Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

Diseño y cálculo hidráulico del sistema contra incendio de agua y espuma en terminal de almacenamiento de hidrocarburos y químicos en el distrito del Callao – Lima – Perú

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

William Henry JIMENEZ MOCHCCO

ASESOR

Mg. Miguel Ernesto ARÁMBULO MANRIQUE

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

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

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

Referencia bibliográfica

Jimenez, W. (2026). *Diseño y cálculo hidráulico del sistema contra incendio de agua y espuma en terminal de almacenamiento de hidrocarburos y químicos en el distrito del Callao – Lima – Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	William Henry Jimenez Mochcco
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	72157305
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0007-2310-4282
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Miguel Ernesto Arámbulo Manrique
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07418845
URL de ORCID	https://orcid.org/000 0-0003-0989-8235
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Eliseo Paez Apolinario
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	19948335
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Adolfo Carlos Lozada Pedraza
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09383020
Datos de investigación	
Línea de investigación	Ingeniería Hidráulica
Grupo de investigación	-

Agencia de financiamiento	Financiamiento propio
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Callao Provincia: Callao Distrito: Callao Latitud: 12°02'37.5"S Longitud: 77°08'09.8"W
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2025-2026
URL de disciplinas OCDE	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.01

UNMSM
Firmado digitalmente por ARAMBULO MANRIQUE Miguel Ernesto FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 12.10.2026 14:41:17 -05:00

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú, Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PRESENCIAL PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO DE FLUIDOS

Siendo las 13:00 horas del viernes 28 de agosto del 2026, en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, bajo la presidencia del Mg. Ing. ELISEO PAEZ APOLINARIO y con la asistencia del asesor Mg. Ing. MIGUEL ERNESTO ARÁMBULO MANRIQUE, y miembro Mg. Ing. ADOLFO CARLOS LOZADA PEDRAZA se dio inicio a la sesión pública de sustentación de tesis para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, mediante la sustentación y aprobación de una tesis del Bachiller:

WILLIAM HENRY JIMENEZ MOCHCCO

El presidente del Jurado en primer lugar dio lectura al documento formal que designa al Jurado y aprueba el acto de sustentación de la tesis, así corno del resumen del expediente e invitó al citado Bachiller a realizar la presentación y exposición de su tesis titulada "DISEÑO Y CÁLCULO HIDRÁULICO DEL SISTEMA CONTRA INCENDIO DE AGUA Y ESPUMA EN TERMINAL DE ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS Y QUÍMICOS EN EL DISTRITO DEL CALLAO – LIMA – PERÚ."

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el presidente del mismo, invitó al Bachiller a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, se invitó al candidato a regresar a la Sala de Sesión, para dar lectura a la calificación obtenida por el Bachiller, la misma que es:

18	DIECIOCHO	CON HONORES
(NUMERO)	(LETRAS)	(MENCIÓN)

El presidente del Jurado Mg. Ing. ELISEO PAEZ APOLINARIO, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller WILLIAM HENRY JIMENEZ MOCHCCO, Ingeniero Mecánico de Fluidos.
Siendo las 14:00 horas del mismo día, se levanta la sesión.

Mg. Ing. ELISEO PAEZ APOLINARIO
PRESIDENTE

Mg. Ing. ADOLFO CARLOS LOZADA PEDRAZA
MIEMBRO TITULAR

Mg. Ing. MIGUEL ERNESTO ARÁMBULO MANRIQUE
ASESOR

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

Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **Miguel Ernesto Arambulo Manrique** en mi condición de asesor acreditado mediante Dictamen N° **007-EPIMF-2026-FCF/UNMSM** de la tesis, cuyo título es: **Diseño y cálculo hidráulico del Sistema Contra Incendio de Agua y Espuma en Terminal de Almacenamiento de Hidrocarburos y Químicos en El distrito del Callao – Lima – Perú**, presentado por el bachiller: **William Henry Jimenez Mochcco** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico de Fluidos**, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **6** % de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del Título Profesional de **Ingeniero Mecánico de Fluidos**

Lima, 13 de octubre del 2026



Firma del Asesor _____

Nombres y Apellidos del asesor: Miguel Ernesto Arambulo Manrique

DNI: 07418845

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

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

i. RESUMEN

La presente investigación aborda el problema de la seguridad contra incendios en terminales de almacenamiento de hidrocarburos y productos químicos, donde la combinación de sustancias inflamables, condiciones operativas y disposición de equipos genera escenarios con potencial de alta severidad. En este contexto, se identificó como problema principal la limitada capacidad de los sistemas contra incendios convencionales para responder de manera adecuada frente a eventos críticos, especialmente en situaciones donde la propagación del calor incrementa significativamente la exigencia del sistema.

A partir de ello, el objetivo de la investigación consistió en diseñar el sistema contra incendios basado en agua y espuma, con la finalidad de reducir el nivel de riesgo en el terminal de almacenamiento de la empresa Blending S.A.C., ubicado en el Callao, Lima–Perú. Para alcanzar este objetivo, se adoptó un enfoque centrado en el análisis de escenarios de incendio y en la determinación de la demanda hidráulica bajo condiciones representativas de operación.

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y con un nivel descriptivo–explicativo, empleando un diseño no experimental. La metodología se sustentó en el análisis técnico del sistema, la evaluación de escenarios de incendio y el desarrollo de cálculos hidráulicos, complementados con una base de investigación documental. Esta última permitió integrar criterios normativos y fundamentos de dinámica del fuego, transferencia de calor y mecánica de fluidos, asegurando coherencia técnica en los resultados obtenidos.

Los resultados evidencian que el escenario de incendio en el tanque TK-12 representa la condición más exigente del sistema, con un requerimiento de 749.0 gpm durante 240 minutos, equivalente a un volumen de 179,760 gal. En contraste, el escenario de almacenamiento interior demanda 399.47 gpm durante 15 minutos. Esta diferencia permite establecer que el parámetro que define el diseño no es únicamente el caudal, sino el tiempo de operación, el cual determina el volumen total necesario para el control del incendio.

La importancia del estudio radica en demostrar que el diseño de sistemas contra incendios debe sustentarse en el escenario de mayor severidad y no en condiciones promedio, ya que esto garantiza una respuesta adecuada frente a eventos críticos. En ese sentido, la investigación aporta un enfoque técnico que integra el análisis de escenarios con criterios hidráulicos y térmicos, permitiendo definir de manera más precisa la capacidad requerida del sistema.

Finalmente, el principal aporte consiste en establecer un criterio de diseño basado en la relación entre caudal, tiempo y volumen, aplicado a sistemas agua–espuma en instalaciones industriales, contribuyendo a mejorar la confiabilidad y desempeño de los sistemas contra incendios en terminales de almacenamiento.

ii. ABSTRACT

This research addresses the problem of fire safety in hydrocarbon and chemical storage terminals, where the combination of flammable substances, operating conditions, and equipment layout creates scenarios with the potential for high severity. In this context, the main problem identified was the limited capacity of conventional fire suppression systems to respond adequately to critical events, especially in situations where heat propagation significantly increases the demands placed on the system.

Therefore, the objective of this research was to redesign the water and foam-based fire suppression system to reduce the risk level at the Blending S.A.C. storage terminal, located in Callao, Lima, Peru. To achieve this objective, an approach focused on fire scenario analysis and determining the hydraulic demand under representative operating conditions was adopted.

The study was conducted using a quantitative, applied, and descriptive-explanatory approach, employing a non-experimental design. The methodology was based on the technical analysis of the system, the evaluation of fire scenarios, and the development of hydraulic calculations, complemented by a foundation of documentary research. This latter research allowed for the integration of regulatory criteria and fundamental principles of fire dynamics, heat transfer, and fluid mechanics, ensuring technical consistency in the results obtained.

The results show that the fire scenario in tank TK-12 represents the most demanding condition for the system, requiring 749.0 gpm for 240 minutes, equivalent to a volume of 179,760 gallons. In contrast, the indoor storage scenario demands 399.47 gpm for 15 minutes. This difference establishes that the parameter defining the design is not solely the flow rate, but rather the operating time, which determines the total volume necessary for fire control.

The importance of this study lies in demonstrating that the design of fire protection systems should be based on the most severe scenario and not on average conditions, as this guarantees an adequate response to critical events. In this regard, the research provides a technical approach that integrates scenario analysis with hydraulic and thermal criteria, allowing for a more precise definition of the system's required capacity.

Finally, the main contribution lies in establishing a design criterion based on the relationship between flow rate, time, and volume, applied to water-foam systems in industrial facilities, thus contributing to improved reliability and performance of fire suppression systems in storage terminals.

iii. PALABRAS CLAVES

iv. ACTA DE SUSTENTACIÓN

v. DEDICATORIA

A mis padres, Emiliano y Juliana.

Hubo momentos en que el dinero no alcanzaba. Aun así, siempre encontraron la forma de darme lo que necesitaba: el pasaje para llegar a clases, la laptop, la calculadora.

Nunca me dejaron quedarme atrás.

Este trabajo es, en parte, resultado de ese esfuerzo silencioso que jamás olvidaré.

vi. AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por ser el espacio donde todo esto tomó forma.

A mi asesor, Mag. Ing. Miguel Ernesto Arámbulo Manrique, por la orientación, la paciencia y su experiencia.

A mis profesores, por cada clase que me hizo ver los fluidos de otra manera.

A mis padres, Emiliano y Juliana. Ya lo dije en la dedicatoria, pero lo repito: hubo momentos difíciles y nunca me dejaron solos. Eso no se olvida.

A mi familia y amigos, por aguantar mis ausencias y aparecer justo cuando hacía falta.

A todos los que pusieron algo de sí para que esta tesis existiera.

INDICE GENARAL

Tabla de contenido

1. I. INTRODUCCIÓN 1

1.1. INTRODUCCIÓN 1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1
1.2.1. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA 3
1.2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 4
1.3. OBJETIVOS 5
1.3.1. Objetivo principal 5
1.3.2. Objetivos específicos 5
1.4. IMPORTANCIA Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN 6
1.4.1. Justificación teórica 7
1.4.2. Justificación práctica 7
1.4.3. Justificación social 7
1.4.4. Justificación económica 8
1.4.5. Justificación por conveniencia 8
1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN 8
2. II. REVISIÓN DE LITERATURA 9

2.1. MARCO TEÓRICO 9
2.2. ANTECEDENTES DE ESTUDIO 10
2.2.1. Antecedentes Internacionales 10
2.2.2. Antecedentes Nacionales 12
2.3. BASES TEÓRICAS 14
2.3.1. Incendios 14
2.3.2. Tipos de incendio y clasificación 15
2.3.3. Métodos de extinción de los incendios 15
2.3.4. Sistema Contra Incendio 16
2.3.5. Dispositivos de inicio de alarma contra incendios 20
2.3.6. Instalaciones que deberían contar con sistema contra incendio 22
2.3.7. Riesgo de Incendio 23
2.3.8. Terminales de almacenamiento de combustible 24
2.4. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS 25
2.4.1. Base legal y estándares aplicables 28

3. III. HIPÓTESIS Y VARIABLES 29

3.1. HIPÓTESIS 29

3.1.1. Hipótesis principal 30

3.1.2. Hipótesis específicas 30

3.2. VARIABLES 31

3.2.1. Variable independiente 31

3.2.2. Variable dependiente 33

3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES 35

4. 37

IV. MATERIALES Y MÉTODOS 38

4.1. ÁREA DE ESTUDIO 38

4.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN 40

4.2.1. Tipo y nivel de Investigación 40

4.2.2. Diseño de la investigación 40

4.2.3. Enfoque de la investigación 41

4.3. POBLACIÓN Y MUESTRA 41

4.3.1. Población o universo de estudio 41

4.3.2. Muestra 44

4.4. PROCEDIMIENTOS. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN 44

4.4.1. Técnica de recolección de datos 44

4.5. Análisis e interpretación de la información 47

4.5.1. Etapas del análisis 47

4.6. Validez y confiabilidad de los instrumentos 49

4.6.1. Procedimientos 49

5. V. RESULTADOS 52

5.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS 52

5.1.1. Caracterización del sistema y distribución del terminal 52

5.1.2. Caracterización del riesgo según sustancias almacenadas 56

5.1.3. Identificación de escenarios de incendio 61

5.1.4. Evaluación del riesgo de incendio 69

5.1.5. Determinación de la demanda de espuma para incendio por derrame en almacenamiento interior 81

5.1.6. Análisis y cálculo del escenario 3: incendio en patio de tanques (TK-12) 91
5.1.7. Análisis integrado de escenarios de incendio 108
5.1.8. Determinación del escenario crítico de diseño 110
5.1.9. Validación de resultados del modelo de cálculo 115
5.1.10. Validación y comprobación de hipótesis 121
5.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS 139
6. VI. DISCUSIÓN 144
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 146
7.1. CONCLUSIONES 146
7.2. RECOMENDACIONES 149
8. BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS 152
8.1. REFERENCIAS 152
8.2. ANEXOS 158
8.2.1. Anexo 1. Matriz de consistencia 158
8.2.2. ANEXO 2. Base legal y estándares aplicados 161
8.2.3. Anexo 3: Productos almacenados 163
8.2.4. Anexo 4: Sistema de primera respuesta 165
8.2.5. Anexo 5: Señalización del sistema 167
8.2.6. Anexo 6: Relación de equipos y componentes del sistema de agua y espuma contra incendios 171
8.2.7. Anexo 7: Cálculo Hidráulico de la Red de Distribución — Escenario Crítico (TK-12) 176
8.2.8. Anexo 8: Plano de Planta General Esquemático — Escenario Crítico TK-12 178

INDICE DE TABLA

TABLA	DESCRIPCIÓN	PAGINA
1	Matriz de operacionalización de variables	52
2	Técnicas de recolección de datos	63
3	Comparación de niveles de riesgo - Cualitativa	97
4	Comparación de niveles de riesgo – Cuantitativa – Matriz P vs C	98
5	Matriz de interpretación	99
6	Matriz de interpretación	102
7	Comparación de comportamiento hidráulico	128
8	Comparación de escenarios de incendio	132
9	Densidades de aplicación para espuma (NFPA 11)	135
10	Densidades de enfriamiento de tanques	137
11	Tiempo de aplicación según tipo de sistema	138
12	Demanda hidráulica por escenario de incendio	143
13	Comparación del impacto de escenarios	146
14	Identificación de condiciones que influyen en la probabilidad de incendio	149
15	Demanda hidráulica del sistema contra incendios	152
16	Relación entre escenario, fenómeno físico y sistema requerido	156
17	8.2.1. Anexo 1. Matriz de consistencia	178

INDICE DE FIGURA

FIGURA	DESCRIPCIÓN	PAGINA
1	Ubicación de la planta.	55
2	Vista de almacenamiento al aire libre # 1	56
3	Vista de camión en zona de almacenamiento al aire libre # 1	57
4	Almacén principal	60
5	Zona de almacenamiento al aire libre #1	60
6	Patio de tanques 1	61
7	Plano general del terminal de almacenamiento	74
8	Clasificación de sustancias en almacenamiento interior	77
9	Clasificación de sustancias en almacenamiento exterior (tanques)	80

10	Condición de incendio en almacenamiento interior	83
11	Esquema de exposición térmica entre tanques (TK-12)	84
12	Almacen N° 1 Interior	87
13	TK-12 Esquema de exposición térmica entre tanques	88
14	Esquema de exposición térmica entre tanques (TK-12)	113

I. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial, los incendios industriales siguen siendo una de las principales fuentes de riesgo en instalaciones que manejan sustancias inflamables, con capacidad de generar consecuencias severas en el plano humano, económico y ambiental. La Organización Mundial de la Salud estima entre 180,000 y 230,000 muertes anuales por incendios, además de millones de lesiones graves (WHO, 2018; WHO, 2023) — cifra que se traduce, en el terreno económico, en cientos de miles de millones de dólares en pérdidas directas e indirectas por daños a infraestructura, interrupción operativa y costos de recuperación (National Fire Protection Association, 2022; Swiss Re, 2020). Desde la ingeniería, buena parte de estos eventos se atribuye a deficiencias en el diseño de los sistemas de protección, particularmente cuando no se contemplan escenarios de incendio realistas ni el comportamiento térmico del fuego bajo condiciones operativas reales (Drysdale, 2011; Quintiere, 2017). El enfoque moderno exige diseñar en función del desempeño y del análisis de riesgo —incorporando radiación térmica, propagación del fuego y propiedades fisicoquímicas del combustible—, variables que los diseños convencionales suelen subestimar (Hurley et al., 2016; SFPE, 2019).

En América Latina, esta problemática se complica por brechas en la implementación de normas técnicas y en la fiscalización. Según la National Fire Protection Association, la región concentra cerca del 8% de la población y el PBI mundial, pero cuenta con menos del 1% de los sistemas de rociadores automáticos instalados a nivel global (NFPA, 2022; Torero, 2013) — una desproporción que refleja el rezago en protección contra incendios. A esto se suma la tendencia, documentada en

países en desarrollo, de adoptar normativa internacional sin adaptarla a las condiciones locales, lo que produce sistemas que no responden eficazmente ante eventos reales (Meacham, 2016; Babrauskas, 2018), agravada por una cultura de gestión de riesgo todavía débil y la falta de bases de datos técnicas que permitan evaluar el desempeño real de los sistemas existentes (Beard & Carvel, 2012; Torero, 2013).

En el Perú, la seguridad contra incendios industriales se rige principalmente por el Reglamento de Seguridad para las Actividades de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas —que fija lineamientos generales, pero no necesariamente criterios de diseño detallados para sistemas complejos como los de agua y espuma en terminales de almacenamiento (Ministerio de Energía y Minas, 2007; García, 2022). En la práctica, diversos estudios nacionales muestran sistemas diseñados sin un análisis riguroso del escenario de mayor riesgo, limitándose al cumplimiento mínimo normativo sin considerar variables como la radiación térmica, la interacción entre tanques o la dinámica de propagación (Carrasco, 2023; D'ugard & Díaz, 2023) — una vulnerabilidad que se acentúa en zonas como el Callao, con alta concentración de actividades de almacenamiento y distribución de hidrocarburos (García, 2022; Ministerio de Energía y Minas, 2007).

