendo su conexión simultánea al sistema de carga. Una vez completada la operación de trasiego, el convoy partirá con las tres cisternas al mismo tiempo, optimizando así el proceso logístico de carga y transporte.

De esta forma, se garantiza una operación controlada y ordenada de carga y movimiento de cisternas.

### **3.2.4. Sistema de Antorcha**

El sistema de antorcha está configurado con seis (6) colectores principales, según lo descrito por Alvarado en 2022. Estos incluyen un colector independiente para la salida de gas del separador, equipado con un arrestador de llama, así como otro colector independiente para la salida de las Pressure Safety Valves del separador, también con arrestador de llama en caso de activación. Además,

hay un colector independiente para la salida de gas del Surge Tank, destinado exclusivamente para la calibración de los medidores de turbina, también equipado con un arrestador de llama.

Asimismo, se cuenta con un colector para la salida de gas de los tanques, cada uno con su propio arrestador de llama. Adicionalmente, se han instalado otros dos (2) colectores para la salida de gas del segundo separador, uno para la descarga de las Pressure Safety Valves (PSV) y otro para la salida de gas del propio separador.

La antorcha cuenta también con un sistema de encendido automático que puede operarse a través del mismo panel local del sistema para la ignición. El quemador está instalado en el colector de salida de gas del separador porque es la única corriente que garantiza un flujo de gas continuo para mantener la antorcha encendida (Belizón, 2012)

### **3.2.5. Equipos Auxiliares**

#### **a) Sistema de adquisición de datos**

Se utiliza para procesar los diferentes datos e información obtenida por los sensores Wireless, que están previstos de baterías y están ubicados en diferentes posiciones del proceso, de forma que los parámetros medidos son reportados en la computadora de adquisición que estará localizada dentro de la cabina de control (Mahmood et al., 2013)

Este sistema permite a los operadores monitorizar los distintos parámetros de proceso, tales como mediciones de presión o caudales.

#### **b) Laboratorio**

El laboratorio ubicado en la localización del pozo consta de los equipos requeridos para realizar los análisis del crudo y confirmar que cumple con la especificación.

#### **c) Sistema contra incendios**

El SCI cubre toda el área de proceso y tanques, y consta de un sistema de agua sobre base de espuma y también agua de enfriamiento para los tanques, además de extintores portátiles y rodantes (Virtanen et al., 2006)

El sistema consta de la bomba contra incendios que garantiza un suministro continuo de agua de cuatro (4) horas y monitores con cilindros de polvo

localizados en distintos puntos para generación de agua con espuma, cubriendo el área de proceso, tanques y cargadero y sus cubetos correspondientes en el caso de incendio de un vertido. Los monitores también disponen de conexiones para el uso de mangueras si fuera necesario (ISO 31000, 2009)

Adicionalmente para minimizar el riesgo en el área de tanques, éstos están pintados de color claro para evitar la absorción de la radiación solar y sobrecalentamiento del tanque.

**d) Aire de instrumentos**

El sistema de suministro de aire de instrumentación consta de un (1) compresor de 35 cfm (7.5 hP) para la instrumentación de los equipos y un (1) motocompresor de 375 cfm para alimentación de la bomba neumática de transferencia y como reserva (backup) para la alimentación de la instrumentación en caso de falla del primero.

**e) Generación Eléctrica**

Dos (2) generadores de potencia de 100 kVA con motor a diésel, uno de servicio y otro de reserva (backup), el generador con todos los auxiliares, están diseñados para una temperatura ambiente máxima de 50°C

**f) Luminaria**

Todas las facilidades estarán cubiertas por los radios de cobertura de las diez (10) luminarias instaladas, donde se indica la localización de los postes de luz.

**g) Sistema de protección atmosférica**

Las facilidades contarán con dos (2) pararrayos. En el Anexo, se muestra el diagrama de flujo correspondiente a las instalaciones.

**3.3. Condiciones de Operación**

A continuación, se muestran las condiciones de operación y principales de los equipos del proceso.

**TABLA 7**  
**CONDICIONES DE OPERACIÓN Y DIMENSIONES DE EQUIPOS DE PROCESOS**

Equipo asociado	Φ Tubería salida	Horiz / Vert	Largo / Alto	Diámetro Equipo	Volumen	Presión	Temp.
Separador trifásico V-101	6 pulg salida gas / 3 pulg salida líquido	H	3 m	0,91 m	1,95 m <sup>3</sup>	47,75 psi	119,4°F
Separador trifásico V-102	6 pulg salida gas / 3 pulg salida líquido	H	3 m	1,07 m	2,7 m <sup>3</sup>	47,75 psi	119,4°F
Surge tank ST-101	4 pulg salida gas / 3 pulg salida líquido	V	3,81 m	1,98 m	100 bbl (15,9 m <sup>3</sup> )	47,75 psi	119,4°F

Datos del cliente

**TABLA 8**  
**CONDICIONES DE OPERACIÓN Y DIMENSIONES DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO Y DIÉSEL**

Equipo asociado	Φ Tubería salida	Alto	Diámetro Equipo	Volumen	Temp.
Tanque de crudo TR-2101	6 pulg	9 m	7,6 m	2 500 bbl (397,5 m <sup>3</sup> )	119,4°F
Tanque de crudo TR-2102	6 pulg	9 m	7,6 m	2 500 bbl (397,5 m <sup>3</sup> )	119,4°F
Tanque de crudo TR-2103	6 pulg	9 m	7,6 m	2 500 bbl (397,5 m <sup>3</sup> )	119,4°F
Tanque de crudo TR-5101	6 pulg	5,8 m	7,6 m	1 500 bbl	119,4°F
PIT de almacenamiento de Diésel	Dique de Contención: Alto: 1,5 m Largo: 14,47 m. Ancho: 12,68 m				

Datos del cliente

**TABLA 9**  
**CONDICIONES DE OPERACIÓN DE BOMBAS DE DESPACHO DE CRUDO**

Equipo asociado	Φ Tubería Descarga	Presión	Temp.	Dimensiones de Dique
Bomba de despacho P-101	3 pulg.	30 psi	148.3 °F	6 m x 4 m x 0.6 m
Bomba de despacho P-102	3 pulg.	30 psi	148.3 °F	

Datos del cliente

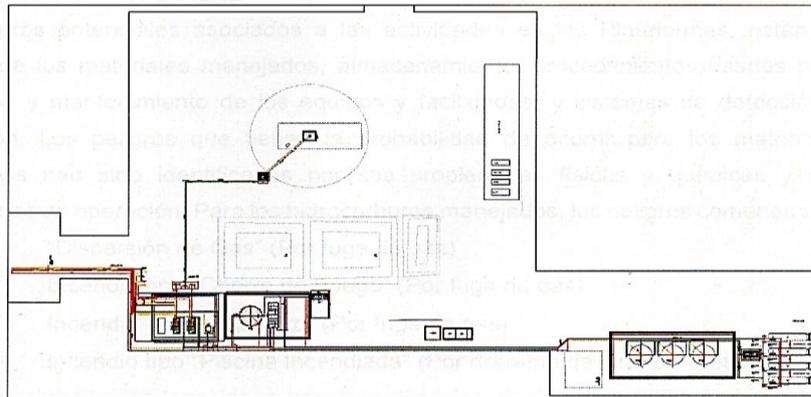
**TABLA 10**  
**CONDICIONES DE OPERACIÓN DE BOMBAS DE DESPACHO DE CRUDO**

Equipo asociado	Φ Tubería Salida	Presión	Temp.
Conector Camlock 1	4 pulg.	30 psi	148,3°F
Conector Camlock 2	4 pulg.	30 psi	148,3°F

Datos del cliente

En la **Figura 9** se muestra la disposición de equipos para la prueba de producción del pozo, así como se encuentra en el Anexo.

**FIGURA 9**  
**DISPOSICIÓN DE EQUIPOS**



Datos del cliente

### 3.4. Propiedades de Materiales

#### 3.4.1. Propiedades del Diésel

**Tabla 11**  
**Propiedades del Diésel**

Componente	Valor
Flash Point (*C)	52 min.
Gravedad específica @ 60 *F	0.84 — 0.87 aprox.
Límite inferior de inflamabilidad de los vapores, % vol. en aire.	1,3
Límite superior de inflamabilidad de los vapores, % vol. en aire.	60

Petroperú

### 3.4.2. Características del Crudo

**TABLA 12**  
**PROPIEDADES DEL CRUDO**

Parámetros de Entrada de Crudo	Valor
Densidad	45.0 API
GOR	50 scf/stb
Viscosidad del crudo (condiciones del reservorio)	0.7 cP
Viscosidad del agua (condiciones del reservorio)	0.3 cP

Datos del cliente

### 3.5. Identificación de Peligros

Los riesgos asociados a las actividades en las Plataformas están determinados por diversos factores, como los materiales manipulados, las prácticas de almacenamiento, los procedimientos operativos y de mantenimiento de equipos, así como los sistemas de detección y mitigación (Leu y Chang, 2015) Los peligros potenciales relacionados con los materiales manejados se identifican a partir de sus características físicas y/o químicas, así como de las condiciones operativas bajo las cuales se manejan.

De igual forma, para los hidrocarburos tratados, los riesgos comunes abarcan la "Dispersión de Gas", originada por fugas de gas, y la posibilidad de incendios, que pueden manifestarse como "Chorro de Fuego", "Fogonazo" o "Piscina Incendiada". Estos incendios pueden ser desencadenados por fugas de gas o derrames de crudo o diésel.

Con el propósito de evaluar las locaciones, se han dividido en tres áreas principales según su ubicación: Procesos, Almacenamiento y Despacho (Shi et al., 2014)

#### 3.5.1. Descripción general de la metodología

La metodología de identificación de peligros de incidentes mayores tiene como objetivo identificar y definir los escenarios más críticos que podrían tener un impacto significativo en las personas, el medio ambiente a la vez que los activos. Esta metodología sigue seis pasos secuenciales para lograr este propósito. En

primer lugar, se realiza una revisión inicial para comprender el contexto general del proceso. Luego, se lleva a cabo una revisión detallada del proceso para identificar áreas potenciales de riesgo. A continuación, se realiza una revisión del balance de materia para evaluar la distribución y el manejo de los materiales involucrados. Después, se revisan los estudios de seguridad previos para aprovechar la información disponible. Con toda esta información recopilada, se elabora una lista final de áreas potencialmente peligrosas. Finalmente, se procede a la elaboración de escenarios de eventos mayores para comprender y mitigar los riesgos identificados.

### **3.5.2. Revisión Inicial**

El proceso analítico se inaugura con una minuciosa revisión de la información existente sobre el proceso y las operaciones ejecutadas en las instalaciones. Cada descripción del proceso es escrutada meticulosamente para discernir las características físicas y químicas de los materiales, la cantidad y modalidad de almacenamiento, así como las condiciones ambientales circundantes, siguiendo las pautas delineadas en ISO GUIDE 73 (2009)

### **3.5.3. Revisión detallada del Proceso**

Una vez determinadas las corrientes principales de la unidad, se lleva a cabo una revisión minuciosa del balance de materia para cada una de estas corrientes, con el objetivo de identificar la composición exacta de los materiales presentes en las líneas y equipos. Cada línea de flujo se examina individualmente para evaluar su potencial para generar peligros, como fugas debido a roturas en las líneas o equipos, según lo establecido en 31010 (2010) Durante esta etapa del análisis, se elabora una lista inicial de áreas potencialmente peligrosas, la cual será refinada y reevaluada continuamente en etapas posteriores del análisis.

En la selección inicial de estas áreas, se tienen en cuenta varios factores importantes. En primer lugar, se evalúa la inflamabilidad y toxicidad de los materiales presentes en el proceso, lo que permite identificar los riesgos asociados con la exposición a sustancias peligrosas. Además, se analiza el diámetro de las tuberías y conexiones a los equipos, así como el flujo normal en estas, para identificar posibles puntos críticos donde podrían ocurrir fugas o fallos. También se consideran las condiciones de operación, como la presión,

temperatura y otros parámetros operativos relevantes que puedan afectar la seguridad del proceso. La combinación de estos factores ayuda a determinar las áreas prioritarias que requieren una atención especial en términos de gestión de riesgos y medidas de control.

#### **3.5.4. Revisión del balance de materia**

Durante esta fase del análisis, se realiza una revisión exhaustiva del balance de materia para cada una de las corrientes principales del proceso. Este proceso de revisión se lleva a cabo con el fin de identificar áreas dentro del proceso donde puedan encontrarse materiales inflamables y/o tóxicos que no hayan sido previamente identificados durante la revisión detallada del proceso, como se describe en Čepin (2011) Una vez identificadas, estas áreas se añaden a la lista de potenciales áreas peligrosas para su posterior análisis.

#### **3.5.5. Revisión de estudios de seguridad previos**

Se procede a llevar a cabo una revisión del "Estudio HAZOP" (que no forma parte de este análisis) con el fin de detectar posibles peligros asociados a eventos importantes que no hayan sido contemplados en la lista inicial de áreas críticas. Posteriormente, se integran estos hallazgos a la lista de potenciales áreas peligrosas para una cobertura más exhaustiva.

#### **3.5.6. Lista final de potenciales áreas peligrosas**

A continuación, se muestra la lista de potencial área peligrosa, determinadas previamente.

#### **3.5.7. Elaboración de escenarios de eventos mayores**

Con base en la lista de áreas peligrosas potenciales, se procede a desarrollar los escenarios de incidentes mayores utilizando el método del "Árbol de eventos", siguiendo las pautas descritas en la sección 2.1.8 del documento. En el presente estudio, los tipos de escenarios de accidentes identificados y respaldados por esta metodología son los siguientes, de acuerdo con lo establecido en el ISO GUIDE 73 (2009):

**TABLA 13**  
**LISTA FINAL DE POTENCIALES ÁREAS PELIGROSAS**

<b>Sistema</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Equipo asociado</b>	<b>Fase</b>
SI-01	Área de Procesos	Separador trifásico V-101	Gas Crudo
		Separador trifásico V-102	Gas Crudo
		Scrubber1	Gas
		Scrubber2	Gas
		Surge tank ST-101	Crudo
		Tanque de crudo TR-2101	Crudo
SI-02	Almacenamiento	Tanque de crudo TR-2102	Crudo
		Tanque de crudo TR-2103	Crudo
		Tanque de crudo TR-5101	Crudo
		PIT de Diésel	Diésel
SI-03	Área de despacho	Bomba de despacho P-101	Crudo
		Bomba de despacho P-102	Crudo
		Conector Camlock	Crudo

El autor

**a) Chorro de fuego (Jet Fire)**

Este escenario se produce cuando se produce la ignición instantánea de una fuga de gas o vapor inflamable, según lo indicado por Lavasani (2015)

**b) Fogonazo (Flash Fire)**

Este escenario se activa cuando se produce una fuga de gas o vapor inflamable que no se enciende de manera inmediata, lo que conduce a la formación de una nube de gas (Baskoro et al., 2021) Cuando esta nube alcanza una distancia considerable desde el punto de ignición, ocurre sin que haya una explosión subsiguiente debido a la falta de condiciones necesarias para tal evento. Los efectos de esta situación se evalúan considerando la radiación térmica y se determinan a partir del límite inferior de inflamabilidad (Baskoro et al., 2021)

**c) Dispersión**

Este escenario se materializa cuando se produce una fuga de gas o vapor inflamable que no se enciende de inmediato, dando lugar a la creación de una

nube de gas, cuyos límites están determinados por el límite inferior de inflamabilidad (LII) del gas en cuestión (Lindhe et al., 2009)

**d) Explosión tipo CE/UVCE**

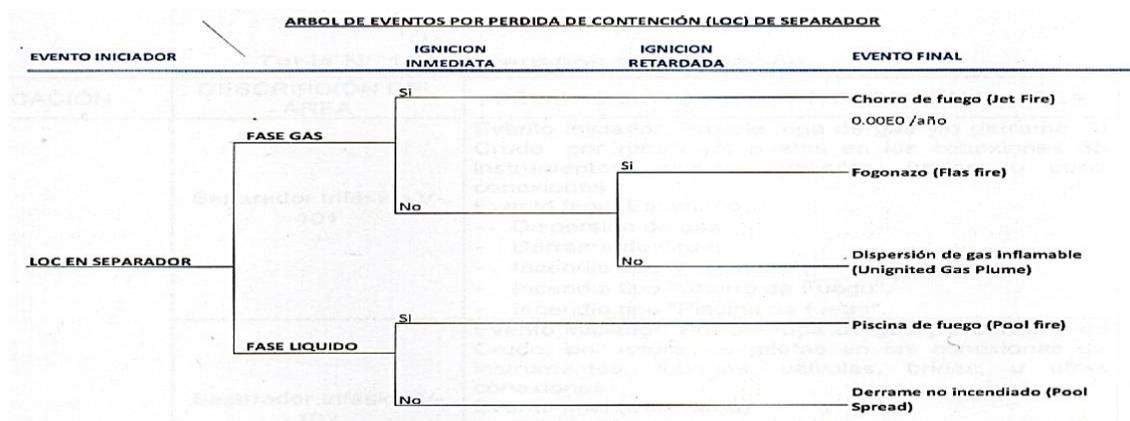
Debido a que las locaciones de perforación en tierra carecen de condiciones adecuadas, como confinamiento y obstrucción espacial, que puedan evitar la dispersión natural de una nube de gas, y considerando la naturaleza del gas natural, el cual tiene una densidad menor que el aire y tiende a dispersarse fácilmente en este entorno, junto con la ausencia de registros históricos de explosiones de nubes de gas confinadas y no confinadas (VCE/UVCE) durante las operaciones de perforación exploratoria en tierra, se ha decidido no considerar los efectos de la VCE en el estudio. Esto se debe a que la probabilidad de que ocurra dicho evento es baja debido al tipo de sustancia manejada (gas natural), el nivel de confinamiento y obstrucción presentes, y la falta de evidencia de ocurrencias similares en instalaciones similares.