El terminal de la empresa Blending S.A.C. no escapa a este panorama: la presencia de hidrocarburos y productos químicos, la disposición de tanques y áreas de almacenamiento, y la existencia de múltiples fuentes de ignición configuran un escenario de riesgo significativo, con potencial de incendios tanto en espacios confinados como en áreas abiertas —propagación del fuego, radiación térmica intensa y afectación de instalaciones adyacentes incluidas. Lees (2012) y Crowl y Louvar (2019) son claros en que este tipo de instalación exige sistemas diseñados a partir del peor caso posible, no de condiciones promedio; cuando ese criterio no se aplica con

rigor, el sistema termina con deficiencias de caudal, presión o cobertura que comprometen su respuesta real ante una emergencia (API, 2020; NFPA, 2022) — de ahí la necesidad de un diseño técnico que garantice eficiencia y confiabilidad operativa.

La relevancia de este trabajo está justamente en abordar un problema crítico de instalaciones industriales de alto riesgo, donde un incendio mal gestionado puede escalar a consecuencias catastróficas (Lees, 2012; Crowl y Louvar, 2019), aplicando metodologías de análisis de riesgo que reduzcan la brecha entre la normativa vigente y su aplicación práctica en el contexto peruano (Meacham, 2016; NFPA, 2022). El aporte concreto es el diseño del sistema agua-espuma a partir de la evaluación de escenarios críticos y el cálculo hidráulico correspondiente — un desarrollo que, más allá de esta instalación puntual, puede servir de referencia para sistemas similares en el sector industrial nacional (Drysdale, 2011; SFPE, 2019).

1.2.1. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

El terminal de Blending S.A.C., en el Callao, presenta condiciones operativas que elevan el riesgo de incendio: presencia de sustancias inflamables, disposición de tanques y áreas de almacenamiento, y la interacción entre fuentes de ignición y materiales combustibles. Esa combinación puede derivar en un incendio de rápida propagación y alta intensidad térmica, con riesgo directo para las instalaciones, el personal y el entorno cercano. Lees (2012) y Crowl y Louvar (2019) enmarcan el riesgo de incendio en instalaciones de este tipo como función de dos variables —probabilidad de ocurrencia y magnitud de las consecuencias—, ambas necesarias para definir medidas de control adecuadas; sin un análisis detallado de los escenarios de mayor riesgo, el sistema de protección pierde capacidad de respuesta efectiva frente a eventos críticos, lo que puede traducirse en fallas operativas durante una emergencia real (API, 2020; NFPA, 2022).

1.2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El análisis anterior deja en evidencia que el sistema contra incendio del terminal presenta limitaciones técnicas en su diseño hidráulico, en la consideración de escenarios críticos y en la ausencia de un enfoque basado en análisis de riesgo — deficiencias que comprometen su capacidad de respuesta, sobre todo ante líquidos inflamables y vapores combustibles capaces de generar alta radiación térmica y propagación rápida del fuego.

Formular el problema es, desde la ingeniería de seguridad, el paso que traduce una situación problemática en preguntas concretas capaces de orientar tanto la metodología como los resultados (Hernández Sampieri et al., 2014; Bernal, 2010) — preguntas que deben mantenerse coherentes con los objetivos y las variables de estudio, para que el análisis apunte directamente a la solución del problema identificado.

1.2.2.1. Problema Principal

Con lo expuesto anteriormente podemos formular el problema principal con la siguiente interrogante:

¿Cómo diseñar un sistema agua espuma para reducir el riesgo de incendio en el terminal de almacenamiento de hidrocarburos y químicos de la empresa Blending S.A.C. en la región del Callao, Lima-Perú?

1.2.2.2. Problemas específicos

1. ¿Cómo determinar el impacto de diferentes escenarios de riesgo de incendio para establecer el nivel de protección en el terminal de almacenamiento de hidrocarburos y químicos de la empresa Blending S.A.C. en la región del Callao, Lima-Perú?

2. ¿Cómo determinar los parámetros de diseño que permitan el dimensionamiento del sistema contra incendio que reduzca el riesgo en el terminal de

almacenamiento de hidrocarburos y químicos de la empresa Blending S.A.C. en la región del Callao, Lima-Perú?

3. ¿Cómo determinar el consumo de agua y concentrado de espuma para identificar la mayor demanda en el terminal de almacenamiento de hidrocarburos y químicos de la empresa Blending S.A.C. en la región Callao, Lima-Perú?

4. ¿Cómo seleccionar el sistema adecuado que permita la elección de equipos contra incendio en el terminal de almacenamiento de hidrocarburos y químicos de la empresa Blending S.A.C. en la región Callao, Lima-Perú?

1.3. OBJETIVOS

Los objetivos de esta investigación funcionan como la estructura operativa orientada a resolver las deficiencias técnicas detectadas en el sistema contra incendio. En un estudio de carácter aplicado, los objetivos no solo delimitan el alcance — también fijan las acciones concretas que convierten una situación problemática en una solución técnica verificable (Tamayo y Tamayo, 2004; Sabino, 2014). Su formulación responde, en este caso, a un enfoque netamente ingenieril, donde el análisis, el cálculo y el diseño son los tres pilares del proceso investigativo.

1.3.1. Objetivo principal

Planteado el problema principal, se propone el siguiente objetivo:

"Diseñar un sistema agua espuma para reducir el riesgo de incendio en la terminal de almacenamiento de hidrocarburos y químicos de la empresa Blending S.A.C. en la región Callao, Lima-Perú."

1.3.2. Objetivos específicos

Planteamos los siguientes objetivos específicos:

1. Determinar el grado de impacto de los diferentes escenarios de riesgo de incendio, para establecer el nivel de protección en el terminal de almacenamiento de hidrocarburos y químicos de la empresa Blending S.A.C. en la región del Callao, Lima-Perú.

2. Determinar los parámetros de diseño que permita el dimensionamiento del sistema contra incendio que reduzca el riesgo en el terminal de almacenamiento de hidrocarburos y químicos de la empresa Blending S.A.C. en la región Callao, Lima-Perú.

3. Determinar el consumo de agua y concentrado de espuma para identificar la mayor demanda en el terminal de almacenamiento de hidrocarburos y químicos de la empresa Blending S.A.C. en la región Callao, Lima-Perú.

4. Seleccionar el sistema adecuado que permita la elección correcta del equipo contra incendio en el terminal de almacenamiento de hidrocarburos y químicos de la empresa Blending S.A.C. en la región Callao, Lima-Perú.

1.4. IMPORTANCIA Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

La importancia y el alcance de un estudio se sostienen en su capacidad de generar conocimiento útil, resolver problemas concretos y aportar al desarrollo técnico de su área. Justificar una investigación no es solo demostrar que es necesaria, sino también que es pertinente y aplicable dentro de su contexto específico (Kerlinger & Lee, 2002; Hernández Sampieri et al., 2014) — evidenciando su valor en el plano teórico, práctico, social y económico, tanto para el conocimiento existente como para la solución de problemas reales (Creswell, 2014; Flick, 2015).

En ingeniería aplicada, esa importancia está directamente ligada a la capacidad de generar soluciones técnicas eficientes frente a problemas reales — como es, en este caso, la seguridad contra incendios en instalaciones industriales de alto riesgo. Por eso

el presente estudio justifica su desarrollo desde varios frentes, que en conjunto permiten entender su impacto y alcance real.

1.4.1. Justificación teórica

En el plano teórico, esta investigación busca fortalecer el conocimiento existente sobre el diseño de sistemas contra incendio basados en agua y espuma, integrando criterios de análisis de riesgo y cálculo hidráulico. Generar este tipo de conocimiento no se limita a describir el fenómeno — también busca explicarlo y establecer relaciones entre variables, algo esencial para construir modelos aplicables en ingeniería (Bunge, 2004; Popper, 2002).

1.4.2. Justificación práctica

Prácticamente, esta investigación se justifica por su orientación directa a resolver un problema concreto de seguridad contra incendios en el almacenamiento de hidrocarburos y productos químicos. Una investigación aplicada, en ingeniería, se distingue justamente por transformar conocimiento en soluciones técnicas implementables en condiciones reales (Hernández Sampieri et al., 2014; Tamayo y Tamayo, 2004).

En este caso puntual, el diseño del sistema contra incendio mejorará la capacidad de respuesta ante escenarios críticos, optimizando caudal, presión y distribución. Peters et al. (2003) y Towler y Sinnott (2013) coinciden en que un diseño industrial adecuado no solo mejora la eficiencia operativa, sino que reduce riesgos de falla y eventos no deseados — reforzando así la aplicabilidad práctica de este estudio.

1.4.3. Justificación social

Socialmente, este estudio se sustenta en la necesidad de proteger la vida humana, el entorno laboral y el medio ambiente frente al riesgo de incendios industriales. Una investigación científica gana relevancia social justamente cuando contribuye a mejorar

las condiciones de seguridad y bienestar de las personas, sobre todo en contextos de riesgo significativo (Arias, 2012; Ñaupas et al., 2014).

1.4.4. Justificación económica

El diseño también se sustenta económicamente: invertir en un sistema contra incendio adecuado representa un costo muy inferior frente a las pérdidas que generaría un evento no controlado. Blank y Tarquin (2012) y Sullivan et al. (2015) coinciden en que la evaluación de proyectos de ingeniería debe sopesar el costo de implementación contra el beneficio de mitigar ese riesgo — lógica que aplica directamente a este caso.

1.4.5. Justificación por conveniencia

Resulta conveniente realizar esta investigación porque la empresa Blending S.A.C. dispone de la información operativa y el acceso a planta necesarios para un análisis técnico completo, lo que permite desarrollar un diseño aplicable directamente a sus condiciones reales, en lugar de un ejercicio teórico desconectado del contexto industrial).

1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio enfrenta limitaciones ligadas a la disponibilidad de información técnica: al basarse en datos operativos existentes y, en ciertos casos, en simulación de escenarios críticos, la estimación de variables hidráulicas —caudal, presión, tiempos de respuesta— conlleva un grado de incertidumbre. Como señala Hernández Sampieri (2014), la confiabilidad de cualquier resultado depende ante todo de la calidad del dato de entrada.

Además, al circunscribirse a un terminal específico del Callao, sus hallazgos responden a las condiciones particulares de esa instalación y no son directamente extrapolables a otras — algo coherente con el carácter contextual que Creswell (2014) atribuye a los estudios de caso. El dimensionamiento hidráulico, por su parte, se apoya

en modelos normativos internacionales que asumen simplificaciones, por lo que los resultados deben leerse como aproximaciones técnicas y no como valores exactos (Bunge, 2004). La aplicación de estándares NFPA y API tampoco captura automáticamente las condiciones locales, lo que exige criterio de interpretación al implementarlos. Finalmente, quedan fuera del alcance el análisis de costos y las restricciones de confidencialidad de la empresa —que obligaron a trabajar con datos parciales y anonimizados— junto con las limitaciones de tiempo que impidieron una validación experimental completa.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO TEÓRICO

Este marco teórico busca sustentar conceptualmente el diseño del sistema agua-espuma frente a las deficiencias detectadas en su configuración actual, partiendo de un punto clave: entender cómo se comporta el fuego en ambientes industriales y cómo interactúa con los sistemas de supresión. Karlsson y Quintiere (2000) son claros en que analizar el desarrollo del incendio y sus variables térmicas es indispensable para definir estrategias de control efectivas; Torero (2013) va más allá y plantea que la ingeniería de seguridad contra incendios debe combinar la física del fenómeno con criterios de diseño orientados a mitigar el riesgo.

Tratándose de instalaciones que almacenan hidrocarburos, el análisis de riesgo cobra un peso central —la naturaleza inflamable del producto y el potencial de eventos severos así lo exigen. Por eso el marco teórico integra fundamentos de análisis de riesgo industrial, que permiten identificar los escenarios críticos y fijar condiciones de diseño más exigentes. Kletz (2001) sostiene que buena parte de los accidentes industriales es prevenible mediante identificación oportuna de peligros; Mannan (2012) añade que el

diseño seguro debe ponderar tanto la probabilidad de que algo ocurra como la magnitud de sus consecuencias.

2.2. ANTECEDENTES DE ESTUDIO

Revisar antecedentes es un paso que sostiene el problema de investigación y orienta el rumbo del diseño. La búsqueda se centró en estudios sobre análisis de riesgo de incendio, diseño de sistemas contra incendio y cálculo hidráulico en entornos industriales, alineados con el objetivo principal del trabajo. Bernal (2010) recuerda que revisar antecedentes sirve para ubicar el problema dentro del conocimiento ya existente, mientras Flick (2015) apunta que esta etapa ayuda a identificar enfoques metodológicos y técnicos útiles para el propio estudio.

La búsqueda se apoyó en Google Scholar, repositorios universitarios y bibliotecas digitales, priorizando tesis, artículos científicos y publicaciones técnicas del área de seguridad contra incendios, con un criterio de antigüedad máxima de cinco años para garantizar vigencia normativa y metodológica. Hernández-Sampieri et al. (2014) subrayan que toda búsqueda sistemática debe guiarse por pertinencia y actualidad; Ñaupas et al. (2014) agregan que apoyarse en fuentes recientes refuerza la validez científica del trabajo.

2.2.1. Antecedentes Internacionales

Velazquez A. (2024). DISTRIBUCIÓN DE COMBUSTIBLES CUAUTITLÁN (CEDICO) ESTUDIO DE VULNERABILIDAD Y RIESGO. Tesis de Grado. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO.

Resumen:

Velázquez (2024) analiza el caso de CEDICO en el Estado de México, donde el crecimiento urbano ha multiplicado la presencia de establecimientos comerciales sujetos a normativa de protección civil. Su punto de partida es el Análisis de

Vulnerabilidad y Riesgo (AVR), definido por la norma estatal de 2017 como el instrumento técnico que evalúa riesgos de origen químico-tecnológico dentro y fuera de una instalación. El autor identifica un vacío relevante: el Estado de México carece de un instrumento normativo unificado para desarrollar estos análisis, lo que genera discrecionalidad tanto en quienes los elaboran como en quienes los evalúan.

El motivo para incluir este antecedente es directo: el AVR es la base metodológica de la que también se sirve la presente investigación. Su aporte se concentra en tres ideas — la importancia de analizar el riesgo antes de diseñar, la relación entre riesgo, entorno y consecuencias, y la necesidad de metodologías estructuradas y homologables

Rojas A. (2022). ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO Y SEGURIDAD AL SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIO DE PATIO 1 Y PATIO 2 DE LA TERMINAL DE COMBUSTIBLES GUALANDAY. Tesis de Grado. UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO. IBAGUÉ, COLOMBIA

Resumen:

Rojas (2022) evaluó el funcionamiento y la seguridad del sistema de protección contra incendio en los Patios 1 y 2 de la Terminal de Combustibles Gualanday, en Colombia, tomando como referencia los requerimientos mínimos de la NFPA. El eje de su trabajo fue verificar que los distintos escenarios críticos propios de una terminal de combustibles estuvieran efectivamente cubiertos por el sistema instalado, para lo cual partió de entender el objetivo, el funcionamiento y el diseño vigente del sistema. Como resultado, entregó documentación operativa —procedimientos de funcionamiento por escenario, actualización del plan de emergencias y lineamientos de capacitación al personal— orientada a sostener el cierre de recomendaciones de estudios previos.

Se incluye este antecedente por su cercanía directa con el enfoque de la presente investigación: ambos analizan sistemas contra incendio en terminales de combustibles bajo normativa NFPA, con énfasis en escenarios críticos y capacidad real de cobertura ante emergencias

Yusoff, (2020) documentó el caso de la central eléctrica KY Power Station, en Sabah, Malasia, una instalación de dos turbinas a gas que combina cinco sistemas de protección contra incendio —agua pulverizada, espuma, extinción con dióxido de carbono, boquillas presurizadas y detección de alarmas— conforme a normativa NFPA. Su aporte principal no está en el diseño de cada sistema por separado, sino en la conclusión: optimizar cada sistema de forma individual no basta, porque sus funciones objetivas particulares pueden entrar en conflicto entre sí, lo que exige un enfoque de optimización multiobjetivo a nivel global.

Este antecedente aporta una capa de análisis más avanzada que los anteriores, al introducir la idea de diseño integral entre múltiples sistemas (agua, espuma, CO_2) en lugar de tratarlos como componentes aislados — un enfoque basado en desempeño que enriquece la perspectiva de la presente tesis

2.2.2. Antecedentes Nacionales

D'ugard y Díaz A. (2023). "DISEÑO DE UN SISTEMA PARA REDUCIR EL RIESGO DE INCENDIO EN LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE LÍQUIDOS INFLAMABLES DE CAPACIDAD DE 250 m3 EN LA PLANTA DE SEFREL INGENIEROS – LIMA". Tesis de Grado. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

Resumen:

D'ugard y Díaz (2023) abordaron una problemática similar en la planta de SEFREL Ingenieros, donde la ausencia de un sistema de mitigación exponía a la

instalación a un radio de afectación de hasta 500 metros ante un evento de incendio. Frente a este escenario, plantearon el diseño de un sistema de suministro agua-espuma orientado a reducir dicho riesgo, partiendo de un levantamiento de información que permitió caracterizar cada área de la planta antes de dimensionar la solución.

Carrasco P. (2023). "Diseño y Optimización del Sistema Contra Incendio de un Tanque de Almacenamiento de Hidrocarburos en Planta de Ventas Piura". Tesis de grado. Universidad de Piura.

Resumen:

Un caso comparable es el de Carrasco (2023), centrado en un tanque de almacenamiento de hidrocarburos en Piura. Su punto de partida fue reconocer que el volumen y la clasificación del tanque determinan directamente el estudio de riesgos aplicable, y a partir de ahí desarrolló el diseño y optimización del sistema contra incendio tomando como referencia la normativa nacional e internacional vigente, con estudios de enfriamiento por agua y de espuma que variaron diámetros de tubería y factores K de los aspersores para optimizar caudal, presión y costo.

García E. (2022). Cálculo hidráulico y rediseño de un sistema de agua contra incendio para un terminal de almacenamiento de combustible Turbo A1 en el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez, Lima – Perú, 2021. Tesis de grado. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Resumen:

El antecedente más cercano geográfica y técnicamente es el de García (2022), centrado en la planta de EMAP en el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez, operativa desde 2005 con tres tanques verticales de combustible Turbo A1. La ampliación prevista del aeropuerto —y la instalación de un cuarto tanque— obligó a rediseñar el sistema contra incendio bajo una restricción clave: no incrementar la demanda de agua existente.

La solución combina una red de enfriamiento por aspersores, hidrantes con mangueras de chorro y niebla, y un sistema de espuma.

Este antecedente resulta particularmente relevante por tratarse de un rediseño real en un terminal de combustible limeño, bajo la misma lógica de optimizar el sistema agua-espuma sin disparar el consumo hídrico — un paralelo directo con el enfoque de la presente tesis.

2.3. BASES TEÓRICAS

2.3.1. Incendios

Un incendio es, en esencia, un proceso de combustión que se sale de control: libera energía en forma de calor y radiación, y con ello genera daños en la estructura, en las personas y en el entorno, incluyendo la emisión de gases nocivos. Desde la ingeniería, entender un incendio implica mirar la interacción entre tres elementos — combustible, comburente y fuente de ignición— y cómo esa combinación se propaga según las condiciones del entorno. Karlsson y Quintiere (2000) señalan que ese comportamiento depende de variables como la carga térmica, la ventilación y la geometría del espacio; Torero (2013) agrega que predecir cómo se desarrollará el incendio es la base para diseñar sistemas de protección realmente eficientes.

El modelo que explica este proceso es el tetraedro del fuego: combustible, oxígeno, energía de activación y reacción en cadena. Basta con eliminar uno de los cuatro para cortar la combustión — de ahí parten, de hecho, todos los métodos de extinción que se explican más adelante. Drysdale (2011) precisa que la evolución del incendio está gobernada por la transferencia de calor —conducción, convección y radiación—, mientras que Babrauskas (2018) identifica la liberación de calor como el parámetro más crítico para medir qué tan severo es un fuego en un entorno industrial.

2.3.2. Tipos de incendio y clasificación

La clasificación de un incendio depende del tipo de combustible involucrado. En instalaciones de hidrocarburos, los de Clase B son los más relevantes por la presencia de líquidos inflamables: se propagan rápido, liberan mucha energía y son difíciles de controlar, sobre todo en tanques de almacenamiento. Heskestad (2002) explica que estos incendios generan plumas térmicas de alta radiación que aumentan el riesgo de que el fuego se propague a instalaciones vecinas; Mudan (2015) advierte además sobre el fenómeno de "boilover", capaz de intensificar dramáticamente la magnitud del evento. El comportamiento del fuego en un tanque depende, a su vez, del diámetro del tanque, el tipo de combustible y las condiciones ambientales — API (2020) recomienda diseñar considerando escenarios de incendio de superficie total o parcial, y NFPA (2022) insiste en que el agente extintor debe elegirse según la naturaleza específica del combustible.

Clase	Combustible típico	Agente recomendado	Consideración clave
A	Madera, papel, tela, plásticos	Agua, espuma, polvo químico	Común en oficinas y almacenes
B	Gasolina, aceites, disolventes, gases	Espuma, polvo químico seco, CO_2	Alta volatilidad; nunca usar chorro directo de agua
C	Equipos eléctricos energizados	Agentes no conductores (CO_2, polvo)	Cortar la energía antes de intervenir
D	Magnesio, titanio, sodio, potasio	Polvos especiales para metales	El agua puede provocar reacción violenta
K	Aceites y grasas de cocina	Agentes químicos a base de potasio	Nunca usar agua: dispersa el aceite caliente

En todos los casos, el factor común es la capacitación: usar el extintor equivocado agrava el incendio más que combatirlo, por lo que la seguridad personal y el criterio profesional priman sobre la rapidez de reacción.

2.3.3. Métodos de extinción de los incendios

Extinguir un incendio consiste, en el fondo, en romper el tetraedro del fuego eliminando alguno de sus cuatro elementos. Grant et al. (2000) vinculan la eficacia de un agente extintor con su capacidad de absorber calor y bajar la temperatura del sistema;

Morgan (2013) destaca la espuma como uno de los métodos más eficientes específicamente en incendios de hidrocarburos, porque forma una capa que aísla el combustible del oxígeno, reduce la evaporación y evita la reignición — algo que Chitty (2016) atribuye directamente a la tasa de descarga y la calidad de la mezcla aplicada, mientras NFPA (2022) fija los parámetros mínimos para garantizar esa efectividad en líquidos inflamables.

2.3.3.1. Eliminación del combustible

Cortar la fuente, ya sea cerrando una válvula de suministro o retirando material inflamable de la zona de trabajo.

2.3.3.2. Sofocación

Retirar el oxígeno de la ecuación, desde tapar una sartén ardiendo hasta trabajar en atmósferas inertizadas en entornos industriales.

2.3.3.3. Inhibición

Interrumpir la reacción en cadena a nivel químico, como hacen los extintores de Polvo Polivalente ABC al introducir radicales libres que absorben calor en una reacción endotérmica.

2.3.3.4. Refrigeración

Bajar la energía calórica del sistema hasta frenar el proceso de oxidación, el mecanismo detrás tanto del agua como del propio Polvo ABC.

2.3.4. Sistema Contra Incendio

Un sistema contra incendio es, en conjunto, el equipo, los dispositivos y las estrategias que permiten prevenir, detectar y controlar un incendio en una instalación industrial. Se dividen en dos grandes familias: los activos, que detectan y extinguen directamente, y los pasivos, que limitan la propagación. SFPE (2019) es enfático en que ninguna de las dos basta por sí sola — la protección integral exige integrarlas —, y

Meacham (2016) agrega que el diseño moderno debe apoyarse en criterios de desempeño y análisis de riesgo, no solo en checklist normativo.

En una instalación de hidrocarburos, el lado activo incluye redes de agua, sistemas de espuma, bombas contra incendio y detección — todos deben operar de forma coordinada para que la respuesta sea efectiva. Mannan (2012) sostiene que la confiabilidad del sistema depende de su diseño, mantenimiento y capacidad de reacción ante escenarios críticos; Kletz (2001) va más allá al señalar que buena parte de las fallas de seguridad tienen origen en errores del diseño inicial, no en el mantenimiento posterior.

Sistemas pasivos — actúan conteniendo y aislando el fuego: puertas cortafuego (retrasan la propagación y ganan tiempo de evacuación), selladores de penetraciones (evitan que fuego y humo crucen por ductos o cableado), materiales resistentes al fuego, y divisiones de riesgo mediante muros y pisos cortafuego.

Sistemas activos — detectan y extinguen de forma directa y automática: detección y alarma (sensores de humo, calor o llama), rociadores automáticos (se activan por calor y descargan agua o agente extintor), extinción por gas (ideal donde el agua dañaría equipos electrónicos), y bombas y mangueras para acceso rápido al suministro de agua.

La combinación de ambas familias es lo que realmente sostiene una gestión integral: detección temprana y respuesta automática, por un lado, contención y limitación de daños por el otro.

A nivel de componentes, una red contra incendios agrupa dos frentes: el de alerta temprana (detectores de humo y gas, sensores de humedad, palancas manuales, sistemas de evacuación por voz) y el de control directo (sistemas fijos de extinción, extintores portátiles, columnas secas). El dimensionamiento hidráulico de todo esto —caudal,

presión, pérdidas de carga, diámetros de tubería y selección de bombas— es lo que en última instancia determina si el sistema cumple. White (2011) vincula el comportamiento del flujo con la rugosidad y velocidad del fluido; Çengel y Cimbala (2014) insisten en que el cálculo debe equilibrar eficiencia y seguridad operativa; Fox et al. (2015) exigen que la red garantice entrega simultánea de caudal en múltiples puntos, y Mott (2006) recuerda no subestimar las pérdidas menores del sistema.

2.3.4.1. Clasificación de los sistemas contra incendio

Los sistemas contra incendios desempeñan un papel crucial tanto en la prevención como en la respuesta efectiva ante emergencias. Se dividen principalmente en dos categorías fundamentales: sistemas activos y sistemas pasivos. En este blog, explicaremos detalladamente estas clasificaciones para comprender su función y cómo trabajan en conjunto para proporcionar una defensa completa contra incendios.

2.3.4.1.1. Sistemas pasivos

Los sistemas pasivos se centran en la contención y aislamiento del fuego, limitando su propagación y minimizando daños. Algunas de las soluciones de sistemas pasivos incluyen:

Puertas Cortafuego: Diseñadas para resistir el fuego durante un período específico, estas puertas ayudan a prevenir la propagación rápida del fuego de una zona a otra, proporcionando tiempo adicional para evacuación y respuesta de emergencia.

Selladores de Penetraciones: Instalados alrededor de aberturas en paredes y techos, como conductos y cables, estos selladores impiden que el fuego y el humo se extiendan, manteniendo la integridad de las barreras contra incendios.

Materiales Resistentes al Fuego: Utilizando materiales inherentemente resistentes al fuego o aplicando recubrimientos ignífugos, se busca limitar la capacidad del fuego para afectar la estructura del edificio.

Divisiones de Riesgos: La segmentación adecuada de un edificio en zonas de riesgo ayuda a evitar la propagación del fuego, incluyendo muros cortafuego y pisos resistentes al fuego.

2.3.4.1.2. Sistemas activos

Los sistemas activos consisten en dispositivos y equipos diseñados para detectar, controlar y extinguir incendios de manera directa. Su principal ventaja radica en su capacidad para responder automáticamente ante la detección de un incendio. Algunas soluciones son:

Sistemas de Detección y Alarma: Sistema equipado con sensores de humo, calor o llamas, estos sistemas detectan un incendio en sus etapas iniciales y activan alarmas audibles o visuales para alertar a las personas presentes y a los servicios de emergencia.

Rociadores Automáticos: Son activados por la detección de calor y descargan agua o agentes extintores para controlar o extinguir el fuego. Su rápida respuesta ayuda a mantener la situación bajo control hasta la llegada de los bomberos.

Sistemas de Extinción por Gas: Utilizan agentes extintores gaseosos para sofocar el fuego sin dañar los equipos electrónicos u otros activos sensibles, siendo ideales para entornos donde el agua podría causar daños adicionales.

Sistemas de Bombas y Mangueras: Facilitan el acceso rápido al suministro de agua y permiten a los equipos de emergencia combatir el fuego de manera efectiva.

En resumen, la combinación efectiva de sistemas activos y pasivos es esencial para una gestión integral contra incendios. La detección temprana y la respuesta automática se complementan con la contención y la limitación de daños, asegurando la seguridad de las personas y la preservación de bienes.

2.3.4.1.3. Elementos de un sistema contra incendio activo

Una red contra incendios rara vez funciona con un solo sistema — normalmente combina varios operandos en conjunto. Por un lado, está el frente de alerta temprana: detectores de humo y de gas, sensores de humedad, palancas manuales y sistemas de evacuación por voz, cuya función es avisar antes de que la situación escale. Por otro, el frente de intervención directa: sistemas fijos de extinción, extintores portátiles y columnas secas, que actúan sobre el incendio ya iniciado.

2.3.4.1.4. Sistemas hidráulicos contra incendio

El dimensionamiento hidráulico de estos sistemas —caudal, presión, pérdidas de carga, diámetros y selección de bombas— ya se desarrolló en la sección 2.3.5, donde se detallan los criterios normativos NFPA aplicables y los fundamentos de mecánica de fluidos que sustentan el cálculo.

2.3.5. Dispositivos de inicio de alarma contra incendios

El sistema de alarma cumple una función simple pero crítica: avisar que hay un peligro antes de que escale a incendio. Puede activarse manualmente (palancas, botones) o automáticamente, enviando la señal al panel de control, que es quien dispara la notificación.

2.3.5.1. Dispositivos de notificación de alarma de incendio

Bocinas, campanas y luces estroboscópicas que alertan de una emergencia real, ya sea por activación manual o detección automática.

2.3.5.2. Panel de control

El centro nervioso del sistema: supervisa los dispositivos de alarma, y tiene autoridad para accionar o detener rociadores en las zonas donde se reportó una alarma.

2.3.5.3. Fuente de alimentación

El sistema debe operar 24/7, con respaldo de baterías conectado al panel de control ante un corte de energía.

2.3.5.4. Sistema de bombeo contra incendio

El conjunto hidroneumático (bombas, válvulas, tuberías) que mantiene presurizada toda la red; su capacidad se dimensiona según las especificaciones del local.

2.3.5.5. Rociadores o sprinklers contra incendios

De los componentes más antiguos del sistema: conectados a tuberías presurizadas, se activan al recibir la señal del panel y descargan agua sobre un área amplia.

2.3.5.6. Detectores contra incendios

De humo, CO_2, temperatura, humedad o infrarrojos: su función es identificar el conato de incendio en su etapa más temprana posible.

2.3.5.7. Extintores

El elemento portátil, cargado con el agente adecuado según la clase de fuego que se espera combatir en esa zona específica.

2.3.5.8. Bombas contra incendio, Bomba principal

Según la normativa NFPA, la bomba contra incendios es el elemento que eleva la presión del suministro disponible —ya sea de la red pública, un tanque de gravedad o un reservorio— y opera como parte de un conjunto que incluye motor, controlador y accesorios. La bomba en sí solo entrega flujo y presión; es el motor, diésel o eléctrico, el que aporta la energía que la hace girar.

Existen tres tipos principales. La bomba centrífuga genera presión mediante fuerza centrífuga, acelerando el agua a través de la rotación del rodete — es la más común. La bomba de turbina de eje vertical, en cambio, está pensada para extraer agua

de una fuente estática (pozos, tanques subterráneos) y es la única que no requiere presión de succión previa. Y la bomba de desplazamiento positivo genera presión llenando una cavidad y expulsando el agua hacia afuera, alcanzando presiones más altas que la centrífuga — por eso es habitual encontrarla en sistemas de espuma o agua nebulizada.

2.3.6. Instalaciones que deberían contar con sistema contra incendio

2.3.6.1. Tanques de almacenamiento de combustible

Un tanque de almacenamiento es un dispositivo estacionario, construido en acero o fibra de vidrio, diseñado para contener un volumen de combustible líquido con el soporte estructural adecuado. Se clasifican principalmente por su ubicación y su geometría.

Tipo	Instalación	Ventaja principal	Consideración
Subterráneo	Bajo tierra	Aprovecha espacio limitado; mayor protección ante incendio y vandalismo	Menor capacidad que los de superficie
Sobre tierra	Superficie	Instalación y mantenimiento más simples, sin excavación	Expuesto a impactos; requiere protección adicional
Horizontal	Posición horizontal	Buen aprovechamiento de espacio; carga distribuida de forma uniforme	Ideal para mayores volúmenes
Vertical	Posición vertical	Menor huella en planta; el más común para líquidos y gases inflamables	Mayor eficiencia de ocupación
Doble pared	Cámara interna y externa	Detecta y contiene fugas antes de que lleguen al suelo	Recomendado para combustibles peligrosos o zonas ambientalmente sensibles

La elección entre estos tipos depende del volumen a almacenar, el espacio disponible y las condiciones ambientales de la instalación — factores que en el caso de Blending S.A.C. se desarrollan en el capítulo de resultados.

2.3.7. Riesgo de Incendio

Entendido el mecanismo de la combustión —desarrollado en la sección 2.3.1— , el paso siguiente es traducirlo en un criterio de evaluación de riesgo. Como el comburente (el aire) está prácticamente siempre presente y la reacción en cadena es consecuencia directa del incendio, las dos condiciones que realmente determinan que un incendio se inicie son el combustible y la energía de activación. Evaluar el riesgo, entonces, se reduce a estimar la probabilidad de que ambos coincidan en el espacio, el tiempo y la intensidad suficiente. Los métodos de evaluación existentes varían según su finalidad —minimizar pérdidas materiales, proteger al personal propio o a terceros— y según el criterio del autor que los desarrolló, pero coinciden en un punto: valorar las consecuencias del incendio como eje central del análisis. La prevención, en consecuencia, apunta a eliminar uno de esos dos factores; otros aspectos —rutas de evacuación, organización operativa— entran después, como parámetros que afinan la estimación de consecuencias.

2.3.7.1. Evaluación del riesgo de incendio

El riesgo de incendio combina dos variables: la probabilidad de que ocurra y la magnitud de sus consecuencias. Evaluarlo permite fijar medidas de control y dimensionar la protección de forma proporcional al peligro real. CCPS (2010) sitúa este análisis como un pilar en instalaciones industriales de alto peligro, y Lees (2012) coincide en que identificar los escenarios críticos es la base de cualquier diseño de sistema seguro. La relación se expresa de forma simple:

Riesgo = Probabilidad × Consecuencia

Este enfoque permite priorizar los escenarios de mayor impacto y fijar criterios de diseño más exigentes donde realmente se necesitan. Crowl y Louvar (2019) añaden que la evaluación debe integrar factores operativos, ambientales y humanos, mientras

que Aven (2015) insiste en no perder de vista la incertidumbre inherente a cualquier estimación. Aplicando esa misma lógica al nivel de riesgo de incendio (NRI):

NRI = Probabilidad de inicio de incendio x Consecuencias

2.3.8. Terminales de almacenamiento de combustible

Los terminales de almacenamiento de combustible son instalaciones críticas dentro de la cadena energética: manejan grandes volúmenes de sustancias inflamables y, por eso mismo, concentran un riesgo elevado de incendios de gran magnitud. Speight (2014) es claro en que este tipo de almacenamiento exige sistemas de seguridad robustos para prevenir eventos catastróficos, y Fay (2018) agrega que gestionar ese riesgo requiere integrar tecnología, operación y mantenimiento como un solo frente. El diseño del sistema contra incendio, en este contexto, no puede mirar cada tanque de forma aislada — tiene que considerar la disposición conjunta, la interacción entre unidades y el riesgo de efectos en cadena. API (2020) fija lineamientos específicos para la protección de tanques, y NFPA (2022) define los criterios de diseño para sistemas de espuma y agua en este tipo de instalación.

En su función más básica, estos terminales existen para recibir, almacenar y distribuir combustible de forma eficiente y segura — pero ese rol viene con desafíos crecientes: la presión por operar con mayor sostenibilidad y menor huella ambiental hace que la seguridad ya no sea un aspecto aislado, sino parte integral de cómo se diseña y opera la instalación.