**e) Piscina de Fuego (Pool Fire)**

Este escenario se desencadena cuando hay un derrame de un material inflamable seguido de su ignición. Por lo general, este tipo de incidente queda confinado al área donde ocurrió y sus efectos se expresan en forma de radiación térmica (Guo et al., 2023)

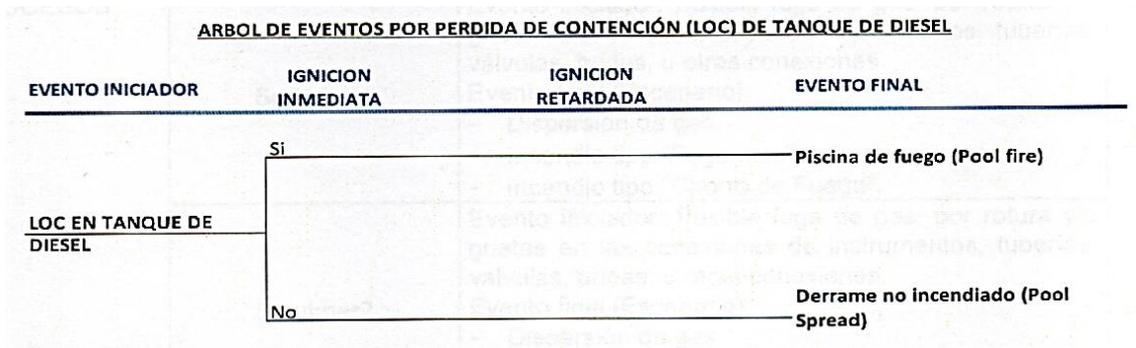
En las siguientes figuras se muestran los Árboles de Eventos elaborados para el presente estudio:

**FIGURA 10  
ÁRBOL DE EVENTOS PARA UNA FUGA CONTINUA DE GAS**



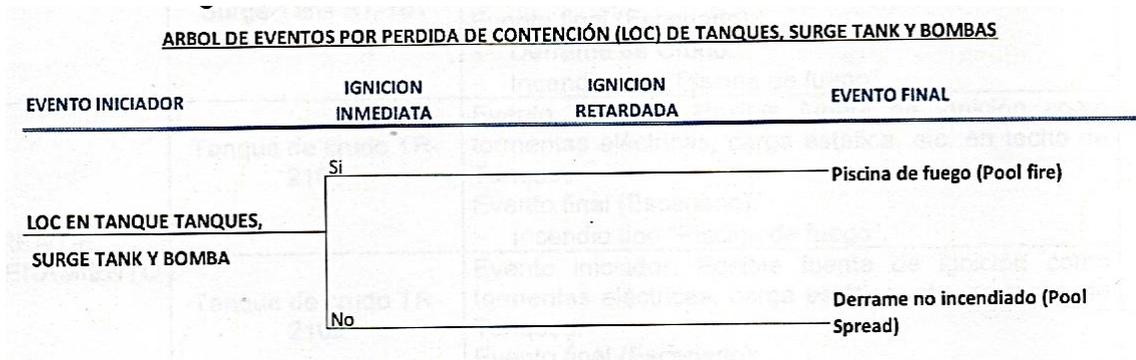
El autor

**FIGURA 11**  
**ÁRBOL DE EVENTOS PARA UNA FUGA DE LÍQUIDOS**



El autor

**FIGURA 12**  
**ÁRBOL DE EVENTOS PARA UNA FUGA CONTINUA DE LÍQUIDOS**



El autor

Así mismo en la siguiente tabla, se muestran los resultados del Árbol de Eventos.

**Tabla 14**  
**Escenarios por Ubicación**

Ubicación	Descripción del área	Peligro mayor identificado en el área
Área de Procesos	Separador trifásico V-101	Evento iniciador: Posible fuga de gas y/o derrame de crudo, por rotura y/o grietas en las conexiones de instrumentos, tuberías, válvulas, bridas, u otras conexiones. Evento final (Escenario): -Dispersión de gas. -Derrame de crudo. -Incendio tipo "fogonazo". -Incendio tipo "Chorro de Fuego". -Incendio tipo "Piscina de Fuego".
	Separador trifásico V-102	Evento iniciador: Posible fuga de gas y/o derrame de crudo, por rotura y/o grietas en las conexiones de instrumentos, tuberías, válvulas, bridas u otras conexiones. Evento final (Escenario): -Dispersión de gas. -Derrame de crudo. -Incendio tipo "Fogonazo". -Incendio tipo "Chorro de Fuego". Incendio tipo "Piscina de Fuego".
	Scrubber1	Evento iniciador: Posible fuga de gas, por rotura y/o grietas en las conexiones de instrumentos, tuberías, válvulas, bridas u otras conexiones. Evento final (Escenario): -Dispersión de gas. -Incendio tipo "Fogonazo". -Incendio tipo "Chorro de Fuego".
	Scrubber2	Evento iniciador: Posible fuga de gas, por rotura y/o grietas en las conexiones de instrumentos, tuberías, válvulas, bridas u otras conexiones. Evento final (Escenario): -Dispersión de gas. -Incendio tipo "Fogonazo". Incendio tipo "Chorro de Fuego".
	Surge Tank ST-101	Evento iniciador: Posible fuga de crudo, por rotura y/o grietas en las conexiones de instrumentos, tuberías, válvulas, bridas u otras conexiones. Evento final (Escenario): - Derrame de crudo. - Incendio tipo "Piscina de Fuego".
Área de Almacenamiento	Tanque de crudo TR-2101	Evento iniciador: Posible fuente de ignición como tormentas eléctricas, carga estática, etc., en techo de tanques.

	Tanque de rudo TR-2103	Evento final (Escenario): -Incendio tipo "Piscina de Fuego" Evento iniciador: Posible fuente de ignición como tormentas eléctricas, carga estática, etc., en techo de tanques. Evento final (Escenario): -Incendio tipo "Piscina de Fuego" Evento iniciador: Posible fuente de ignición como tormentas eléctricas, carga estática, etc., en techo de tanques. Evento final (Escenario): -Incendio tipo "Piscina de Fuego" Evento iniciador: Posible fuente de ignición como tormentas eléctricas, carga estática, etc., en techo de tanques.
	Tanque de crudo  TR-5101 PIT de Diésel	Evento final (Escenario): -Incendio tipo "Piscina de Fuego" Evento iniciador: Posible fuga de Diésel por rotura y/o grietas en el Bladder. Evento final (Escenario): -Derrame de Diésel en el dique de contención. -Incendio tipo "Piscina de Fuego"
Área de Despacho	Bomba de despacho P-101	Evento iniciador: Posible fuga de Crudo, por rotura y/o grietas en la bomba, válvulas, bridas y/o conexiones. Evento final (Escenario): -Derrame de Crudo en dique. -Incendio tipo "Piscina de Fuego" Evento iniciador: Posible fuga de Crudo, por rotura y/o grietas en la bomba, válvulas, bridas y/o conexiones.
	Bomba de despacho P-101	Evento final (Escenario): -Derrame de Crudo en dique. Incendio tipo "Piscina de Fuego" Evento iniciador: Posible fuga de Crudo, por rotura en las conexiones por mala maniobra de operador de camión cisterna.
	Conector Camlook	Evento final (Escenario): -Derrame de Crudo. -Incendio tipo "Piscina de Fuego"

El autor

### 3.6. Modelamiento de Consecuencias

#### 3.6.1. Tamaño de Agujeros

Los tamaños de la apertura suelen determinarse en base a un diámetro circular equivalente. Aunque las aberturas reales en los equipos de procesos raramente adoptan una forma circular, el flujo está relacionado con el área de la apertura y

no con su forma. En el contexto de la metodología expuesta en el numeral 2.2.3, se han seleccionado los tamaños de apertura de 25 mm y rotura total.