2.3.8.1. Mejora de la seguridad en las terminales de almacenamiento

Dos frentes concentran la mayor parte de las mejoras posibles en este tipo de instalación. El primero es el monitoreo en tiempo real: videovigilancia, sensores de detección de fugas y control de acceso permiten identificar y responder a un incidente antes de que escale — algo especialmente relevante en los puntos de suministro,

clasificados como áreas peligrosas por la posibilidad de formar una atmósfera explosiva en concentraciones que exigen medidas de prevención específicas para proteger al personal.

El segundo frente es humano: capacitación periódica, simulacros de emergencia y una cultura de seguridad sostenida en el tiempo. La experiencia de la industria muestra que este tipo de programas reduce de forma medible los accidentes laborales y refuerza la adherencia a los protocolos de seguridad en toda la organización.

2.4. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Término	Definición
Red de Protección Contra Incendio	Conjunto de tuberías y equipos que alimenta a los hidrantes en uso simultáneo con el gasto y la presión que exige la norma.
Hidrante	Punto de conexión a una fuente de agua desde donde bomberos y sistemas automáticos acceden al suministro durante una emergencia.
Gasto de Agua	Volumen de agua necesario para controlar un incendio, base para dimensionar toda la red.
Presión Requerida	Presión mínima que garantiza que el agua llegue con fuerza suficiente a la altura y distancia de cada punto protegido.
Conjunto de Tuberías	Red interconectada que canaliza y distribuye el agua por toda la instalación.
Equipo de Bombeo	Los dispositivos que impulsan el agua a través de la red, garantizando presión y flujo constantes.
Gabinete de Mangueras	Recinto donde se guardan mangueras y accesorios, pensado para un acceso rápido en emergencia.
Bocas de Incendio Equipadas (BIE)	Punto de suministro con manguera y boquilla lista para una primera intervención.
Central de Bombeo	Ubicación centralizada de los equipos de bombeo que asegura distribución uniforme del agua.
Depósito de Agua	Reserva dedicada a mantener suministro continuo incluso ante una interrupción del abastecimiento normal.
Rociadores Automáticos	Dispositivos que liberan agua al detectar calor, conteniendo el incendio en el área específica donde se activan.

Presión Dinámica	La energía cinética del agua en movimiento, convertida en presión utilizable para manejar variaciones del flujo.
Normativa NFPA	El cuerpo de normas de la National Fire Protection Association que guía el diseño, instalación y mantenimiento de estos sistemas.
Válvula de Retención	Dispositivo que impide el flujo inverso, protegiendo la integridad hidráulica de la red.
Bomba Jockey	Bomba de baja capacidad que sostiene la presión de la red y evita que arranque la bomba principal por pequeñas variaciones.
Golpe de Ariete	Aumento brusco de presión al cerrarse abruptamente el flujo, fenómeno que el diseño debe prevenir para no dañar la tubería.
Tubería de Acero Galvanizado	Tubería recubierta de zinc, elegida por su resistencia a la corrosión en instalaciones de larga duración.
Drenaje de Pruebas	Punto habilitado para liberar agua durante pruebas de funcionamiento del sistema.
Hidrante de Columna Seca	Hidrante que permanece sin agua en la columna hasta su activación, típico en zonas con riesgo de congelamiento.
Red de Agua Contra Incendios	El sistema completo de protección hídrica que resguarda una estructura frente a un incendio.
Boquilla de Descarga	Dispositivo que dirige y controla el chorro de agua para una extinción más precisa.
Toma de Agua	Punto donde el sistema se conecta a la red pública u otra fuente externa de abastecimiento.
Instalación de Bombas Contra Incendios	El proceso de colocar y configurar las bombas para garantizar una respuesta rápida cuando se necesite.
Estación de Mangueras	Punto equipado con mangueras y accesorios para intervención rápida en un área determinada.
Cuarto de Bombas	Espacio dedicado al equipo de bombeo, diseñado para facilitar acceso y mantenimiento.
Sistema de Diluvio	Sistema que libera agua de forma masiva sobre un área completa, reservado para escenarios de riesgo extremo.
Manguera de Llenado	Conexión usada para mantener el sistema siempre cargado con agua.
Prueba Hidrostática	Ensayo que evalúa la resistencia de las tuberías bajo presión, garantizando la integridad del sistema.
Juntas Flexibles	Conexiones que absorben movimiento y previenen daños por expansión térmica.
Pulsador Manual	Dispositivo de activación humana de la alarma en caso de emergencia.
Gabinete para Mangueras Contra Incendios	Resguardo que protege las mangueras y facilita su acceso inmediato.
Espuma Antiincendios	Agente que suprime las llamas y evita la reignición, clave en incendios de líquidos inflamables.

Estación de Control	Centro desde donde se supervisa y controla el sistema en tiempo real.
Riego Automático	Sistema de aspersores que protege de forma continua áreas con riesgo constante.
Manguera Contra Incendios	Tubo flexible que dirige el agua durante una intervención directa.
Caudal	El volumen de agua que fluye por unidad de tiempo, variable central para dimensionar la capacidad del sistema.
Inyector de Aire	Dispositivo que mezcla aire con agua para mejorar la capacidad de extinción del chorro.
Sistema de Alarma	El mecanismo de alerta temprana que habilita una respuesta humana rápida ante el inicio de un incendio.
Válvula de Control de Flujo	Regula la cantidad de agua que circula por la tubería, ajustando la presión según la necesidad del momento.
Detectores de Humo	Dispositivos que identifican humo y activan automáticamente el sistema de protección.
Interruptor de Flujo	Detecta la circulación de agua en la red, señal útil para identificar rupturas o activaciones.
Manguera de Descarga	Conducto que libera el agua del sistema tras la extinción, controlando el flujo remanente.
Pruebas de Rendimiento	Evaluación periódica que garantiza que el sistema opera con la eficiencia esperada.
Equipo de Protección Personal (EPP)	La indumentaria y accesorios de seguridad indispensables durante cualquier intervención.
Redundancia	Duplicación deliberada de elementos críticos para evitar que un fallo puntual comprometa todo el sistema.
Tubería de CPVC	Tubería resistente a la corrosión, usada como alternativa duradera en sistemas de agua.
Sistema Pre-Action	Sistema que exige la activación previa de un detector antes de liberar agua, evitando descargas accidentales.
Agua No Potable	Agua no apta para consumo humano, empleada específicamente en sistemas de protección.
Estación de Monitoreo Remoto	Centro de control a distancia que permite supervisión continua sin presencia física en el sitio.
Válvula de Alivio de Presión	Libera el exceso de presión de la red para proteger la integridad del sistema.
Sistema Seco	Sistema que mantiene las tuberías sin agua hasta la activación, usado en zonas propensas a congelamiento.

2.4.1. Base legal y estándares aplicables

La legislación peruana por su influencia y por base técnica desde la creación de las regulaciones de seguridad en 1962 ha tomado como fuente y ha asumido los códigos y regulaciones internacionales de:

2.4.1.1. National Fire Protection Association – NFPA

. NFPA 10: Extintores portátiles para Incendio

. NFPA 11: Espumas de baja, media y alta expansión

. NFPA 14: Estándar para la instalación de conexiones, hidrantes y sistemas de mangueras

. NFPA 15: Sistemas fijos de agua pulverizada para protección contra Incendios

. NFPA 20: Instalación de bombas estacionarias contra incendios.

. NFPA 22: Estándar para tanques de agua en instalaciones privadas.

. NFPA 24: Estándar para instalación de tuberías para el servicio privado contra incendios y sus accesorios.

. NFPA 25: Inspección, prueba y mantenimiento de sistemas de agua de protección contra incendios.

. NFPA 30 : Código de líquidos inflamables y combustibles

. NFPA 170: Estándar de símbolos de seguridad.

. NFPA 230 : Estándar para la protección contra incendios de almacenamientos

. NFPA 430 : Código para el almacenamiento de oxidantes líquidos y sólidos

API PUBLICATION 2030: Application of Fixe Water Spray System for Fire Protection in the Petroleum Industry.

Ley Nº 26221 Orgánica de Hidrocarburos y Reglamentos

TITULO CUARTO, CAPITULO VII, Protección Contra Incendio

Art. 84.- En la extinción de incendios en instalaciones para almacenamiento de hidrocarburos deben ser considerados, además de agua de extinción y enfriamiento, los agentes extintores como espumas mecánicas y polvos químicos secos y otros como el dióxido de carbono y líquidos vaporizantes que no afecten el ozono; siempre y cuando se encuentren normados de acuerdo al NFPA y sean necesariamente listados y aprobados en su eficacia y calidad por UL, FM o USCG.

Decreto Supremo D.S N º 043 – 2007 – EM,

Aprueban el Reglamento de Seguridad para Actividades de Hidrocarburos y modifican diversas disposiciones.

Decreto Supremo D.S 015-2006

Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos

Code of Practices CEFIC, European Chemical Industrie Council.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. HIPÓTESIS

Formular hipótesis en esta investigación responde a una necesidad concreta: plantear proposiciones verificables que guíen el análisis y la validación del diseño del sistema contra incendio agua-espuma. Estas hipótesis conectan directamente las deficiencias identificadas en el sistema actual —diseño hidráulico, consideración de escenarios de riesgo, selección de equipos— con la solución propuesta, que será evaluada bajo criterios técnicos y cuantificables. Hernández Sampieri et al. (2014) describen las hipótesis como explicaciones tentativas sujetas a comprobación empírica; Bernal (2010) agrega que su función es establecer relaciones claras entre variables y encauzar el desarrollo metodológico del estudio.

En ingeniería aplicada, la hipótesis cumple un rol funcional: no se limita a explicar un fenómeno, también busca demostrar si una solución técnica resuelve un problema específico. Aquí eso se traduce en verificar si el diseño —sustentado en análisis de riesgo y cálculo hidráulico— mejora efectivamente la capacidad de respuesta ante escenarios críticos. Arias (2012) sostiene que las hipótesis aplicadas deben formularse sobre variables medibles y verificables mediante procedimientos técnicos; Ñaupas et al. (2014) añaden que una buena formulación facilita la comprobación objetiva de resultados.

3.1.1. Hipótesis principal

«Con el diseño del sistema agua espuma se reduce el riesgo de incendio en el terminal de almacenamiento de hidrocarburos y químicos de la empresa Blending S.A en la región del Callao, Lima-Perú.»

Esta hipótesis busca verificar si el diseño propuesto constituye realmente una solución técnica efectiva frente a las deficiencias identificadas en el sistema actual. Guarda coherencia directa con el problema de investigación y los objetivos planteados, estableciendo una relación entre la intervención de ingeniería —el diseño— y la reducción del riesgo de incendio en la instalación. Hernández Sampieri et al. (2014) señalan que toda hipótesis debe plantear una relación clara y comprobable entre variables; Arias (2012) agrega que su formulación debe permitir verificarse mediante procedimientos técnicos y mediciones objetivas.”

3.1.2. Hipótesis específicas

1. La determinación del grado de impacto de los escenarios de riesgo de incendio permitirá definir el nivel de protección requerido en el terminal de almacenamiento de hidrocarburos y productos químicos de la empresa Blending S.A.C., en la región del Callao, Lima–Perú.

2. La identificación y caracterización de las fuentes de ignición y de las condiciones operativas del terminal permitirá estimar la probabilidad de ocurrencia de incendios en el sistema de almacenamiento de hidrocarburos y productos químicos de la empresa Blending S.A.C., en la región del Callao, Lima–Perú.

3. La determinación del consumo de agua y de concentrado de espuma para escenarios de incendio permitirá cuantificar la demanda hidráulica máxima del sistema de protección contra incendios en el terminal de almacenamiento de hidrocarburos y productos químicos de la empresa Blending S.A.C., en la región del Callao, Lima–Perú.

4. La selección del sistema de protección contra incendios, basada en los escenarios de riesgo evaluados, permitirá especificar los equipos contra incendio requeridos en el terminal de almacenamiento de hidrocarburos y productos químicos de la empresa Blending S.A.C., en la región del Callao, Lima–Perú.

3.2. VARIABLES

Del problema y las hipótesis planteadas se desprenden las variables que estructuran el estudio. La evaluación del riesgo de incendio actúa como variable independiente, al condicionar los requerimientos de seguridad del sistema; el nivel de protección contra incendios, por su parte, es la variable dependiente, derivada del análisis técnico de los escenarios de riesgo y de las exigencias operativas del terminal. Esta relación es la que sostiene la coherencia metodológica del estudio y da base a la matriz de consistencia y la operacionalización de variables que siguen.

3.2.1. Variable independiente

"Evaluación del riesgo de incendio en el terminal de almacenamiento"

Definición conceptual

Evaluar el riesgo de incendio es un proceso sistemático que identifica, analiza y valora los peligros de un evento de incendio, relacionando probabilidad de ocurrencia

con magnitud de las consecuencias sobre personas, instalaciones y entorno. En ingeniería de protección contra incendios, este enfoque permite modelar escenarios y estimar sus efectos térmicos y de propagación — información determinante para decisiones de seguridad industrial (Drysdale, 2011; Aven, 2016). La gestión del riesgo, en última instancia, se sostiene en esa combinación de probabilidad y consecuencia como criterio de evaluación y control (ISO, 2018).

Dimensiones (conceptual):

Probabilidad de ocurrencia

Consecuencia del incendio

Escenarios de incendio

Factores de riesgo (fuentes de ignición y condiciones operativas)

Indicadores (conceptual):

Frecuencia de ocurrencia

Intensidad del incendio

Nivel de daño potencial

Tipo de escenario (pool fire, jet fire, etc.)

Definición operacional

En términos operacionales, evaluar el riesgo de incendio implica identificar y analizar los escenarios posibles en el terminal, estimando probabilidad de ocurrencia y severidad de consecuencias mediante indicadores cuantificables que permiten clasificar el riesgo en categorías —alto, medio, bajo. El procedimiento se apoya en metodologías de análisis de riesgo para incendios industriales, que integran variables físicas del fuego con condiciones operativas reales (Lees, 2012; CCPS, 2008).

Dimensiones (operacional):

Probabilidad

Consecuencia

Caracterización del escenario

Impacto físico del incendio

Indicadores (operacional):

Frecuencia estimada (%)

Intensidad de radiación térmica (kW/m^2)

Área afectada (m^2)

Tiempo de exposición (min)

Tipo de incendio (clasificación técnica)

3.2.2. Variable dependiente

"Nivel de protección contra incendios del terminal"

Definición conceptual

El nivel de protección contra incendios refleja qué tan preparado está un sistema de seguridad para prevenir, controlar y mitigar los efectos de un incendio mediante equipos y estrategias acordes al riesgo existente. En instalaciones industriales, ese nivel depende de la capacidad real del sistema para responder ante escenarios de incendio, considerando criterios de diseño, disponibilidad de recursos y cumplimiento normativo (NFPA, 2022; CCPS, 2008). La protección, en ese sentido, combina medidas activas y pasivas orientadas a reducir consecuencias y sostener la seguridad operativa (SFPE, 2016).

Dimensiones (conceptual):

Capacidad de respuesta del sistema

Adecuación del sistema al riesgo

Cumplimiento normativo

Disponibilidad de recursos de protección

Indicadores (conceptual):

Eficiencia del sistema

Nivel de cobertura de protección

Grado de cumplimiento de normas técnicas

Tiempo de respuesta ante incendio

Definición operacional

Este nivel se mide evaluando el desempeño real del sistema instalado en el terminal —su capacidad hidráulica, el tipo de sistema, los equipos seleccionados y el cumplimiento de los requerimientos técnicos exigidos para cada escenario. La evaluación se apoya en parámetros cuantificables: caudal requerido, volumen de agua disponible, consumo de agente espumante y características de los equipos, siguiendo los criterios normativos de diseño vigentes (NFPA, 2022; API, 2020).

Dimensiones (operacional):

Demanda del sistema contra incendios

Capacidad hidráulica

Tipo de sistema de protección

Equipamiento contra incendios

Indicadores (operacional):

Caudal requerido (L/min o gpm)

Volumen de agua disponible (m^3)

Concentración y consumo de espuma (%)

Tipo de sistema (espuma, agua, combinado)

Número y tipo de equipos (bombas, monitores, rociadores)

3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 1

Matriz de operacionalización de variables

🔷 Variable Independiente: Evaluación del riesgo de incendio

Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Técnica	Instrumento	Unidad/Escala
Análisis del riesgo según probabilidad y consecuencias (Drysdale, 2011; ISO, 2018).	Evaluación de escenarios según probabilidad e impacto.	Probabilidad	Frecuencia	Análisis	Matriz de riesgo	%
		Consecuencia	Radiación térmica	Simulación	Software	kW/m^2
		Consecuencia	Área afectada	Modelamiento	Planos	m^2
		Consecuencia	Tiempo	Cálculo	Memoria	min
		Escenario	Tipo de incendio	Identificación	Ficha	Cualitativa
		Factor	Fuentes de ignición	Inspección	Checklist	Cualitativa

🔷 Variable Dependiente: Nivel de protección contra incendios

Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Técnica	Instrumento	Unidad/Escala
Capacidad del sistema para controlar incendios (NFPA, 2022; SFPE, 2016).	Evaluación del sistema según demanda y capacidad.	Demanda	Caudal	Cálculo	Hoja de cálculo	L/min
		Capacidad	Volumen de agua	Análisis	Memoria	m^3
		Agente	Consumo de espuma	Cálculo	Ficha	%
		Sistema	Tipo de sistema	Clasificación	Revisión	Cualitativa
		Equipos	Número de equipos	Inventario	Lista	Unidades
		quipos	Tipo de equipos	Identificación	Ficha	Cualitativa

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. ÁREA DE ESTUDIO

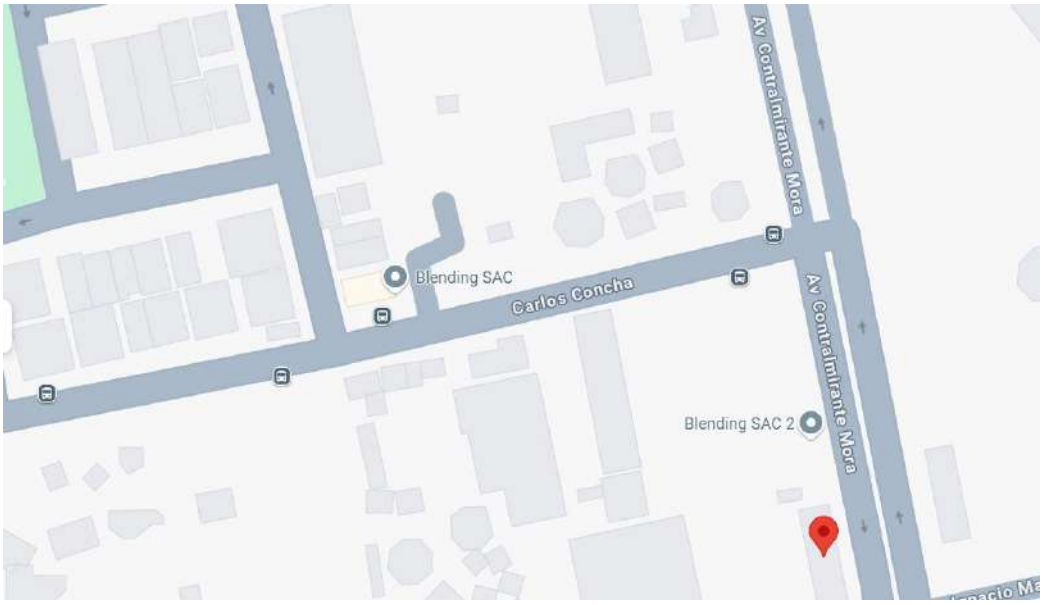
Blending S.A.C. es una empresa dedicada al almacenamiento a granel de químicos e hidrocarburos, en sus distintas formas de recipientes para líquidos y sólidos: tanques verticales y horizontales (Farm Tank, Bulk Tank), tanques de transporte de materiales peligrosos, contenedores ISO, camiones tanque, IBC (intermediate bulk containers) y recipientes de consumo doméstico.