### **3.6.2. Criterios de Daño**

El análisis realizado para las actividades operativas implica la evaluación de los peligros potenciales asociados con fugas de los materiales manejados, como gas, crudo y diésel. Estas fugas pueden dar lugar a varios tipos de riesgos, incluyendo exposición a radiación térmica, incendios de tipo "piscina incendiada", incendios de tipo "chorro de fuego" e incendios de tipo "fogonazo". Estos riesgos son significativos y deben ser abordados con medidas de mitigación adecuadas para garantizar la seguridad del proceso y del personal involucrado.

Para establecer criterios de exposición a la radiación térmica en caso de accidentes probables, se adoptan niveles específicos de exposición que representan consecuencias conocidas para un nivel determinado de exposición en función de su duración.

En cuanto a la ubicación de zonas de concentración en caso de emergencia, se utiliza el criterio de daño de  $1,58 \text{ kW/m}^2$ , que permite una exposición continua con ropa normal a la radiación térmica debido a un posible incendio.

Para la ubicación de un Puesto de Comando en el sitio para la actuación en caso de emergencias y para el ingreso a la "zona caliente" con el propósito de llevar a cabo acciones de emergencia como cerrar válvulas o buscar heridos, se utiliza el criterio de daño de  $4,73 \text{ kW/m}^2$ . Esto permite una exposición por varios minutos sin barreras protectoras, pero con ropa contra incendios adecuada.

El criterio para el espaciamiento de las áreas se basa en el criterio de daño de  $12,5 \text{ kW/m}^2$ , que representa la intensidad de radiación a la que ciertos materiales pierden sus propiedades mecánicas y dejan de desempeñar su función de controlar los procesos o aislar la energía eléctrica.

### 3.6.3. Modelamiento de Daños para eventos mayores

El modelaje (cálculo de los escenarios plantados ha sido realizado utilizando los modelos descritos en el numeral 2.2.5.

**TABLA 15**  
**ESCENARIOS DE INCENDIO POR TAMAÑO DE AGUJERO**

Sistema	Ubicación	Equipo Asociado	Fase	Tamaño de Agujero	Cod Escenario	Escenario
Si-01	Área de Procesos	Separador trifásico V-101	Gas	Rotura total (6 pulg.) de la línea de descarga	ESC-01	Dispersión de gas
					ESC-02	Incendio tipo "Fogonazo"
					ESC-03	Incendio tipo "Chorro de Fuego"
			Crudo	Rotura o grieta de 1 pulg. en la línea de descarga	ESC-04	Dispersión de gas
					ESC-05	Incendio tipo "Fogonazo"
					ESC-06	Incendio tipo "Chorro de Fuego"
		Separador trifásico V-102	Gas	Rotura total (6 pulg.) de la línea de descarga	ESC-07	Derrame en crudo
					ESC-08	Incendio tipo "Piscina de fuego"
				Rotura o grieta de 1 pulg. en la línea de descarga	ESC-09	Derrame en crudo
			Crudo		ESC-10	Incendio tipo "Piscina de fuego"
				Rotura total (6 pulg.) de la línea de descarga	ESC-11	Dispersión de gas
					ESC-12	Incendio tipo "Fogonazo"
	Scrubber 1	Área de Procesos	Gas	Rotura total (6 pulg.) de la línea de descarga	ESC-13	Incendio tipo "Chorro de Fuego"
					ESC-14	Dispersión de gas
					ESC-15	Incendio tipo "Fogonazo"
			Crudo	Rotura o grieta de 1 pulg. en la línea de descarga	ESC-16	Incendio tipo "Chorro de Fuego"
				Rotura total (3 pulg.) de la línea de descarga	ESC-17	Derrame en crudo
					ESC-18	Incendio tipo "Piscina de fuego"
		Área de Procesos	Gas	Rotura o grieta de 1 pulg. en la línea de descarga	ESC-19	Derrame en crudo
					ESC-20	Incendio tipo "Piscina de fuego"
			Crudo	Rotura total (6 pulg.) de la línea de descarga	ESC-21	Dispersión de gas
					ESC-22	Incendio tipo "Fogonazo"
	Área de Procesos	Gas	Rotura o grieta de 1 pulg. en la línea de descarga	ESC-23	Incendio tipo "Chorro de Fuego"	
				ESC-24	Dispersión de gas	
		Crudo		ESC-25	Incendio tipo "Fogonazo"	
				ESC-26	Incendio tipo "Chorro de Fuego"	

		Scrubber 2	Gas	Rotura total (6 pulg.) de la línea de descarga	ESC-27 ESC-28 ESC-29	Dispersión de gas Incendio tipo "Fogonazo" Incendio tipo "Chorro de Fuego"
				Rotura o grieta de 1 pulg. en la línea de descarga	ESC-30 ESC-31 ESC-32	Dispersión de gas Incendio tipo "Fogonazo" Incendio tipo "Chorro de Fuego"
		Surge tank ST-101	Crudo	Rotura total (3 pulg.) de la línea de descarga	ESC-33 ESC-34	Derrame en crudo Incendio tipo "Piscina de fuego"
				Rotura o grieta de 1 pulg. en la línea de descarga	ESC-35 ESC-36	Derrame en crudo Incendio tipo "Piscina de fuego"
SI-02	Almacena- miento	Tanque de crudo TR-2101	Crudo	-	ESC-37	Incendio tipo "Piscina de fuego"
		Tanque de crudo TR-2102	Crudo	-	ESC-38	Incendio tipo "Piscina de fuego"
		Tanque de crudo TR-2103	Crudo	-	ESC-39	Incendio tipo "Piscina de fuego"
		Tanque de crudo TR-5101	Crudo	-	ESC-40	Incendio tipo "Piscina de fuego"
		PIT de Diésel	Diésel	-	ESC-41	Incendio tipo "Piscina de fuego" en el dique de contención de Diésel
SI-03	Área de Despacho	Bomba de despacho P-101	Crudo	Rotura total (3 pulg.) de la línea de descarga	ESC-42 ESC-43	Derrame en crudo Incendio tipo "Piscina de fuego"
				Rotura o grieta de 1 pulg. en la línea de descarga	ESC-44 ESC-45	Derrame en crudo Incendio tipo "Piscina de fuego"
		Bomba de despacho P-102		Rotura total (3 pulg.) de la línea de descarga	ESC-46 ESC-47	Derrame en crudo Incendio tipo "Piscina de fuego"
			Crudo	Rotura o grieta de 1 pulg. en la línea de descarga	ESC-48 ESC-49	Derrame en crudo Incendio tipo "Piscina de fuego"
		Conector Camlook	Crudo	Rotura total (4 pulg.) de la línea	ESC-50	Incendio tipo "Piscina de fuego"

El autor

Nota : La rotura total se refiere a una posible ruptura completa de la conexión principal del equipo evaluado, lo que puede ocurrir en la tubería, brida, soldadura, conexión excéntrica, u otros componentes. Esta rotura genera el evento de peor consecuencia para el equipo evaluado.

Por otro lado, la rotura de 1 pulgada, se refiere a una posible rotura, agrietamiento o agujero de la conexión principal del equipo, también ubicado en la tubería, brida. Soldadura, conexión excéntrica, u otros componentes. Esta rotura genera un evento con consecuencias medias para el equipo evaluado.

#### **3.6.4. Resultados del cálculo de Consecuencias**

La Tabla 15 muestra los resultados obtenidos en el modelaje de cada uno de los escenarios establecidos

**TABLA 16**  
**RESULTADOS INCENDIO**

Sistema	Ubicación	Equipo asociado	Cod. Escenario	Tamaño de agujero (pulg.)	Escenario	Distancias de daño por incendio			Dispersión de gas (m)	Tamaño de derrame (m)
						1.58 kW/m <sup>2</sup>	473 kW/m <sup>2</sup>	12.50 kW/m <sup>2</sup>	50% LFL	Diámetro equivalente
SI-01	Área de procesos	Separador trifásico V-101	ESC-01	6	Dispersión de gas	-	-	-	45	-
			ESC-02	6	Incendio tipo "Fogonazo"	-	-	-	45	-
			ESC-03	6	Incendio tipo "Chorro de Fuego"	63	50	43	-	-
			ESC-04	1	Dispersión de gas	-	-	-	3	-
			ESC-05	1	Incendio tipo "Fogonazo"	-	-	-	3	-
			ESC-06	1	Incendio tipo "Chorro de Fuego"	12	10	8	-	-
			ESC-07	3	Dispersión en crudo	-	-	-	-	21
			ESC-08	3	Incendio tipo "Piscina de fuego"	90	60	37	-	-
			ESC-09	1	Dispersión en crudo	-	-	-	-	8
			ESC-10	1	Incendio tipo "Piscina de fuego"	38	25	16	-	-
	Separador trifásico V-102	ESC-11	6	Dispersión de gas	-	-	-	45	-	
		ESC-12	6	Incendio tipo "Fogonazo"	-	-	-	45	-	
		ESC-13	6	Incendio tipo "Chorro de Fuego"	63	50	43	-	-	
		ESC-14	1	Dispersión de gas	-	-	-	3	-	
		ESC-15	1	Incendio tipo "Fogonazo"	-	-	-	3	-	
		ESC-16	1	Incendio tipo "Chorro de Fuego"	12	10	8	-	-	
		ESC-17	3	Dispersión en crudo	-	-	-	-	21	
		ESC-18	3	Incendio tipo "Piscina de fuego"	90	60	37	-	-	
		ESC-19	1	Dispersión en crudo	-	-	-	-	8	
		ESC-20	1	Incendio tipo "Piscina de fuego"	38	25	16	-	-	
	Scrubber1	ESC-21	6	Dispersión de gas	-	-	-	45	-	
		ESC-22	6	Incendio tipo "Fogonazo"	-	-	-	45	-	
		ESC-23	6	Incendio tipo "Chorro de Fuego"	63	50	43	-	-	
		ESC-24	1	Dispersión de gas	-	-	-	3	-	
		ESC-25	1	Incendio tipo "Fogonazo"	-	-	-	3	-	
		ESC-26	1	Incendio tipo "Chorro de Fuego"	12	10	8	-	-	
	Scrubber2	ESC-27	6	Dispersión de gas	-	-	-	45	-	

				ESC-28	6	Incendio tipo "Fogonazo"	-	-	-	45	-
				ESC-29	6	Incendio tipo "Chorro de Fuego"	63	50	43	-	-
				ESC-30	1	Dispersión de gas	-	-	-	3	-
				ESC-31	1	Incendio tipo "Fogonazo"	-	-	-	3	-
				ESC-32	1	Incendio tipo "Chorro de Fuego"	12	10	8	-	-
		Surge tank		ESC-33	3	Derrame en crudo	-	-	-	-	-
		ST-101		ESC-34	3	Incendio tipo "Piscina de fuego"	90	60	37	-	-
				ESC-35	1	Derrame en crudo	-	-	-	-	8
				ESC-36	1	Incendio tipo "Piscina de fuego"	39	26	16	-	-
SI-02	Almac enami ento	Tanque de crudo TR-2101		ESC-37	--	Incendio tipo "Piscina de fuego "en techo de tanque	35	17	14	-	-
		Tanque de crudo TR-2102		ESC-38	--	Incendio tipo "Piscina de fuego "en techo de tanque	35	17	14	-	-
		Tanque de crudo TR-2103		ESC-39	--	Incendio tipo "Piscina de fuego "en techo de tanque	35	17	14	-	-
		Tanque de crudo TR-5101		ESC-40	-	Incendio tipo "Piscina de fuego "en techo de tanque	36	21	11	-	-
		PIT de Diésel		ESC-41	-	Incendio tipo "Piscina de fuego "en PIT	47	32	22	-	-
SI-03	Área de despa cho	Bomba de despacho P-101		ESC-42	3	Derrame en crudo	-	-	-	-	6
				ESC-43	3	Incendio tipo "Piscina de fuego"	26	19	12	-	-
				ESC-44	1	Derrame en crudo	-	-	-	-	3
				ESC-45	1	Incendio tipo "Piscina de fuego"	15	11	7	-	-
		Bomba de despacho P-102		ESC-46	3	Derrame en crudo	-	-	-	-	6
				ESC-47	3	Incendio tipo "Piscina de fuego"	28	19	12	-	-
				ESC-48	1	Derrame en crudo	-	-	-	-	3
				ESC-49	1	Incendio tipo "Piscina de fuego"	15	11	7	-	-
		Conector Camlook 1		ESC-50	4	Derrame en crudo	-	-	-	-	6
				ESC-51	4	Incendio tipo "Piscina de fuego"	28	19	12	-	-

EI

Autor

### 3.7. Análisis de Resultados y Observaciones para los distintos escenarios

Las principales observaciones que se pueden derivar de los cálculos realizados para escenarios básicos de falla (peor y medio), son las siguientes:

- a) Los resultados obtenidos son razonables, lógicos, y comparables a los resultados obtenidos para casos similares utilizando diferentes tipos de software.
- b) En función de los cálculos y análisis realizados, el efecto de la ocurrencia de los distintos escenarios considerados de falla y las consecuencias peligrosas para la instalación, personas y el ambiente en el área afectada, se indican en la siguiente tabla.

**Tabla 17**

***Efectos y consecuencias peligrosas sobre la instalación, personas y ambiente debido a escenarios de incendio***

<b>Cod. Escenario</b>	<b>Escenarios</b>	<b>Efecto</b>	<b>Consecuencias peligrosas</b>
ESC-01	Dispersión de gas	Atmósfera inflamable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formación de atmósfera inflamable</li> </ul>
ESC-02	Incendio tipo "Fogonazo"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fatalidad por quemaduras.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> </ul>
ESC-03	Incendio tipo "Chorro de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> </ul>
ESC-04	Dispersión de gas	Atmósfera inflamable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formación de atmósfera inflamable</li> </ul>
ESC-05	Incendio tipo "Fogonazo"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fatalidad por quemaduras.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> </ul>
ESC-06	Incendio tipo "Chorro de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> <li>• Contaminación ambiental por generación de materiales peligrosos (kit antiderrame contaminados, trapos, sacos de arena, etc.)</li> </ul>
ESC-07	Derrame de crudo	Atmósfera inflamable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdidas económicas por disposición de materiales peligrosos.</li> </ul>
ESC-08	Incendio tipo "Piscina de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> </ul>

<b>Cod. Escenario</b>	<b>Escenarios</b>	<b>Efecto</b>	<b>Consecuencias peligrosas</b>
ESC-09	Derrame de crudo	Atmósfera inflamable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos a la salud por inhalación. De humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> <li>• Contaminación ambiental, por generación de materiales peligrosos (kit antiderrame contaminados, trapos, sacos de arena, etc.)</li> <li>• Pérdidas económicas por disposición de materiales peligrosos.</li> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> </ul>
ESC-10	Incendio tipo "Piscina de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> </ul>
ESC-11	Dispersión de gas	Atmósfera inflamable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formación de atmósfera inflamable.</li> </ul>
ESC-12	Incendio tipo "Fogonazo"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fatalidad por quemaduras.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> </ul>
ESC-13	Incendio tipo "Chorro de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> </ul>
ESC-14	Dispersión de gas	Atmósfera inflamable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formación de atmósfera inflamable.</li> </ul>
ESC-15	Incendio tipo "Chorro de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fatalidad por quemaduras.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> </ul>
ESC-16	Incendio tipo "Chorro de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> <li>• Contaminación ambiental por generación de materiales peligrosos (kit, antiderrame contaminados, trapos, sacos de arena, etc.)</li> </ul>
ESC-17	Derrame de crudo	Atmósfera inflamable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdidas económicas por disposición de materiales peligrosos.</li> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> </ul>
ESC-18	Incendio tipo "Piscina de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> </ul>
ESC-19	Derrame de crudo	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> </ul>

<b>Cod. Escenario</b>	<b>Escenarios</b>	<b>Efecto</b>	<b>Consecuencias peligrosas</b>
ESC-20	Incendio tipo "Piscina de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> </ul>
ESC-21	Dispersión de gas	Atmósfera inflamable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formación de atmósfera inflamable.</li> </ul>
ESC-22	Incendio tipo "Fogonazo"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fatalidad por quemaduras.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> </ul>
ESC-23	Incendio tipo "Piscina de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> </ul>
ESC-24	Dispersión de gas	Atmósfera inflamable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formación de atmósfera inflamable.</li> </ul>
ESC-25	Incendio tipo "Fogonazo"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fatalidad por quemaduras.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> </ul>
ESC-26	Incendio tipo "Piscina de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> </ul>
ESC-27	Dispersión de gas	Atmósfera inflamable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formación de atmósfera inflamable.</li> </ul>
ESC-28	Incendio tipo "Fogonazo"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fatalidad por quemaduras.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> </ul>
ESC-29	Incendio tipo "Piscina de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> </ul>
ESC-30	Dispersión de gas	Atmósfera inflamable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formación de atmósfera inflamable.</li> </ul>
ESC-31	Incendio tipo "Fogonazo"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fatalidad por quemaduras.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> </ul>
ESC-32	Incendio tipo "Piscina de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> <li>• Contaminación ambiental por generación de materiales peligrosos (kit, antiderrame contaminados, trapos, sacos de arena, etc.)</li> </ul>
ESC-33	Derrame de crudo	Atmósfera inflamable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdidas económicas por disposición de materiales peligrosos.</li> </ul>