La empresa opera bajo una política HSE con altos estándares de seguridad, salud y cuidado ambiental, lo que la compromete —frente a sus empleados, la comunidad y la normativa vigente— a mantener un sistema de prevención y protección de riesgos ante un eventual derrame o incendio, ya sea en su etapa incipiente o en emergencia declarada, tanto en exteriores como en interiores.

La investigación se desarrolla en la planta ubicada en Contra Almirante Mora 541, Callao (coordenadas -12.04375, -77.13605), según se muestra en las figuras 1, 2 y 3.

Figura 1

Ubicación de la planta.



Fuente: Google map

Figura 2

Vista de almacenamiento al aire libre # 1



Fuente: Propia

Figura 3

Vista de camión en zona de almacenamiento al aire libre # 1



Fuente: Propia

4.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

4.2.1. Tipo y nivel de Investigación

Esta investigación es de tipo aplicada y nivel explicativo: busca resolver un problema concreto de ingeniería —determinar el nivel de protección contra incendios de un terminal de hidrocarburos y productos químicos— a partir de la evaluación del riesgo. Es aplicada porque traduce conocimiento teórico y normativo de protección contra incendios y análisis de riesgo en una solución técnica ajustada a condiciones reales de operación, con utilidad práctica directa (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018; Arias, 2012). En este estudio, esa aplicación se concreta en el dimensionamiento del sistema agua-espuma en función de los escenarios de mayor riesgo identificados en el terminal.

4.2.2. Diseño de la investigación

El diseño es no experimental: las variables —evaluación del riesgo y nivel de protección— no se manipulan deliberadamente, sino que se analizan en su contexto real dentro del terminal. Esto implica observar los fenómenos tal como ocurren en su ambiente natural, sin intervenir en su comportamiento, algo característico de la

ingeniería aplicada donde las condiciones operativas no pueden alterarse a voluntad (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018; Kerlinger & Lee, 2002). En este caso, se analizan escenarios reales de incendio —almacén, patio de tanques, zonas de almacenamiento— a partir de sus condiciones físicas, operativas y de riesgo.

4.2.3. Enfoque de la investigación

El enfoque es cuantitativo: se fundamenta en medir y analizar variables de riesgo de incendio y nivel de protección mediante datos numéricos y procedimientos sistemáticos que permiten contrastar las hipótesis planteadas (Creswell & Creswell, 2018; Babbie, 2016). En la práctica, esto se traduce en cuantificar radiación térmica, caudal requerido, volumen de agua y consumo de espuma — parámetros que sustentan técnicamente el diseño del sistema.

4.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

4.3.1. Población o universo de estudio

La población está conformada por las instalaciones del terminal de Blending S.A.C. con potencial de generación y propagación de incendios — metodológicamente, el conjunto de unidades que comparten características relevantes para el problema de investigación (Cochran, 1977; Levin & Rubin, 2004). En este caso corresponde a las áreas operativas del terminal —almacenes, patios de tanques, zonas de almacenamiento al aire libre, áreas de carga y servicios— donde se manipulan sustancias inflamables y combustibles, lo que las convierte en espacios críticos para la evaluación de riesgo. Las figuras 4, 5 y 6 muestran los productos almacenados tanto en el almacén interior como en el exterior.

El sistema contra incendio se diseñará para responder ante un incendio en cualquiera de las zonas del terminal:

. *Almacén principal*

. *Zona de almacenamiento al aire libre #1*

. *Patio de Tanques #1*

. Zona de almacenamiento al aire libre #2

. Patio de Tanques #2

. Patio de Tanques #3

. Talleres de Mantenimiento

. Sala de Fuerza

. Oficinas

. Zona de servicios (comedor, vestuarios y baños)

. Carga de camión, Patio de Bombas, Manifold de válvulas.

Figura 4

Almacén Principal



Fuente: Propia

Figura 5

Zona de almacenamiento al aire libre #1



Fuente: Propia

Figura 6

Patio de tanques #1



Fuente: Propia

4.3.2. Muestra

La muestra de análisis corresponde a los escenarios más representativos de riesgo dentro del terminal: el almacén principal, la zona de almacenamiento al aire libre #1 y el patio de tanques #1. Como subconjunto seleccionado de la población para análisis detallado, debe representar las condiciones más críticas del sistema (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018; Tamayo & Tamayo, 2004). La selección no sigue un criterio probabilístico, sino uno intencional: se priorizan las áreas con mayor carga combustible, condiciones de confinamiento o exposición, y mayor potencial de efectos térmicos severos.

4.4. PROCEDIMIENTOS. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

4.4.1. Técnica de recolección de datos

La recolección de datos sigue un enfoque cuantitativo aplicado, orientado a obtener información técnica para evaluar el riesgo de incendio y el nivel de protección requerido. En este tipo de estudio, las técnicas se eligen por su capacidad de generar datos medibles y verificables, capaces de contrastar las hipótesis y sustentar decisiones de diseño (Creswell & Creswell, 2018; Babbie, 2016) — lo que en la práctica implica recopilar información sobre condiciones operativas, características de los combustibles, configuraciones de almacenamiento y parámetros físicos del comportamiento del fuego.

Se emplea observación técnica directa para identificar in situ la disposición de tanques, distancias de seguridad, fuentes de ignición y características del almacenamiento — técnica común en ingeniería aplicada por su capacidad de obtener información primaria sin alterar el funcionamiento del sistema (Blaxter, Hughes & Tight, 2010; Flick, 2015). Se complementa con análisis documental —planos, fichas

técnicas, normativa NFPA, registros operativos— para caracterizar los escenarios de riesgo y fijar parámetros de diseño confiables.

El modelamiento y cálculo ingenieril funciona como técnica central de recolección y procesamiento: el estudio necesita cuantificar radiación térmica, caudal, volumen de almacenamiento y consumo de espuma, un enfoque propio de la ingeniería de seguridad donde los datos no solo se recolectan, sino que se generan a partir de modelos físicos y matemáticos (Crowl & Louvar, 2011; CCPS, 2008). Así, la información obtenida permite validar las hipótesis, particularmente la relación entre nivel de riesgo y requerimientos del sistema de protección.

Los instrumentos empleados —matrices de evaluación de riesgo, hojas de cálculo, planos de distribución, fichas técnicas de sustancias y formatos de inspección— organizan y sistematizan la información recolectada, asegurando coherencia entre la fase metodológica y el desarrollo de resultados. La Tabla 2 detalla las técnicas empleadas y sus instrumentos asociados, seleccionados por su pertinencia para obtener información confiable sobre condiciones operativas, comportamiento del riesgo y parámetros de dimensionamiento — integrando análisis documental y mediciones de campo como base del análisis hidráulico y la evaluación del sistema propuesto.

Tabla 2

Técnicas de recolección de datos

TÉCNICAS	INSTRUMENTOS
Análisis Documental	• Análisis de Especificaciones Técnicas. • Ubicación geográfica. • Análisis de Normas Aplicables al Sistema. • Estudio de Campo. • Estudio de Riesgos. • Áreas Disponibles. • Análisis General del Reservorio. • Programa documentario de la Empresa.

Mediciones Convencionales	• Inspección Visual. • Estudio de Suelo. • Documentación de Contenidos. • GPS • Medidores de Distancias. • Anemómetros. • Manómetros • Programas de simulaciones. • Programas de cálculo.

Fuente: Propia

4.4.1.1. Búsqueda sistemática de información científica

Como técnica de recolección de datos secundarios, se empleó búsqueda sistemática en bases de datos y buscadores académicos especializados, con el fin de sustentar teóricamente la evaluación de riesgo y el diseño del sistema — acceso a literatura científica validada que garantiza calidad y pertinencia en investigación aplicada (Okoli, 2015; Kitchenham, 2004).

La búsqueda se apoyó en Google Académico, SciELO, Redalyc y repositorios institucionales, plataformas de amplia cobertura multidisciplinaria e indexación por pares que garantizan la validez del conocimiento consultado (Martín-Martín et al., 2018; Falagas et al., 2008). Se usaron palabras clave como "fire risk assessment", "fire protection systems", "hydrocarbon storage safety", "foam fire suppression systems" e "industrial fire safety", en español e inglés, con criterios de inclusión centrados en publicaciones recientes, relevancia temática, aplicación industrial y sustento normativo (NFPA, API, ISO).

Esta búsqueda permitió identificar antecedentes, metodologías de evaluación de riesgo y criterios técnicos de dimensionamiento, además de recopilar información sobre modelos de evaluación, criterios de diseño agua-espuma, comportamiento de radiación térmica y normativa internacional aplicable — insumos integrados al marco teórico y a

los procedimientos de análisis, que sustentaron las hipótesis y dieron base técnica sólida al diseño del sistema.

4.5. Análisis e interpretación de la información

El análisis sigue un enfoque técnico-cuantitativo orientado a transformar los datos recopilados en parámetros de diseño, validando la relación entre riesgo de incendio y nivel de protección requerido. Involucra modelos de análisis de riesgo y principios de ingeniería de protección contra incendios para cuantificar probabilidad y consecuencia de cada escenario (Aven, 2016; CCPS, 2008).

El análisis no se queda en describir datos: los interpreta en función del comportamiento físico del fuego, la interacción de variables operativas y las condiciones del entorno industrial, estableciendo así criterios técnicos para el diseño del sistema (Drysdale, 2011; SFPE, 2016). Los resultados obtenidos son, en ese sentido, la base para validar las hipótesis: el nivel de protección depende directamente del grado de riesgo identificado.

4.5.1. Etapas del análisis

El análisis se estructura en cinco etapas secuenciales, coherentes con los objetivos y el modelo de variables planteado:

4.5.1.1. Etapa 1: Definición de parámetros de diseño

Se caracteriza el sistema de estudio: ubicación geográfica, condiciones del entorno, tipo de almacenamiento y propiedades de los productos inflamables, junto con un análisis preliminar de riesgo que identifica condiciones críticas iniciales — base tanto para la evaluación de riesgo como para el dimensionamiento posterior, considerando disposición de instalaciones, condiciones ambientales y propiedades fisicoquímicas de los combustibles (Crowl & Louvar, 2011; Lees, 2012).

4.5.1.2. Etapa 2: Selección del sistema de protección contra incendios

A partir de los parámetros definidos, se selecciona el tipo de sistema (agua, espuma o combinado) según tipo de líquido inflamable, área de almacenamiento y nivel de riesgo — decisión que responde directamente a la hipótesis, ya que el sistema elegido debe ser coherente con el riesgo identificado, conforme a los estándares de diseño para instalaciones de hidrocarburos (NFPA, 2022; API, 2020).

4.5.1.3. Etapa 3: Selección y dimensionamiento de equipos

Se determinan bombas, tuberías, hidrantes, rociadores y sistemas de aplicación de espuma a partir de presión, caudal requerido y demanda hidráulica, mediante cálculos que consideran el escenario de mayor riesgo — criterio estándar en el diseño de estos sistemas para garantizar capacidad de respuesta ante condiciones críticas (CCPS, 2008; SFPE, 2016).

4.5.1.4. Etapa 4: Evaluación y análisis del riesgo de incendio

Se analizan en detalle los escenarios identificados:

Tipo de combustible

Volumen involucrado

Radiación térmica

Condiciones de exposición

Influencia de estructuras adyacentes

Para determinar probabilidad y severidad de consecuencias, elementos clave para validar la variable independiente y establecer la relación funcional entre riesgo y protección requerida (Aven, 2016; Drysdale, 2011)).

4.5.1.5. Etapa 5: Gestión del riesgo y medidas complementarias

Se definen medidas complementarias al sistema físico:

Señalización de seguridad

Programas de capacitación e inducción

Planes de evacuación

Parte de un enfoque integral donde la protección contra incendios no se limita al equipamiento, sino que incluye prevención y respuesta ante emergencias (CCPS, 2008; Lees, 2012).

4.6. Validez y confiabilidad de los instrumentos

La validez se asegura por la correspondencia entre los instrumentos utilizados y las variables de estudio —riesgo de incendio y nivel de protección—, garantizando que las mediciones representen adecuadamente los fenómenos analizados. En investigación aplicada, la validez refiere al grado en que un instrumento mide lo que pretende medir, de forma consistente con el constructo teórico definido (Carmines & Zeller, 1979; Babbie, 2016). Aquí, esa correspondencia se logra empleando matrices de evaluación de riesgo, modelos de cálculo y criterios de diseño que integran probabilidad y consecuencia.

4.6.1. Procedimientos

4.6.1.1. Procedimiento para la obtención y análisis de resultados

El procedimiento de la investigación se estructura de manera secuencial, orientado a evaluar el riesgo de incendio y determinar el nivel de protección requerido, permitiendo validar las hipótesis planteadas mediante el análisis técnico de escenarios representativos.

Paso 1: Identificación de escenarios de riesgo

Se identificaron las áreas críticas del terminal con potencial de incendio, considerando:

Tipo de almacenamiento

Presencia de sustancias inflamables

Condiciones operativas

Configuración de las instalaciones

Resultado esperado:

Definir escenarios representativos (interior, exterior, tanques)

Paso 2: Caracterización del riesgo de incendio (VI)

Para cada escenario se evaluaron:

Tipo de combustible

Volumen involucrado

Geometría del incendio

Fuentes de ignición

Condiciones ambientales

Esto permite medir:

. Probabilidad

. Consecuencia

Paso 3: Determinación del escenario de mayor riesgo

Se compararon los escenarios evaluados considerando:

Intensidad térmica

Área afectada

Propagación

Impacto potencial

Resultado:

. Escenario crítico de diseño

Paso 4: Cálculo de la demanda del sistema contra incendios (VD)

En función del escenario crítico se determinaron:

Caudal requerido

Volumen de agua

Consumo de espuma

Tiempo de operación

Aquí se conecta directamente:

Riesgo → Demanda del sistema

Paso 5: Dimensionamiento del sistema contra incendios

Se definieron:

Capacidad del sistema

Presión requerida

Configuración hidráulica

Red de distribución

Paso 6: Selección de equipos

Se determinaron:

Bombas contra incendio

Tuberías

Hidrantes

Sistemas de espuma

Paso 7: Validación de hipótesis

Finalmente, se verificó que:

. El nivel de protección depende del riesgo

. El sistema responde al escenario crítico

. Los parámetros cumplen condiciones técnicas

V. RESULTADOS

5.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

5.1.1. Caracterización del sistema y distribución del terminal

En el desarrollo de la presente investigación, se consideró necesario caracterizar el sistema físico del terminal de almacenamiento, debido a que la configuración espacial de las instalaciones influye directamente en el comportamiento del fuego y en la respuesta del sistema contra incendios. La disposición de los equipos, las distancias entre unidades y la organización de las áreas operativas condicionan los mecanismos de propagación, particularmente la radiación térmica, la convección y la conducción, los cuales resultan determinantes en escenarios de incendio en instalaciones industriales (Drysdale, 2011).

Bajo este enfoque, la caracterización del sistema no se limita a describir la infraestructura existente, sino que permite comprender cómo las condiciones reales de operación influyen en el desarrollo del incendio. Esta base resulta indispensable para la posterior identificación de escenarios y la determinación de la demanda del sistema contra incendios, en concordancia con criterios establecidos en normas como NFPA 30 (NFPA, 2021).

Descripción del sistema del terminal

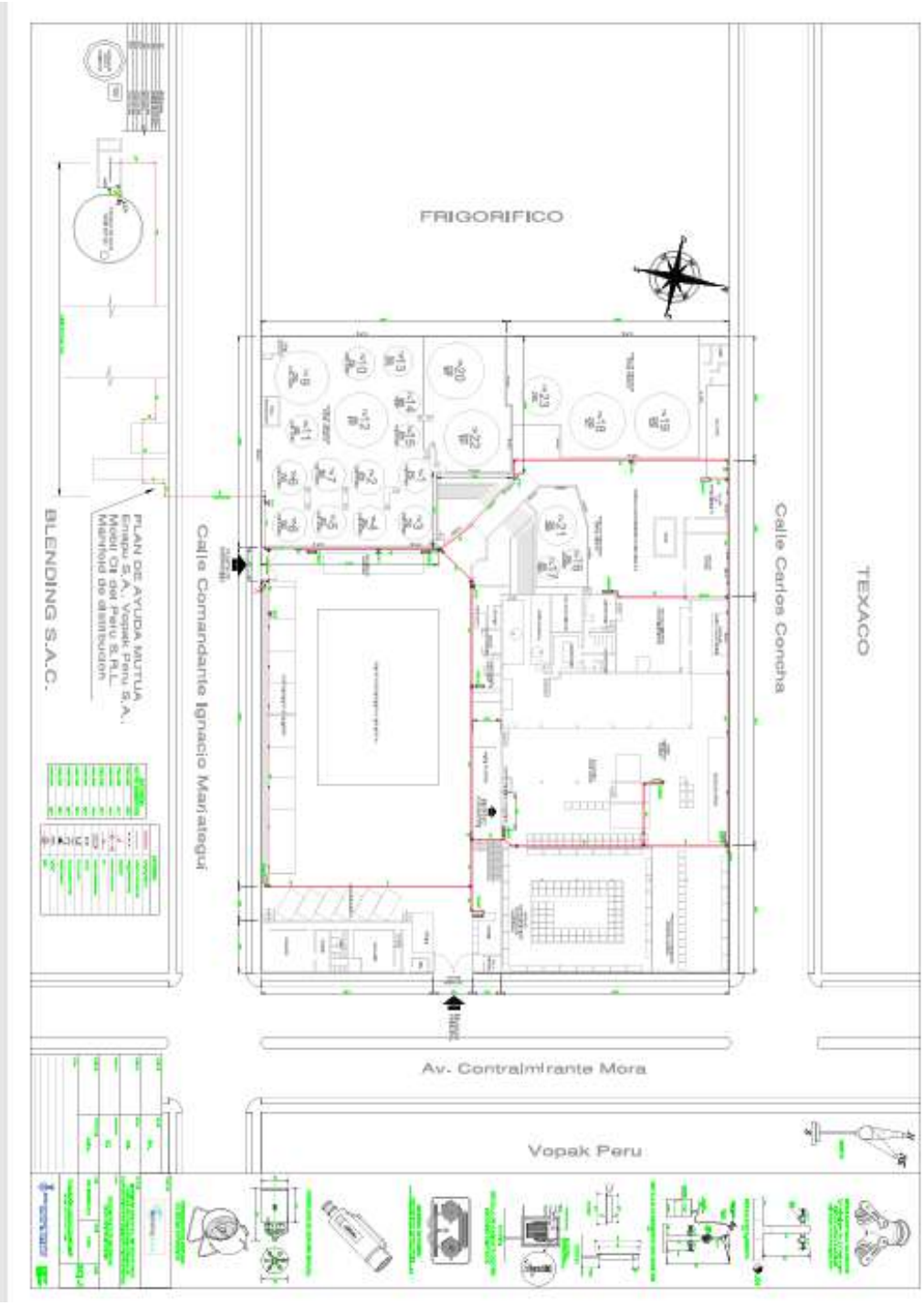
El análisis del sistema contra incendios se desarrolló a partir de la evaluación directa de la instalación existente, la cual presenta una configuración operativa compuesta por áreas de almacenamiento, transferencia y manipulación de productos

químicos e hidrocarburos. Esta condición exige abordar el diseño desde una perspectiva integral, considerando que el comportamiento del incendio no será uniforme en toda la instalación, sino que dependerá del entorno en el que se origine.

El terminal presenta una distribución en la que coexisten tanques de almacenamiento, zonas de carga y descarga, áreas de almacenamiento interior y sistemas de bombeo, los cuales operan de manera interrelacionada. Esta disposición no solo define la dinámica operativa del sistema, sino que condiciona la forma en que un incendio puede iniciarse y evolucionar dentro del conjunto de instalaciones. La caracterización de los productos almacenados, incluyendo su clasificación de inflamabilidad y comportamiento frente al fuego, se presenta en el Anexo 3, el cual detalla las propiedades relevantes para la evaluación del riesgo de incendio.

Figura 7

Plano general del terminal de almacenamiento



Fuente: propia

A partir del plano general del terminal, Figura (7), se evaluó la disposición espacial de los equipos y áreas operativas, identificándose que los tanques de almacenamiento se encuentran distribuidos en un arreglo que favorece la interacción térmica en caso de incendio. La proximidad entre unidades y la limitada presencia de

barreras físicas generan condiciones propicias para la transferencia de calor por radiación, fenómeno que constituye el principal mecanismo de afectación entre tanques en este tipo de instalaciones (API, 2014).

En este contexto, los tanques no pueden ser considerados como elementos aislados, sino como un sistema interconectado desde el punto de vista térmico. Esto implica que un incendio en una unidad puede afectar a las estructuras adyacentes, incrementando la severidad del evento y favoreciendo su propagación.

Por otro lado, las áreas de almacenamiento interior presentan un comportamiento distinto, ya que el riesgo se encuentra asociado principalmente a derrames y acumulación de vapores inflamables. Bajo estas condiciones, los incendios tienden a desarrollarse sobre la superficie del combustible, caracterizándose por una propagación rápida, pero con mecanismos de control diferentes a los observados en los tanques.

Esta diferenciación permite establecer un aspecto clave para el desarrollo de la investigación: el sistema contra incendios no puede diseñarse bajo un único criterio, sino que debe responder a condiciones de incendio diversas dentro de una misma instalación.

Importancia en el desarrollo de la investigación

La caracterización del sistema permitió comprender que el comportamiento del incendio está directamente condicionado por la configuración operativa del terminal. Este entendimiento resulta fundamental, ya que el diseño del sistema contra incendios debe responder a condiciones reales y no a supuestos teóricos.

A partir de este análisis, la disposición de los tanques, las áreas de almacenamiento y las zonas de transferencia permitió definir los escenarios de incendio

considerados en la investigación, así como identificar los mecanismos predominantes de propagación. Esta relación directa entre configuración física y comportamiento del fuego constituye la base para la evaluación del riesgo y la selección de los criterios de diseño.

En consecuencia, la caracterización del sistema se establece como el punto de partida del proceso de diseño, al vincular las condiciones reales de la instalación con la determinación de la demanda del sistema contra incendios, asegurando la coherencia técnica de los resultados obtenidos.

5.1.2. Caracterización del riesgo según sustancias almacenadas

En el desarrollo de la presente investigación, se estableció la necesidad de caracterizar las sustancias almacenadas en el terminal, debido a que el comportamiento del incendio se encuentra directamente condicionado por las propiedades físico-químicas de los materiales involucrados. En el campo de la ingeniería de seguridad contra incendios, el tipo de combustible define variables críticas como la velocidad de propagación del fuego, la tasa de liberación de calor, la generación de vapores inflamables y el método de extinción más adecuado (Drysdale, 2011).

Bajo este enfoque, la identificación y clasificación de las sustancias no se limitan a un inventario de productos, sino que permiten establecer las condiciones reales de riesgo presentes en cada área del terminal. Esta información constituye un insumo fundamental para la definición de los escenarios de incendio y la selección del sistema de protección contra incendios, en concordancia con lo establecido en normas como NFPA 30 (NFPA, 2021).

El análisis de las sustancias almacenadas se abordó considerando tanto su naturaleza química como su forma de almacenamiento, ya que ambos factores determinan la forma en que un incendio puede iniciarse, desarrollarse y propagarse. A

partir de la información contenida en la memoria descriptiva, se identificó que el terminal maneja principalmente hidrocarburos y productos químicos con características inflamables, dispuestos tanto en áreas confinadas como en tanques a cielo abierto. Esta diferencia introduce condiciones de riesgo claramente diferenciadas, que deben ser analizadas de manera independiente.

Clasificación en almacenamiento interior

n el caso del almacenamiento interior, los productos presentan una alta volatilidad, lo que favorece la formación de mezclas inflamables con el aire. Bajo estas condiciones, un derrame puede dar lugar a incendios de rápida propagación sobre la superficie del líquido, conocidos como pool fire, en los cuales la velocidad de desarrollo del fuego está directamente asociada a la capacidad del combustible para generar vapores inflamables.

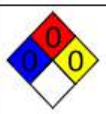
Figura 8

Clasificación de sustancias en almacenamiento interior

ALMACENAJE DE INTERIOR

TABLA DE COMPATIBILIDAD

Producto	Clases	NFPA 704	DOT	UN	No Compatible
Nitrato de Zinc	IIIB			UN - 1514	
ULTRAZOL ™ 8219C Punto de Inflamación 34°C	IC			UN - 1993	
NP-2000-LEAD NITRATE	IIIB			UN - 1469	
AERO® 400 Promoter	IIIB			UN - 1719	

Producto	Clases	NFPA 704	DOT	UN	No Compatible
UNISOL ® LIQUID GREEN 3BP *Intervalo Punto de Inflamación* *23°C <= 55°C*	**I C**			**UN - 1307**	
SUPERFLOC ®N-300 Flocculant	**IIIB**		*NO DISPONIBLE*	*NO DISPONIBLE*	
AEROPHINE® 6931 Promoter	**IIIB**		*NO DISPONIBLE*	*NO DISPONIBLE*	

Fuente: Propia

La información presentada en la figura (8), permite reconocer que las sustancias predominantes corresponden a líquidos inflamables, lo que implica que el incendio tiende a desarrollarse sobre la superficie del producto. En este contexto, la presencia de vapores juega un papel determinante, ya que incrementa la probabilidad de ignición incluso en ausencia de contacto directo con una fuente de calor. Este fenómeno resulta especialmente crítico en espacios confinados, donde la ventilación limitada favorece la acumulación de mezclas inflamables.

Adicionalmente, la coexistencia de sustancias con comportamiento oxidante introduce una condición de mayor complejidad, ya que estas pueden intensificar el proceso de combustión y aumentar la liberación de energía térmica. Esta interacción no solo incrementa la severidad del incendio, sino que también condiciona las estrategias de control que deben implementarse.

Desde el punto de vista del diseño del sistema contra incendios, estas características conducen a un criterio claro: el control del incendio en almacenamiento interior no puede basarse únicamente en el enfriamiento, sino que requiere la aplicación de agentes capaces de interrumpir el proceso de combustión. En este contexto, el uso de

espuma resulta adecuado, ya que permite suprimir la liberación de vapores inflamables y aislar el combustible del oxígeno, facilitando la extinción del incendio.

En consecuencia, el análisis del almacenamiento interior no solo permite identificar el tipo de sustancias presentes, sino que define el comportamiento esperado del incendio y orienta la selección del sistema de control.

Clasificación en almacenamiento exterior

A diferencia del almacenamiento interior, el análisis de las sustancias dispuestas en áreas exteriores, particularmente en el patio de tanques, se abordó considerando no solo las propiedades químicas de los productos, sino también las condiciones físicas en las que estos se encuentran contenidos. En este caso, el volumen de almacenamiento y la exposición directa al entorno modifican significativamente el comportamiento del incendio.

Figura 9

Clasificación de sustancias en almacenamiento exterior (tanques)

ALMACENAJE DE EXTERIOR

TABLA DE COMPATIBILIDAD

Producto	Clases	NFPA 704	DOT	UN	No Compatible
Hidrosulfuro de Sodio (NaSH)	II			UN - 2922	
Básico 150 SPN	IIIB			UN - 1993	

Fuente: Propia

A partir de la información presentada, en la figura (9) se identifican productos representativos como el hidrosulfuro de sodio (NaSH) y el denominado Básico 150

SPN, cuyas características evidencian condiciones de riesgo diferenciadas. En el caso del NaSH, su carácter reactivo y corrosivo puede generar escenarios complejos en presencia de calor, incluyendo la liberación de vapores peligrosos y reacciones con otras sustancias. Por su parte, el Básico 150 SPN presenta características propias de líquidos inflamables, lo que implica la generación de vapores capaces de formar mezclas inflamables y dar lugar a incendios de rápida propagación en caso de ignición.

Asimismo, la identificación de incompatibilidades químicas permite reconocer que la interacción entre ciertos productos puede desencadenar reacciones peligrosas, incrementando la severidad del evento mediante fenómenos como explosiones o liberación de gases tóxicos.

Sin embargo, más allá de la naturaleza química de los productos, el factor determinante en el almacenamiento en tanques es la cantidad de combustible involucrado y la forma en que este se encuentra contenido. En este tipo de escenarios, el incendio no se limita a la combustión del producto, sino que está dominado por la transferencia de calor hacia el entorno.

En este contexto, la radiación térmica se convierte en el mecanismo predominante de propagación, afectando las superficies de los tanques adyacentes y elevando progresivamente su temperatura. A diferencia de los incendios por derrame, que se desarrollan sobre superficies limitadas, los incendios en tanques pueden mantenerse en el tiempo, liberando energía de manera continua.

Como consecuencia, el riesgo no se limita al tanque involucrado, sino a la posibilidad de que el calor transferido comprometa la integridad estructural de los recipientes cercanos, generando un efecto de propagación entre unidades. Esta condición introduce un cambio fundamental en la estrategia de control, ya que el

objetivo principal no es la extinción inmediata del fuego, sino la reducción de la carga térmica mediante el enfriamiento continuo.

Desde el punto de vista del diseño, el uso de agua como medio de enfriamiento se convierte en la estrategia predominante, al permitir disipar el calor y mantener las superficies dentro de rangos seguros, evitando la propagación del incendio.

Integración de análisis

El análisis de las sustancias almacenadas permitió establecer que el comportamiento del incendio en el terminal no responde a una única condición, sino que varía en función de la forma de almacenamiento y de las propiedades del producto involucrado. Mientras que en áreas interiores predominan incendios por derrame, caracterizados por combustión superficial y rápida propagación, en el almacenamiento en tanques el fenómeno está dominado por la transferencia de calor y la interacción térmica entre equipos.

Esta diferenciación tiene implicancias directas en el diseño del sistema contra incendios. En el caso del almacenamiento interior, el control del incendio se basa en la supresión de vapores y el aislamiento del combustible, mientras que en los tanques la prioridad es la disipación de energía térmica para evitar la propagación del evento.

En consecuencia, se establece que la naturaleza de las sustancias almacenadas, en conjunto con su forma de almacenamiento, define el tipo de escenario de incendio, el mecanismo predominante de propagación y el sistema de protección requerido. Esta relación constituye el punto de partida para la definición de los escenarios de incendio desarrollados en la siguiente sección.

5.1.3. Identificación de escenarios de incendio

La definición de los escenarios de incendio se estableció a partir del análisis integrado de la configuración del terminal y de las características de las sustancias

almacenadas, evitando un enfoque teórico y priorizando condiciones reales de operación. Bajo este criterio, se reconoció que el comportamiento del fuego en la instalación no es uniforme, sino que depende tanto de la forma de almacenamiento como de la interacción entre los equipos y las condiciones operativas.

En este contexto, la identificación de escenarios consideró factores como la naturaleza de las sustancias, el volumen de producto, la disposición geométrica de las instalaciones y las actividades propias del terminal, incluyendo almacenamiento, carga y descarga. Estos elementos, analizados de manera conjunta, permitieron establecer situaciones representativas de incendio, en concordancia con metodologías de análisis de riesgo en instalaciones industriales (Lees, 2012).

A partir de este análisis, se identificaron tres escenarios que representan las principales condiciones de riesgo del terminal.

El primer escenario corresponde al almacenamiento interior, donde la presencia de líquidos inflamables y la posibilidad de derrames generan incendios que se desarrollan sobre la superficie del producto. En este tipo de evento, la combustión se caracteriza por su rápida propagación, debido a la volatilidad del combustible y a la acumulación de vapores inflamables en el ambiente. Estas condiciones favorecen la formación de incendios tipo pool fire, en los cuales el control del fuego se orienta a la supresión de vapores y al aislamiento del combustible, justificando el uso de sistemas de espuma como medio principal de extinción. La figura 10 muestra parte del almacen interior.

Figura 10

Condición de incendio en almacenamiento interior



Fuente: Propia

El segundo escenario se presenta en las zonas de carga y descarga, donde la manipulación de productos introduce una condición adicional de riesgo. En estas áreas, la posible combinación entre derrames de sustancias inflamables y fuentes de ignición genera eventos de desarrollo más dinámico, con posibilidad de ignición súbita o incluso fenómenos tipo flash fire. A diferencia del almacenamiento estático, en este caso el riesgo no depende únicamente de las propiedades del producto, sino también de las condiciones operativas, lo que incrementa la probabilidad de ocurrencia y la complejidad del evento.

El tercer escenario corresponde al patio de tanques, el cual representa la condición de mayor exigencia dentro del sistema. En este caso, el incendio involucra grandes volúmenes de producto contenidos en recipientes de almacenamiento, lo que modifica sustancialmente el comportamiento del fenómeno.

Figura 11

Esquema de exposición térmica entre tanques (TK-12)



Fuente: Propia

Tal como se observa en la figura 11, el tanque TK-12 actúa como fuente de radiación térmica, generando una exposición significativa sobre los tanques adyacentes. Este proceso incrementa progresivamente la temperatura de las superficies cercanas, pudiendo comprometer su integridad estructural y favorecer la propagación del incendio. En este escenario, el riesgo no se limita al tanque involucrado, sino que se extiende al conjunto del sistema, configurando un fenómeno de propagación por efecto dominó.

A diferencia de los incendios por derrame, donde el fuego se desarrolla sobre superficies limitadas, en el caso de los tanques el fenómeno está dominado por la transferencia de calor, particularmente por radiación térmica. Esta condición permite

explicar por qué estos eventos presentan una mayor severidad y demandan estrategias de control distintas, centradas en el enfriamiento continuo de las estructuras expuestas.

El análisis conjunto de los escenarios permite establecer que el comportamiento del incendio en el terminal no responde a un único patrón, sino que varía en función de la interacción entre las sustancias, su forma de almacenamiento y las condiciones operativas. Mientras que el almacenamiento interior se caracteriza por incendios de rápida propagación superficial, el escenario en tanques presenta un comportamiento más complejo, dominado por la transferencia de calor y la interacción térmica entre unidades.

En consecuencia, los escenarios identificados no son equivalentes, sino que presentan distintos niveles de severidad y demanda de control. Esta diferenciación permite establecer que el escenario en el patio de tanques constituye la condición más desfavorable, debido a la posibilidad de propagación del incendio entre múltiples unidades, lo cual incrementa significativamente la demanda del sistema contra incendios.

Este resultado permite establecer la base para la evaluación del riesgo, en la cual se determinará formalmente el escenario crítico que gobernará el diseño del sistema.