<b>Cod. Escenario</b>	<b>Escenarios</b>	<b>Efecto</b>	<b>Consecuencias peligrosas</b>
ECS-34	Incendio tipo "Piscina de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> <li>• Contaminación ambiental por generación de materiales peligrosos (kit, antiderrame contaminados, trapos, sacos de arena, etc.)</li> </ul>
ECS-35	Derrame de crudo	Atmósfera inflamable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdidas económicas por disposición de materiales peligrosos.</li> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> </ul>
ECS-36	Incendio tipo "Piscina de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> </ul>
ECS-37	Incendio tipo "Piscina de Fuego" en techo de tanque	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> </ul>
ECS-38	Incendio tipo "Piscina de Fuego" en techo de tanque	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> </ul>
ECS-39	Incendio tipo "Piscina de Fuego" en techo de tanque	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> </ul>
ECS-40	Incendio tipo "Piscina de Fuego" en techo de tanque	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> </ul>
ECS-41	Incendio tipo "Piscina de Fuego" en PIT	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> <li>• Contaminación ambiental por generación de materiales peligrosos (kit, antiderrame contaminados, trapos, sacos de arena, etc.)</li> </ul>
ECS-42	Derrame de crudo	Atmósfera inflamable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdidas económicas por disposición de materiales peligrosos.</li> </ul>
ECS-43	Incendio tipo "Piscina de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> </ul>

<b>Cod. Escenario</b>	<b>Escenarios</b>	<b>Efecto</b>	<b>Consecuencias peligrosas</b>
ECS-44	Derrame de crudo	Atmósfera Inflamable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> <li>• Contaminación ambiental por generación de materiales peligrosos (kit, antiderrame contaminados, trapos, sacos de arena, etc.)</li> <li>• Pérdidas económicas por disposición de materiales peligrosos.</li> </ul>
ECS-45	Incendio tipo "Piscina de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> <li>• Contaminación ambiental por generación de materiales peligrosos (kit, antiderrame contaminados, trapos, sacos de arena, etc.)</li> </ul>
ECS-46	Derrame de crudo	Atmósfera Inflamable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdidas económicas por disposición de materiales peligrosos.</li> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> </ul>
ECS-47	Incendio tipo "Piscina de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> <li>• Contaminación ambiental por generación de materiales peligrosos (kit, antiderrame contaminados, trapos, sacos de arena, etc.)</li> </ul>
ECS-48	Derrame de crudo	Atmósfera Inflamable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdidas económicas por disposición de materiales peligrosos.</li> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> </ul>
ECS-49	Incendio tipo "Piscina de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> <li>• Contaminación ambiental por generación de materiales peligrosos (kit, antiderrame contaminados, trapos, sacos de arena, etc.)</li> </ul>
ECS-50	Derrame de crudo	Atmósfera Inflamable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdidas económicas por disposición de materiales peligrosos.</li> <li>• Lesiones personales por quemaduras.</li> </ul>
ECS-51	Incendio tipo "Piscina de Fuego"	Radiación térmica Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos a la salud por inhalación de humos tóxicos.</li> <li>• Daños a equipos e instalaciones.</li> </ul>

Basado en los cálculos efectuados, se establecen las distancias seguras para el personal propio, así como para terceros y las instalaciones, además de determinar la ubicación adecuada de rutas de escape, puntos de reunión y Puestos de Comando en Sitio (PCS) según lo dispuesto en el Plan de Contingencias, tal como se muestra en el cuadro siguiente:

**TABLA 18**  
**ESTACIÓN DE DISTANCIA SEGURAS**

Ubicación	Equipo asociado	Distancia segura para personal propio, tercero y puntos de reunión	Distancia segura para ubicación de rutas de escape y PCS	Distancia para ubicación de equipos críticos
Área de Procesos	Separador Trifásico V-101	>63 m del separador trifásico V-101	>50 m del Separador trifásico V-101	>25 m del Separador trifásico V-101
	Separador trifásico V-102	>63 m del separador trifásico V-102	>50 m del Separador trifásico V-102	>25 m del Separador trifásico V-102
	Scrubber1	>63 m del Scrubber 1	>50 m del Scrubber 1	>10 m del Scrubber 1
	Scrubber2	>63 m del Scrubber 2	>50 m del Scrubber 2	>10 m del Scrubber 2
	Surge Tank ST-101	>90 m del Surge tank ST-101	>60 m del Surge tank ST-101	>26 m del Surge tank ST-101
Almacenamiento	Tanque de crudo TR-2101	>35 m del Tanque de crudo TR-2101	>17 m del Tanque de crudo TR-2101	>17 m del Tanque de crudo TR-2101
	Tanque de crudo TR-2102	>35 m del Tanque de crudo TR-2102	>17 m del Tanque de crudo TR-2102	>17 m del Tanque de crudo TR-2102
	Tanque de crudo TR-2103	>35 m del Tanque de crudo TR-2103	>17 m del Tanque de crudo TR-2103	>17 m del Tanque de crudo TR-2103
	Tanque de crudo TR-5101	>36 m del Tanque de crudo TR-5101	>21 m del Tanque de crudo TR-5101	>21 m del Tanque de crudo TR-5101
	PIT de Diésel	>47 m del PIT de Diésel	>32 m del PIT de Diésel	>32 m del PIT de Diésel
Área de Despacho	Bomba de despacho P-101	>28 m de la Bomba de despacho P-101	>19 m de la Bomba de despacho P-101	>11 m de la Bomba de despacho P-101
	Bomba de despacho P-102	>28 m de la Bomba de despacho P-102	>19 m de la Bomba de despacho P-102	>11 m de la Bomba de despacho P-102
	Conector Camlock	>28 m de Conector Camlock	>19 m de Conector Camlock	>11 m de Conector Camlock

El autor

#### **IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

- 1)** La seguridad de procesos (PSM), a diferencia de la seguridad industrial, está enfocada en analizar la posible liberación de materia, la cual tiene la posibilidad de generar un daño de mayor consecuencia y masa, que un evento en seguridad industrial.
- 2)** Las causas para esta liberación suelen encontrarse dentro de tuberías y equipos. Por ello el análisis requiere de técnicos y especialistas conocedores del proceso y que puedan generar medidas adecuadas para la prevención, control y mitigación de daños.
- 3)** La metodología ACR es el proceso sistémico, especializado del PSM, que me permitirá saber qué eventos podrían ocurrir, qué tan probable que ocurran y qué tanto me van a afectar. Esta información es clave para la toma de decisiones.
- 4)** El momento ideal de hacer un ACR es entre la ingeniería básica y la ingeniería de detalle. Esto porque conociendo los eventos y consecuencias, puedo determinar, por ejemplo, distribución de planta, diseño del SCI, rutas de evacuación, cantidad de medios técnicos y humanos, etc.
- 5)** Toda planta a nivel industrial debería de tener un ACR, para conocer cuáles son mis áreas y equipos críticos, y asegurar de manera técnica (lo que en seguridad industrial se le llama controles de ingeniería y administrativos) la no ocurrencia de un accidente.

## **V. RECOMENDACIONES**

### **5.1. Medidas de Prevención**

- 1) Implementar/ actualizar el Sistema de Gestión de Riesgos.
- 2) De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente estudio y a la importancia de prevenir la posible ocurrencia de eventos mayores, la reducción del riesgo debe ser enfocado primordialmente en evitar la ocurrencia de fugas potenciales, esto se logrará principalmente a través de un diseño adecuado (de acuerdo a los códigos y estándar reconocidos a nivel nacional e internacional) y a través de un eficaz programa de mantenimiento de los distintos equipos estructuras y un adecuado control de cambios, con el objeto de reducir la tasa de falla de las tuberías y sus componentes y minimizar los escenarios de fuga de crudo y escape de gas.
- 3) En base a los resultados de este informe, elaborar y aplicar planos de clasificación de áreas peligrosas para la selección de instrumentos, sistemas o equipos en áreas con probabilidad de peligro de incendio, según el código NFPA aplicable y Reglamento sobre almacenamiento de hidrocarburos.
- 4) Implementar y asegurar el cumplimiento del sistema de Permisos de Trabajo y realizar inspecciones de campo a la instalación con el propósito de eliminar los “puntos calientes” o “fuentes de ignición”, dentro del rango de inflamabilidad de las “nubes” de gas analizadas (escenarios que involucren dispersión). Desarrollar y aplicar un plano de “clasificación de áreas peligrosas” de la instalación.