Criterios para la identificación de escenarios

Para la definición de los escenarios de incendio, se evaluaron las condiciones operativas del terminal, considerando los siguientes criterios técnicos:

. Tipo de sustancia almacenada

. Forma de almacenamiento (interior, exterior, tanques)

. Volumen de producto

. Configuración geométrica de las instalaciones

. Posibles fuentes de ignición

. Condiciones de operación (carga, descarga, almacenamiento)

Estos criterios permitieron establecer escenarios que representan condiciones reales y plausibles de ocurrencia de incendios, en concordancia con metodologías de análisis de riesgo en instalaciones industriales (Lees, 2012).

Definición de escenarios de incendio

Como resultado del análisis realizado, se identificaron tres escenarios representativos, los cuales abarcan las principales condiciones de riesgo presentes en el terminal.

Escenario 1: Incendio por derrame en almacenamiento interior

Se determinó que en el área de almacenamiento interior existe la posibilidad de ocurrencia de incendios por derrame de líquidos inflamables, producto de fallas en contenedores, manipulación inadecuada o fugas.

Las características principales de este escenario son:

. Tipo de incendio: pool fire (combustión superficial)

. Medio de propagación: superficie líquida

. Riesgo asociado: rápida expansión del fuego

. Agente de control: espuma

Figura 12

Almacen N° 1 Interior



Foto 4. Almacén # 1

Fuente: Propia

Escenario 2: Incendio en zona de carga y descarga

Se evaluó la posibilidad de incendio durante las operaciones de carga y descarga de camiones cisterna, donde pueden presentarse derrames de productos inflamables combinados con fuentes de ignición.

Las características de este escenario son:

. Tipo de incendio: derrame dinámico

. Riesgo asociado: posible explosión o flash fire

. Condición crítica: presencia simultánea de combustible y fuente de ignición

. Impacto: afectación a equipos y personal

Este escenario introduce condiciones de riesgo adicionales debido a la interacción entre operaciones y manipulación de sustancias, lo cual incrementa la probabilidad de ocurrencia.

Escenario 3: Incendio en patio de tanques (TK-12)

Se identificó el escenario de incendio en el patio de tanques como el de mayor complejidad, debido a la presencia de grandes volúmenes de combustible y la proximidad entre unidades.

Figura 13

TK-12 Esquema de exposición térmica entre tanques



Fuente: Propia

Las características principales de este escenario son:

. Tipo de incendio: incendio en tanque

. Mecanismo predominante: radiación térmica

. Riesgo asociado: propagación por efecto dominó

. Impacto: afectación de tanques adyacentes

Se determinó que, en este caso, el tanque TK-12 actúa como fuente de radiación, generando una exposición térmica significativa sobre los tanques circundantes, lo cual incrementa la severidad del evento.

Análisis comparativo de escenarios

A partir de los escenarios definidos, se analizó el comportamiento del fuego en cada caso, identificándose diferencias fundamentales:

. El escenario 1 presenta una propagación superficial rápida, pero controlable mediante espuma.

. El escenario 2 introduce condiciones de riesgo asociadas a la operación, con posibilidad de explosión.

. El escenario 3 presenta un comportamiento más complejo, dominado por radiación térmica y propagación entre equipos.

Estas diferencias permiten establecer que los escenarios no son equivalentes, sino que presentan distintos niveles de severidad y demanda de control.

Interpretación técnica

El análisis realizado permitió determinar que el riesgo de incendio en el terminal está condicionado por:

. La naturaleza de las sustancias

. La configuración de almacenamiento

. La interacción entre equipos

En particular, el escenario de incendio en el patio de tanques presenta las condiciones más desfavorables, debido a la posibilidad de propagación del fuego entre múltiples unidades, lo cual incrementa significativamente la demanda del sistema contra incendios.

5.1.4. Evaluación del riesgo de incendio

En el desarrollo de la presente investigación, se evaluó el riesgo de incendio asociado a los escenarios identificados en el terminal de almacenamiento, con el

propósito de determinar la severidad de cada evento y su influencia en la demanda del sistema contra incendios. En el ámbito de la ingeniería de seguridad industrial, el riesgo se define como la combinación entre la probabilidad de ocurrencia de un evento y la magnitud de sus consecuencias, siendo este último el factor predominante en instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos (Lees, 2012).

En este tipo de instalaciones, la relevancia de la consecuencia sobre la probabilidad se justifica en que el diseño del sistema contra incendios no se orienta a la ocurrencia más frecuente, sino a la condición más severa que el sistema debe ser capaz de controlar. Esto implica que el dimensionamiento hidráulico debe responder al escenario de mayor demanda térmica y no al de mayor frecuencia de ocurrencia.

Bajo este enfoque, la evaluación del riesgo permitió establecer un criterio técnico para la selección del escenario de diseño, asegurando que el sistema contra incendios sea capaz de enfrentar el evento de mayor exigencia en términos de transferencia de calor, consumo de agente extintor y tiempo de operación.

5.1.4.1. Fundamento teórico de la evaluación del riesgo

Desde el punto de vista de la ingeniería, el riesgo de incendio puede expresarse como:

$$R=f(P,C)$$

Donde:

R: Riesgo

P: Probabilidad de ocurrencia

C: Consecuencia del evento

La expresión R=f(P,C) no es una fórmula matemática en el sentido estricto de una ecuación determinística, sino una relación conceptual ampliamente aceptada en el

campo de la ingeniería de riesgos, particularmente en el análisis de seguridad industrial y protección contra incendios. Esta formulación tiene su origen en los enfoques de análisis de riesgo cuantitativo (QRA, Quantitative Risk Assessment) desarrollados en la industria de procesos, donde el riesgo se entiende como una función de dos componentes fundamentales:

la probabilidad de ocurrencia de un evento no deseado

la consecuencia o severidad asociada a dicho evento

Autores como Trevor Kletz y posteriormente Frank Lees formalizan este enfoque en el análisis de riesgos industriales, estableciendo que:

El riesgo no depende únicamente de la frecuencia de ocurrencia, sino del impacto que el evento puede generar sobre el sistema.

En el contexto de incendios, esta relación se traduce en que un evento poco probable puede gobernar el diseño si sus consecuencias son suficientemente severas.

En el presente estudio, esta relación se utiliza como criterio de evaluación para comparar escenarios de incendio, permitiendo establecer que el diseño del sistema contra incendios debe basarse en el escenario con mayor consecuencia térmica.

Esto implica que el dimensionamiento hidráulico del sistema (caudal, presión y tiempo de operación) se define a partir del escenario que presenta:

. mayor liberación de calor

. mayor interacción térmica

. mayor potencial de propagación

y no necesariamente del escenario con mayor probabilidad de ocurrencia.

En sistemas industriales de almacenamiento de combustibles, la consecuencia del incendio está directamente relacionada con la tasa de liberación de calor (Heat

Release Rate, HRR), la cual depende del tipo de combustible, el área involucrada y las condiciones de combustión. Asimismo, factores como la geometría del sistema, la proximidad entre equipos, la intensidad de radiación térmica y las condiciones de ventilación influyen significativamente en la magnitud del evento (Drysdale, 2011; API, 2014).

En este contexto, la evaluación del riesgo se orienta principalmente a determinar la capacidad del sistema para disipar la carga térmica generada, más que a estimar la frecuencia del evento. Esta perspectiva es fundamental en el diseño de sistemas de agua y espuma, donde el caudal requerido está directamente asociado a la energía liberada durante el incendio.

5.1.4.2. Evaluación del riesgo en el escenario 1 (almacenamiento interior)

Se evaluó el riesgo asociado a las operaciones de carga y descarga de camiones cisterna mediante el análisis de las condiciones operativas del proceso, considerando la manipulación directa de sustancias inflamables, la posibilidad de generación de derrames dinámicos y la presencia de múltiples fuentes de ignición.

Para el desarrollo de este análisis, se tomó en cuenta la interacción simultánea entre combustible, oxígeno y fuentes de ignición, condición que favorece la ocurrencia de incendios en esta zona. Asimismo, se consideró la naturaleza transitoria de las operaciones, donde el flujo continuo de producto incrementa la probabilidad de fuga o liberación accidental.

Desde el punto de vista de la consecuencia, se evaluó el comportamiento del incendio bajo condiciones de ignición súbita, identificándose la posibilidad de generación de fenómenos tipo flash fire, caracterizados por una rápida propagación de la llama en presencia de vapores inflamables. Adicionalmente, se consideró el potencial

de sobrepresión en caso de ignición en espacios parcialmente confinados, lo cual introduce un riesgo adicional asociado a eventos de carácter explosivo.

Como resultado del análisis, se determinó que este escenario presenta una alta probabilidad de ocurrencia debido a la naturaleza operativa de la actividad, así como una consecuencia significativa asociada a la afectación directa de equipos y personal. Sin embargo, se estableció que la extensión del evento se encuentra limitada espacialmente, ya que el volumen de combustible involucrado en un derrame es menor en comparación con los escenarios de almacenamiento masivo.

En consecuencia, este escenario se caracteriza por una combinación de alta probabilidad y consecuencia relevante, pero con una demanda térmica y requerimiento hidráulico inferiores a los escenarios donde el incendio involucra grandes volúmenes de almacenamiento.

5.1.4.3. Evaluación del riesgo en el escenario 2 (zona de carga y descarga)

Se evaluó el riesgo asociado a las operaciones de carga y descarga de camiones cisterna mediante el análisis de las condiciones operativas del proceso, considerando la manipulación directa de sustancias inflamables, la posibilidad de generación de derrames dinámicos y la presencia de múltiples fuentes de ignición.

Para el desarrollo de este análisis, se tomó en cuenta la interacción simultánea entre combustible, oxígeno y fuentes de ignición, condición que favorece la ocurrencia de incendios en esta zona. Asimismo, se consideró la naturaleza transitoria de las operaciones, donde el flujo continuo de producto incrementa la probabilidad de fuga o liberación accidental.

Desde el punto de vista de la consecuencia, se evaluó el comportamiento del incendio bajo condiciones de ignición súbita, identificándose la posibilidad de generación de fenómenos tipo flash fire, caracterizados por una rápida propagación de

la llama en presencia de vapores inflamables. Adicionalmente, se consideró el potencial de sobrepresión en caso de ignición en espacios parcialmente confinados, lo cual introduce un riesgo adicional asociado a eventos de carácter explosivo.

Como resultado del análisis, se determinó que este escenario presenta una alta probabilidad de ocurrencia debido a la naturaleza operativa de la actividad, así como una consecuencia significativa asociada a la afectación directa de equipos y personal. Sin embargo, se estableció que la extensión del evento se encuentra limitada espacialmente, ya que el volumen de combustible involucrado en un derrame es menor en comparación con los escenarios de almacenamiento masivo.

En consecuencia, este escenario se caracteriza por una combinación de alta probabilidad y consecuencia relevante, pero con una demanda térmica y requerimiento hidráulico inferiores a los escenarios donde el incendio involucra grandes volúmenes de almacenamiento.

5.1.4.4. Evaluación del riesgo en el escenario 3 (patio de tanques – TK-12)

Se evaluó el escenario de incendio en el patio de tanques considerando las condiciones reales de almacenamiento, el volumen de combustible involucrado y los mecanismos de transferencia de calor predominantes entre unidades. Este análisis se centró en el tanque TK-12, asumiéndolo como punto de inicio del evento, con el objetivo de determinar su comportamiento como fuente de liberación térmica sostenida.

A diferencia de los escenarios previamente evaluados, en este caso el combustible no se encuentra limitado a una superficie reducida ni a un volumen transitorio, sino contenido en un tanque de gran capacidad, lo que implica una combustión prolongada en el tiempo. Esta condición introduce un cambio sustancial en el análisis, ya que el incendio no puede considerarse como un evento de corta duración, sino como un proceso continuo de liberación de energía.

Para el desarrollo del análisis, se evaluó la relación entre el volumen de combustible disponible, la superficie expuesta a la combustión y la disposición geométrica de los tanques dentro del patio. La proximidad entre unidades, junto con la ausencia de barreras térmicas efectivas, permite que la energía liberada por el tanque en combustión sea transferida hacia los recipientes adyacentes. En este contexto, se determinó que el mecanismo predominante de propagación corresponde a la radiación térmica.

Este fenómeno implica que la energía emitida desde el tanque TK-12 incide directamente sobre las superficies cercanas, generando un incremento progresivo de temperatura en las paredes de los tanques adyacentes. Como resultado, se produce una degradación de las propiedades mecánicas del material, lo que puede conducir a la pérdida de resistencia estructural y, en condiciones críticas, a la falla del recipiente.

Este comportamiento da lugar a un mecanismo de propagación en cadena, en el cual la afectación de un tanque incrementa la probabilidad de compromiso de las unidades contiguas. En términos de ingeniería, esta condición se reconoce como un efecto dominó, característico de incendios en instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos.

Desde el punto de vista térmico, el análisis permitió establecer que este escenario presenta una carga de incendio superior a la de los demás casos evaluados. Esto se explica por la continuidad en la liberación de energía, la interacción térmica simultánea entre múltiples equipos y la imposibilidad de controlar el incendio en su fase inicial. A diferencia de los incendios por derrame, donde la cantidad de combustible disponible limita la duración del evento, en este caso la masa almacenada permite sostener el proceso de combustión durante periodos prolongados.

Desde la perspectiva del diseño del sistema contra incendios, este comportamiento implica que la estrategia de control no se orienta exclusivamente a la extinción del fuego, sino principalmente a la reducción de la transferencia de calor mediante enfriamiento continuo de las superficies expuestas. En consecuencia, la demanda del sistema se ve condicionada por la necesidad de disipar energía térmica de manera sostenida, lo cual exige mayores caudales de agua, operación prolongada del sistema y cobertura simultánea de múltiples equipos.

Como resultado del análisis, se determinó que, aunque este escenario presenta una menor probabilidad de ocurrencia en comparación con los escenarios operativos, su nivel de consecuencia es significativamente mayor, tanto en términos de carga térmica como de potencial de propagación.

En consecuencia, el escenario de incendio en el tanque TK-12 se establece como la condición crítica de diseño, ya que representa la máxima exigencia que el sistema contra incendios debe ser capaz de soportar, constituyendo el caso base para el dimensionamiento hidráulico del sistema. La Tabla 2 presenta la comparación cualitativa de los escenarios de incendio evaluados, considerando variables clave como probabilidad, consecuencia térmica y mecanismo dominante, lo que permite identificar el nivel de riesgo relativo y establecer el escenario crítico que gobierna el diseño del sistema contra incendios.

Tabla 3

Comparación de niveles de riesgo - Cualitativa

Escenario	Tipo de evento	Probabilidad	Consecuencia térmica	Alcance	Mecanismo dominante	Nivel de riesgo
1	Derrame en	Alta	Moderada	Local	Pool fire	Medio

Escenario	Tipo de evento	Probabilidad	Consecuencia térmica	Alcance	Mecanismo dominante	Nivel de riesgo
	almacén interior					
2	Carga y descarga	Alta	Moderada – Alta	Local	Flash fire	Medio – Alto
3	Incendio en tanque TK-12	Baja	Muy alta	Extendida	Radiación térmica	Crítico

Fuente: Propia

La clasificación cualitativa del riesgo se estableció considerando la relación entre la probabilidad de ocurrencia y la severidad térmica del evento. En el contexto de instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos, la consecuencia adquiere un rol predominante debido a la magnitud de la energía liberada durante el incendio, lo cual condiciona directamente el diseño del sistema contra incendios.

A partir de la información presentada en la tabla, se observa que, si bien los escenarios asociados a almacenamiento interior y operaciones de carga presentan una mayor probabilidad de ocurrencia, el escenario correspondiente al patio de tanques (TK-12) destaca por la magnitud de sus consecuencias, las cuales se encuentran directamente relacionadas con la liberación sostenida de energía térmica y el potencial de propagación entre unidades.

Este resultado confirma que el riesgo en el terminal no está gobernado por la frecuencia del evento, sino por la severidad del mismo, particularmente en aquellos casos donde la transferencia de calor por radiación puede comprometer múltiples equipos de manera simultánea. La Tabla 3 presenta la evaluación cuantitativa del riesgo mediante la matriz Probabilidad–Consecuencia (P×C), permitiendo comparar numéricamente los escenarios analizados y establecer su nivel de criticidad en función de la magnitud del riesgo asociado.

Tabla 4

Comparación de niveles de riesgo – Cuantitativa – Matriz P vs C

Escenario	P (Probabilidad)	C (Consecuencia)	R = P×C	Clasificación
1	3	2	6	Medio
2	3	3	9	Medio – Alto
3	1	5	5	Alto (crítico por consecuencia)

Fuente: Elaboración propia

Si bien la evaluación cuantitativa mediante la relación R=P×C permite comparar escenarios en términos generales, en sistemas contra incendios el diseño no se basa en el valor numérico del riesgo, sino en la magnitud de la consecuencia. En este sentido, el escenario correspondiente al tanque TK-12, a pesar de presentar una menor probabilidad, concentra la mayor severidad térmica, lo cual lo convierte en el escenario gobernante para el dimensionamiento del sistema. La Tabla 4 presenta la matriz de interpretación del riesgo utilizada en la investigación, estableciendo los rangos de clasificación en función del producto Probabilidad–Consecuencia (P×C), lo que permite asignar niveles de riesgo y definir criterios técnicos para la toma de decisiones en el diseño del sistema contra incendios.

Tabla 5

Matriz de interpretación

Rango de riesgo (R = P × C)	Nivel de riesgo	Interpretación
1 – 4	Bajo	Evento con impacto limitado, controlable con medidas operativas básicas
5 – 8	Medio	Evento con consecuencias moderadas que requiere sistemas de protección
9 – 12	Alto	Evento con impacto significativo que exige control técnico especializado
≥ 13	Crítico	Evento con consecuencias severas que gobierna el diseño del sistema

Fuente: Adaptado de metodologías de análisis de riesgo en la industria de procesos (Lees, 2012; CCPS, 2000).

La matriz de interpretación del riesgo se basa en metodologías ampliamente utilizadas en el análisis de riesgos industriales, particularmente en el enfoque de evaluación semicuantitativa, donde el riesgo se expresa como el producto entre la probabilidad de ocurrencia y la magnitud de las consecuencias.

Este tipo de matrices es empleado en el análisis de procesos industriales y en estudios de seguridad para clasificar los niveles de riesgo en función de su severidad, permitiendo establecer criterios de priorización y toma de decisiones (CCPS, 2000).