### **5.2. Medidas de Mitigación**

Considerando los resultados obtenidos, se recomienda realizar la inspección, prueba y mantenimiento de los equipos contraincendios de acuerdo con los códigos y normas internacionales actualizados, para asegurar la integridad operativa de las mismas.

- 1) Diseñar y/o actualizar el Plan de Contingencia y Emergencias Operacionales de la Institución en base a los resultados obtenidos por el presente estudio y la evaluación técnica de los sistemas y recursos para emergencias.

- 2) Establecer las rutas de escape, puntos de reunión, disposición de equipos de extinción y áreas de intervención según los datos obtenidos en este estudio para su incorporación al plan de contingencias de la instalación.
- 3) Asegurar que los medios de evacuación de la instalación sean seguros y rápidos, de manera tal que se mantengan convenientemente señalizadas las rutas de escape, libre de obstáculos, iluminadas y con el ancho mínimo requerido por el Reglamento Nacional de Edificaciones. Se debe tener especial cuidado en identificar el punto exacto de reunión de la instalación. Incluir un plano o esquemático en un sitio estratégico del recinto (visible y de fácil acceso)
- 4) Elaborar / actualizar y divulgar (adiestramiento), los planes de respuesta y control de emergencia para cada uno de los eventos aquí estudiados incluyendo los planeamientos previos específicos.
- 5) Considerando los resultados obtenidos en los cálculos de consecuencias es altamente recomendable efectuar un adecuado programa de simulacros de lucha contra incendios y control de derrame, para mitigar las consecuencias de eventos mayores.
- 6) El cliente debe disponer de una brigada contra incendios debidamente estructurada, con roles y responsabilidades claramente definidos para el personal interno y de apoyo, bajo la supervisión de un profesional especializado y certificado en prevención y extinción de incendios.

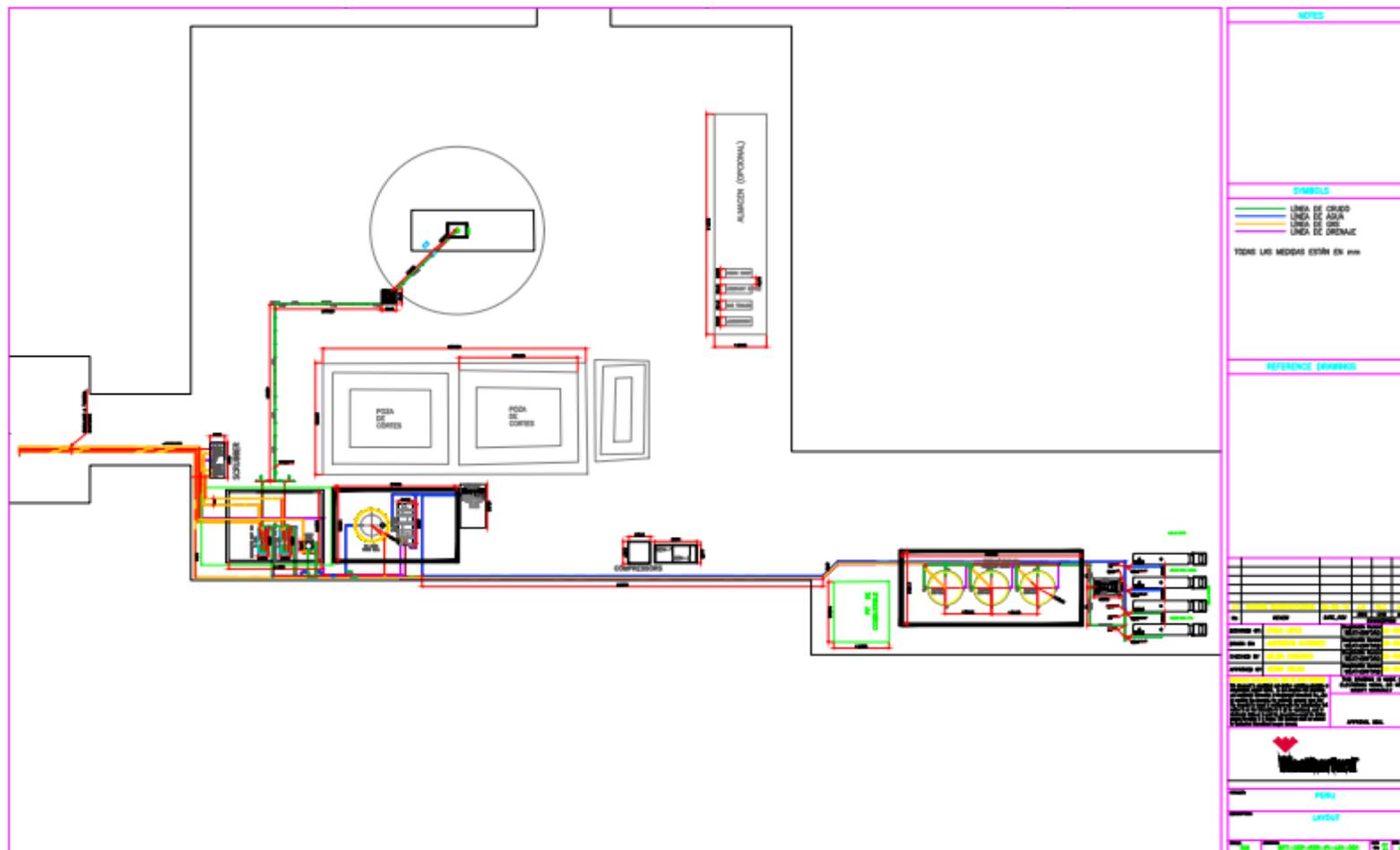
## VI. BIBLIOGRAFÍA

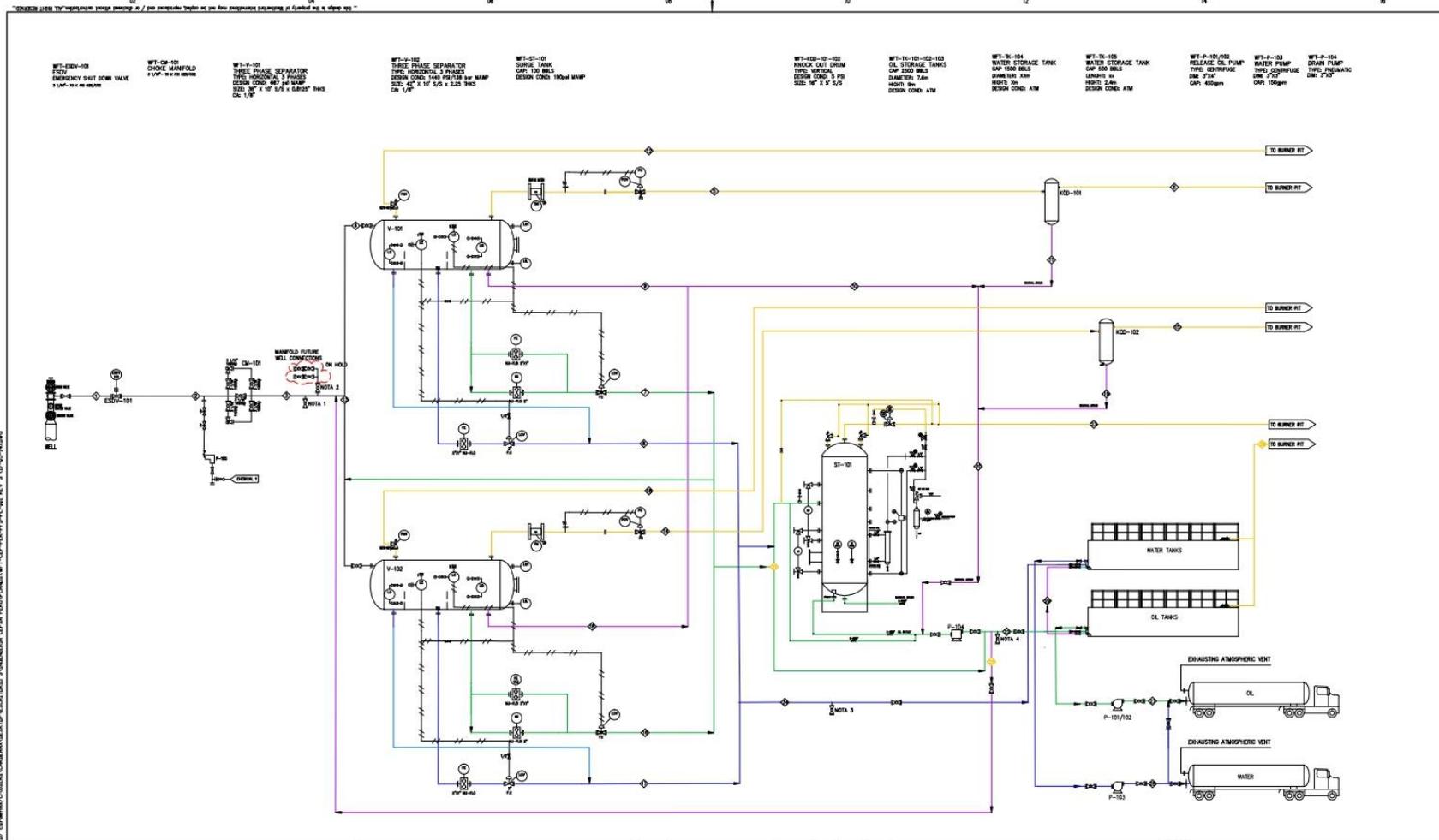
- AICHE/CCPS. (2000). *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. Second Edition*. Center for Chemical Process Safety. American Institute of Chemical Engineers, New York.
- CCPS. (1992). *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures. Second Edition with Worked Examples*. Center for Chemical Process Safety. American Institute of Chemical Engineers. New York.
- Antor, M. A., Domínguez, G. A., & Medina, I. R. D. L. M. (2014). *El análisis causa raíz utilizado como herramienta en la evaluación de eventos no deseados en instalaciones de una refinería* (Doctoral dissertation, Tesis de grado, México: Universidad Nacional Autónoma de México).
- Aslansefat K, Kabir S, Gheraibia Y, Papadopoulos Y. (2020). *Dynamic Fault Tree Analysis*. doi:10.1201/9780429268922-4
- Casal, J. (1999). *Análisis de riesgo en instalaciones industriales*. Primera Edición. Ediciones UPC.
- Čepin, M. (2011). Fault tree analysis. *Assessment of Power System Reliability: Methods and Applications*, 61-87.
- EN 13306:2010. (2010). *Risk management*. Risk assessment techniques, European Committee for Electrotechnical Standardization, EN 31010:2010
- Gómez, N. (2012). *Análisis cuantitativo de los errores de posicionamiento del sistema de colimación multiláminas (MLC) de un acelerador lineal mediante pruebas "Fence Test"*.
- HSE. (1989). *Quantified Risk Assessment its Input to Decision Making. Health and Safety Executive*. Her Majesty's Stationery Office.
- IchemE. (1992). *Nomenclature for Hazard and Risk Assessment in the Process Industries*. 2nd Edition. The Institution of Chemical Engineers. UK.
- ISO GUIDE 73. (2009). *Risk management*. Vocabulary, International Organization for Standardization.
- ISO 31000. (2009). *Risk management*. Principles and guidelines, International Organization for Standardization, ISO 31000:2009

- Jaimes, J. A. (2015). *Continuidad del negocio: la clave del éxito* (Bachelor's thesis, Universidad Piloto de Colombia).
- Lavasani S. M., Ramzali, N., Sabzalipour, F., Akyuz, E. (2015). Utilisation of Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) for quantified risk analysis of leakage in abandoned oil and natural-gas wells. *Ocean Eng.*, 108, 729-737. doi:10.1016/j.oceaneng.2015.09.008
- Leu, S.-S. and Chang, C. M. (2015), Bayesian-network-based fall risk evaluation of steel construction projects by fault tree transformation. *Journal of Civil Engineering and Management*, 21(3), 334-342.
- Lindhe, A., Rosén, L., Norberg, T. and Bergstedt, O. (2009), Fault tree analysis for integrated and probabilistic risk analysis of drinking water systems. *Water research*, 43(6), 1641- 1653.
- Liu, Y. (2014). Discrimination of low-and high-demand modes of safety-instrumented systems based on probability of failure on demand adaptability. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 228(4), 409-418.
- Mahmood, Y. A., Ahmadi, A., Verma, A. K., Srividya, A., Kumar, U. (2013). Fuzzy fault tree analysis: a review of concept and application. *Int J Syst Assur Eng Managment*, 4, 19-32. doi:10.1007/s13198-013-0145-x
- Mata, O. (2019). *Process Safety Management— PSM*. Apza Risk Tech.
- MINAM (2010). *Guía de evaluación de Riesgos Ambientales*. Primera edición. Dirección General de Calidad Ambiental, Lima. [https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/guia\\_riesgos\\_ambientales.pdf](https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/guia_riesgos_ambientales.pdf)
- Notermans, S., & Teunis, P. (1996). Quantitative risk analysis and the production of microbiologically safe food: an introduction. *International journal of food microbiology*, 30(1-2), 3-7.
- Pitt, M. J. (1994). Hazard and operability studies: a tool for management analysis. *Facilities*, 12(13), 5-8.
- Ramzali, N., Lavasani, M. R. M., Ghodousi, J. (2015). Safety barriers analysis of offshore drilling system by employing Fuzzy event tree analysis. *Saf Science*, 78, 49-59. doi:10.1016/j.ssci.2015.04.004

- Rashid, Z., Fuad, M. F. I. A., Ahmad, M. A., Azhari, N. A., Hazimin, H. N. M., Ariff, M. A. M., & Buang, A. (2023). Layer of Protection Analysis (LOPA) as an Effective Tool for Preventing Major Accidents Hazards: A Case Study of Ammonia Storage Tank. In *2023 IEEE 14th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)* (pp. 242-247). IEEE.
- Roberts, N. H., Vesely, W. E., Haasl D. F. & Goldberg, F. F. (1981). *Fault Tree Handbook*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-0492
- Shi L, Shuai J, Xu K. Fuzzy fault tree assessment based on improved AHP for fire and explosion accidents for steel oil storage tanks. *J Hazard Mater.* 2014;278:529-538. doi:10.1016/j.jhazmat.2014.06.034
- Soto-Zazueta, I. M., & Figueroa-Elenes, J. R. (2018). Estimación del efecto de la alternancia sobre la provisión de servicios públicos locales en México. *Economía, sociedad y territorio*, 18(56), 195-231.
- Taylor, J. R. (2011). Analysing Process Plant Accident Consequences. *QRA Pro Manual*, 7(3). Denmark.
- Trujillo, A. (2017). El árbol de fallos y el análisis de importancia, dos herramientas para la optimización de la gestión de distintos tipos de riesgos. *Dekra Insight*, 1-12.
- Virtanen, S., Hagmark, P. E. & Penttinen, J. P. (2006). Modelling and Analysis of Causes and Consequences of Failures. *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. Newport Beach, CA, USA
- Wiley / CCPS. (2016). *Introduction to Process Safety for Undergraduates and Engineers*. First edition, Center for Chemical Process Safety. American Institute of Chemical Engineers. New York.
- Yasli, F., & Bolat, B. (2018). A risk analysis model for mining accidents using a fuzzy approach based on fault tree analysis. *Journal of Enterprise Information Management*, 31(4), 577-594.
- Yazdi, M., Mohammadpour, J., Li, H., (2023). Fault tree analysis improvements: A bibliometric analysis and literature review. *Qual Reliab Engng Int.*, 39, 1639–1659. <https://doi.org/10.1002/qre.3271>
- Yuechun W, Jing-ting W. (2009). *Risk management of financial holding company based on fault tree analysis*.

# VII. ANEXOS





- NOTES:
1. HEAT EXCHANGER FUTURE CONNECTION
  2. MANIFOLD FUTURE WELL CONNECTIONS
  3. WATER TREATMENT FUTURE CONNECTION
  4. CLEAN OUT CONNECTION

REFERENCE DRAWINGS:

THIS DRAWING IS MADE IN ELECTRONIC MEANS, DO NOT MODIFY MANUALLY.		APPROVAL SEAL
---	--	---------------

A2	REVISION DEL CLIENTE	14-07-14	E.L.	M.C.	K.C.
A1	REVISION INTERNA	03-07-14	E.L.	M.C.	K.C.
No	REVISION	DATE	REV	CHK	APP
		DATE	DATE	DATE	DATE

DESIGNED BY: MELDA CARDENAS  
 DRAWN BY: EFREN LOPEZ  
 CHECKED BY: MELDA CARDENAS  
 DATE: 09-07-14

APPROVED BY: KENNY COLINA  
 DATE: 11-07-14



PROJECT: CEPCA DESU

DESCRIPTION: PRUEBA DE PRODUCCION DEL POZO LA-1X - LOTE 131  
 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESOS

SCALE: SIN  
 DRAWING: WFT-CEP-PER-PFD-PL-001  
 SHEET: 01 OF 02  
 REV: A2

DATE PLOTTED: 2012-04-08  
 FORMATO No. 04-LA-00-REP-0008A, REV02