Los rangos de clasificación adoptados no representan valores universales rígidos, sino que constituyen una herramienta de interpretación que facilita la comparación entre escenarios. En este sentido, la escala utilizada en la presente investigación ha sido definida considerando criterios de ingeniería aplicados a sistemas contra incendios, donde la severidad del evento, expresada en términos de carga térmica y potencial de propagación, adquiere un rol predominante.

En particular, los niveles superiores de la matriz (alto y crítico) están asociados a escenarios en los cuales la liberación de energía térmica y la interacción entre equipos pueden comprometer la integridad del sistema, requiriendo el dimensionamiento de sistemas de protección con mayor capacidad hidráulica y operativa.

¿Por qué el escenario 3 es crítico si R = 5 < 9?

La comparación entre escenarios mediante la relación R=P×C permite ordenar el riesgo en términos relativos; sin embargo, este valor no es suficiente para definir el escenario de diseño en sistemas contra incendios. La razón es que dicha relación no representa explícitamente variables físicas determinantes como la tasa de liberación de calor, la duración del incendio ni la interacción térmica entre equipos, las cuales son las que gobiernan la demanda real del sistema.

En la presente investigación, el escenario correspondiente a las operaciones de carga y descarga alcanza un valor mayor de R debido a su alta probabilidad de ocurrencia. No obstante, se trata de eventos de corta duración, con volúmenes limitados de combustible y, por tanto, con una liberación de energía acotada en el tiempo. En términos de diseño, esto implica que, aunque el evento sea frecuente, la demanda térmica que impone al sistema es relativamente baja y controlable en lapsos reducidos.

En contraste, el escenario asociado al tanque TK-12 presenta una condición distinta. Aun cuando su probabilidad de ocurrencia es menor, el volumen de combustible almacenado permite sostener la combustión durante periodos prolongados, generando una liberación continua de energía. Este comportamiento se traduce en una mayor carga térmica acumulada, la cual no solo afecta al tanque involucrado, sino que se transfiere por radiación hacia los equipos adyacentes, incrementando progresivamente su temperatura. Bajo estas condiciones, el incendio deja de ser un evento localizado y pasa a convertirse en un fenómeno con potencial de propagación entre unidades, lo que incrementa significativamente su severidad.

Desde el punto de vista del diseño del sistema contra incendios, este tipo de escenario es el que define la demanda hidráulica, ya que exige la aplicación sostenida de agua para enfriamiento y la operación continua del sistema durante un tiempo

prolongado. En consecuencia, el criterio de selección del escenario crítico no se basa en el valor numérico de R, sino en la magnitud de la energía liberada y en la capacidad del incendio para mantenerse y propagarse dentro del sistema.

Este enfoque es consistente con los principios de la ingeniería de protección contra incendios, donde el dimensionamiento de los sistemas se realiza en función del escenario de mayor severidad térmica y no del de mayor frecuencia de ocurrencia (Drysdale, 2011; Lees, 2012; NFPA, 2021).

5.1.5. Determinación de la demanda de espuma para incendio por derrame en almacenamiento interior

En el desarrollo de la presente investigación, se analizó el escenario de incendio por derrame en el área de almacenamiento interior, tomando como base la información técnica contenida en la memoria descriptiva, con el objetivo de determinar la demanda del sistema de extinción mediante espuma.

Este tipo de incendio corresponde a un pool fire, caracterizado por la combustión superficial de líquidos inflamables, donde la velocidad de propagación del fuego está asociada a la volatilidad del combustible y a la generación continua de vapores inflamables. En este contexto, el control del incendio no se logra únicamente mediante enfriamiento, sino a través de la supresión de vapores y el aislamiento del combustible respecto del oxígeno (Drysdale, 2011).

Bajo estas condiciones, se determinó que el uso de espuma constituye el método más adecuado de control, debido a su capacidad para formar una película sobre la superficie del líquido, reduciendo la emisión de vapores y evitando la reignición del incendio. Este principio de funcionamiento es consistente con los criterios establecidos en la National Fire Protection Association 11, donde se establece el uso de espuma para

incendios de líquidos inflamables (NFPA, 2021). La Tabla 5 presenta los parámetros de diseño considerados para el dimensionamiento del sistema de supresión mediante espuma en el escenario de derrame, definiendo las variables clave que determinan la demanda hidráulica y el tiempo de aplicación requerido para el control del incendio.

5.1.5.1. Parámetros de Diseño

Tabla 6

Parámetros de diseño

Parámetro	Valor	Unidad
Área del derrame (A)	1997.35	ft^2
Tasa de aplicación (R)	0.20	gpm/ft^2
Concentración de espuma (C)	3% (0.03)	-
Tiempo de aplicación (t)	15	min

Fuente: Elaboración propia

El tiempo de aplicación de 15 minutos adoptado para el cálculo del volumen de solución de espuma no corresponde a un valor arbitrario, sino que se fundamenta en los criterios de diseño establecidos para sistemas de extinción de incendios por espuma en líquidos inflamables.

De acuerdo con la National Fire Protection Association, específicamente en la norma NFPA 11 (Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam), el tiempo mínimo de aplicación para sistemas de espuma en incendios tipo pool fire debe ser suficiente para garantizar tres condiciones fundamentales: la supresión completa de

vapores inflamables, la extinción del frente de llama y la prevención de reignición del combustible. Para incendios en derrames de hidrocarburos en áreas confinadas o controladas, se establecen tiempos típicos de aplicación del orden de 10 a 15 minutos, dependiendo del tipo de combustible y de la configuración del sistema (NFPA, 2021).

En el contexto de la presente investigación, se adoptó un valor de 15 minutos como criterio de diseño conservador, considerando que el almacenamiento interior presenta condiciones que favorecen la acumulación de vapores inflamables y la persistencia del proceso de combustión. Este tiempo permite asegurar no solo la extinción inicial del incendio, sino también la estabilización de la capa de espuma sobre la superficie del combustible, evitando la reignición por liberación residual de vapores.

Desde el punto de vista físico, la espuma actúa como una barrera que separa el combustible del oxígeno y reduce la transferencia de calor hacia el líquido. Sin embargo, esta acción no es instantánea ni permanente si no se mantiene una aplicación continua durante un periodo suficiente. Por ello, el tiempo de aplicación se convierte en una variable crítica en el diseño, ya que define el volumen total de agente requerido para sostener la capa de espuma hasta lograr condiciones estables de extinción.

Asimismo, literatura técnica en ingeniería de procesos establece que el tiempo de operación en sistemas de supresión debe ser coherente con la dinámica del incendio y con la capacidad del sistema para mantener la cobertura del agente extintor durante todo el proceso de control (Crowl & Louvar, 2011). En este sentido, un tiempo inferior podría resultar insuficiente para evitar la reignición, mientras que un tiempo mayor no aporta beneficios significativos en escenarios de derrame controlado, incrementando innecesariamente la demanda del sistema.

En consecuencia, la adopción de 15 minutos en el presente cálculo garantiza una condición de diseño segura y técnicamente sustentada, alineada con los criterios

normativos y con el comportamiento físico del incendio por derrame, permitiendo dimensionar adecuadamente el volumen de concentrado y de agua requeridos para la operación efectiva del sistema de espuma.

Justificación de la tasa de aplicación de 0.20 gpm/ft²

La tasa de aplicación de 0.20 gpm/ft² corresponde a la densidad mínima de descarga de solución de espuma requerida para el control de incendios tipo pool fire en líquidos inflamables, conforme a los criterios establecidos por la National Fire Protection Association en la norma NFPA 11 (Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam).

Desde el punto de vista normativo, NFPA 11 define que la cantidad de solución de espuma aplicada sobre la superficie del combustible debe ser suficiente para cumplir simultáneamente tres funciones: formar una capa continua que cubra el líquido, suprimir la liberación de vapores inflamables y resistir la degradación térmica producida por la radiación del incendio. Para combustibles hidrocarbonados, la norma establece valores típicos de aplicación en el orden de 0.16 a 0.25 gpm/ft², dependiendo del tipo de sistema de descarga, la calidad de la espuma y las condiciones del incendio (NFPA, 2021).

En el presente estudio, se adoptó el valor de 0.20 gpm/ft² como criterio de diseño intermedio dentro del rango normativo, lo cual responde a un enfoque conservador y técnicamente equilibrado. Este valor permite garantizar una cobertura efectiva del área del derrame sin sobredimensionar innecesariamente el sistema.

Desde el punto de vista físico, la tasa de aplicación representa la velocidad a la cual la solución de espuma debe ser suministrada para mantener una capa estable sobre la superficie del combustible. Si la tasa es inferior al valor requerido, la espuma se degrada más rápido de lo que se forma, debido a la acción del calor y la evaporación, lo que impide el control del incendio. Por el contrario, una tasa adecuada asegura que la

espuma se acumule progresivamente, generando una barrera que interrumpe la transferencia de masa (vapores) y reduce la retroalimentación térmica hacia el combustible.

En el caso específico del almacenamiento interior analizado en la memoria descriptiva, el incendio se desarrolla en un área confinada, donde la acumulación de vapores inflamables y la radiación térmica pueden intensificar la combustión. Bajo estas condiciones, la adopción de una tasa de 0.20 gpm/ft² permite compensar estos efectos, asegurando una aplicación suficiente para lograr la extinción y prevenir la reignición.

Asimismo, literatura en seguridad de procesos indica que la selección de la tasa de aplicación debe considerar no solo el tipo de combustible, sino también las condiciones del entorno, tales como ventilación, geometría del recinto y posibles perturbaciones en la superficie del líquido (Crowl & Louvar, 2011). En este sentido, el valor adoptado resulta consistente con un diseño que prioriza la confiabilidad del sistema frente a condiciones reales de operación.

En consecuencia, la tasa de aplicación de 0.20 gpm/ft² empleada en el presente cálculo se encuentra plenamente sustentada tanto en criterios normativos como en principios físicos de control de incendios, garantizando una adecuada formación y mantenimiento de la capa de espuma sobre el combustible.

Justificación de la concentración de espuma al 3%

La selección de una concentración de 3% para el agente espumante utilizado en el sistema contra incendios no responde a un valor arbitrario, sino que se fundamenta en criterios normativos y en el comportamiento fisicoquímico de los agentes espumantes diseñados para incendios de hidrocarburos.

De acuerdo con la National Fire Protection Association, en la norma NFPA 11 (2021), los concentrados de espuma para aplicaciones en líquidos inflamables se

formulan típicamente para ser utilizados en proporciones de 1%, 3% o 6%, dependiendo del tipo de combustible y de las características del agente. En el caso de hidrocarburos —que corresponden a combustibles no polares— los concentrados de tipo AFFF (Aqueous Film Forming Foam) y espumas proteicas fluoradas han sido desarrollados para operar eficientemente a concentraciones del 3%, garantizando la formación de una película acuosa estable sobre la superficie del combustible.

Desde el punto de vista físico, la concentración del agente espumante define la proporción de compuestos activos (tensioactivos) presentes en la solución, los cuales son responsables de reducir la tensión superficial del agua y permitir la formación de una capa continua sobre el combustible. A una concentración del 3%, estos compuestos alcanzan un equilibrio adecuado que permite:

. la formación de una película resistente a la radiación térmica,

. la supresión efectiva de vapores inflamables,

. la estabilidad de la espuma durante el tiempo de aplicación requerido.

Si la concentración fuese inferior (por ejemplo, 1%), la cantidad de agentes activos podría resultar insuficiente para mantener la integridad de la película en condiciones de alta temperatura, lo que incrementaría el riesgo de reignición. Por el contrario, concentraciones mayores (como 6%) no necesariamente mejoran el desempeño en hidrocarburos, sino que incrementan el consumo de concentrado sin un beneficio proporcional en la eficiencia de extinción, afectando el dimensionamiento del sistema.

En el contexto específico de la presente investigación, el escenario de incendio por derrame en almacenamiento interior involucra líquidos inflamables derivados de hidrocarburos, los cuales generan incendios tipo pool fire con liberación continua de

vapores. Bajo estas condiciones, la utilización de espuma al 3% permite garantizar la rápida formación de una película superficial que interrumpe el proceso de evaporación del combustible, reduciendo la retroalimentación térmica y facilitando la extinción del incendio.

Asimismo, literatura especializada en seguridad de procesos indica que los sistemas de espuma deben ser diseñados utilizando concentraciones compatibles con las características del agente y del combustible, priorizando la eficiencia de extinción y la estabilidad de la espuma (Crowl & Louvar, 2011). En este sentido, la concentración del 3% representa un estándar ampliamente adoptado en instalaciones industriales para el control de incendios de hidrocarburos, siendo consistente con los criterios de diseño empleados en la memoria descriptiva del sistema analizado.

En consecuencia, la selección de una concentración del 3% en el presente estudio se encuentra sustentada en normativa internacional, en el comportamiento fisicoquímico del agente espumante y en las condiciones específicas del escenario de incendio evaluado, garantizando una adecuada eficiencia en la extinción sin sobredimensionar el consumo de concentrado.

5.1.5.2. Determinación del caudal de solución de espuma

La determinación del caudal de solución de espuma se basa en el concepto de densidad de aplicación superficial, el cual establece que la cantidad de agente extintor debe ser proporcional al área del incendio.

$$Qs = A \cdot R \qquad (1)$$

Donde:

- Qs: Caudal de solución de espuma (gpm)
- A: Área del derrame (ft^2)
- R: Tasa de aplicación (gpm/ft^2)

Donde el caudal de solución depende directamente del área afectada y de la tasa mínima de aplicación recomendada para el tipo de combustible. Este criterio se encuentra definido en NFPA 11 para incendios de hidrocarburos, donde se establecen valores mínimos de aplicación para garantizar la extinción y evitar la reignición.

Aplicación:

$Qs=1997.35\times0.20=399.47$ gpm

Se determinó que el caudal requerido de solución de espuma es 399.47 gpm.

El resultado obtenido indica que el sistema debe ser capaz de suministrar un caudal de 399.47 gpm de solución de espuma, valor que garantiza la cobertura completa del área del derrame bajo condiciones de incendio.

5.1.5.3. Determinación del caudal de concentrado de espuma

El caudal de concentrado se determina en función del porcentaje de dosificación del agente espumante, el cual corresponde a la proporción de concentrado dentro de la solución total.

$$Qc=Qs\cdot C \qquad (2)$$

Donde:

- Qc: Caudal de concentrado de espuma (gpm)
- C: Fracción de concentración (0.03)

Este principio responde a la relación de mezcla volumétrica utilizada en sistemas de generación de espuma, donde el concentrado se inyecta en una proporción específica para asegurar la calidad y estabilidad de la espuma generada. La proporción de concentrado se determina en función del porcentaje de dosificación del agente

espumante, conforme a los criterios de mezcla establecidos en NFPA 11 (NFPA, 2021a).

Aplicación:

$$Qc=399.47\times 0.03 = 11.98 \text{ gpm}$$

Se determina que el sistema requiere un caudal de 11.98 gpm de concentrado de espuma, lo cual es consistente con sistemas de dosificación al 3% utilizados en incendios de hidrocarburos.

Porque el uso del 3%, porque es la concentración óptima para espumas tipo AFFF en hidrocarburos, ya que garantiza formación de película, estabilidad térmica y supresión de vapores, conforme a NFPA 11.

Porque no el 1%, porque el 1% se utiliza en agentes más modernos o específicos, pero el 3% es el estándar robusto para hidrocarburos en condiciones industriales como las evaluadas.

5.1.5.4. Determinación del caudal de agua

$$Qw=Qs-Qc \quad (3)$$

El caudal de agua corresponde a la fracción restante de la solución de espuma, una vez descontado el concentrado, conforme al principio de mezcla volumétrica (Crowl & Louvar, 2011).

Este balance responde al principio de conservación de masa aplicado a mezclas líquidas, donde la solución total es la suma del agua y el concentrado.

Aplicación:

$$Qw=399.47-11.98 = 387.49 \text{ gpm}$$

El sistema debe suministrar 387.49 gpm de agua, lo cual representa la mayor proporción del flujo requerido para la generación de espuma.

5.1.5.5. Determinación del volumen requerido

El volumen total requerido se determina a partir de la relación entre caudal y tiempo de operación:

$$V=Q\cdot t \quad (4)$$

Donde:

- V: Volumen (gal)
- Q: Caudal (gpm)
- t: Tiempo (min)

Esta relación corresponde a un principio fundamental de la hidráulica, donde el volumen total suministrado depende del caudal y del tiempo durante el cual el sistema debe operar de manera continua (Çengel & Cimbala, 2014).

5.1.5.6. Volumen de concentrado

$Vc=11.98 \times 15 = 179.76$ gal

El volumen requerido de concentrado garantiza la operación continua del sistema durante el tiempo de diseño establecido.

5.1.5.7. Volumen de agua

$Vw=387.49 \times 15 = 5812.29$ gal

Este volumen representa la cantidad de agua necesaria para sostener la generación de espuma durante el tiempo de aplicación.

El análisis realizado permitió determinar que el escenario de incendio en almacenamiento interior requiere un caudal de 399.47 gpm durante 15 minutos, lo cual corresponde a una demanda moderada en comparación con escenarios de mayor complejidad.

Desde el punto de vista físico, este comportamiento se explica porque el incendio se desarrolla sobre una superficie limitada y el combustible disponible se consume progresivamente, lo que reduce la duración efectiva del evento. Asimismo, la aplicación de espuma permite controlar el incendio en etapas tempranas, disminuyendo la energía liberada al sistema.

En este sentido, el escenario presenta condiciones de control localizado y tiempos de respuesta relativamente cortos, lo que implica una menor exigencia en comparación con escenarios donde el incendio es sostenido y afecta múltiples unidades.

El desarrollo de este escenario permitió establecer los requerimientos específicos del sistema de espuma, validar la aplicación de los criterios establecidos en NFPA 11 y generar una base técnica para la comparación con escenarios de mayor demanda térmica.

Asimismo, este análisis demuestra que el tipo de incendio influye directamente en la selección del agente extintor y en la magnitud de la demanda del sistema, lo cual se relaciona con las hipótesis planteadas en la investigación.

El porque se tomó como tiempo los 15 min, porque NFPA 11 establece tiempos mínimos de aplicación para garantizar extinción completa y evitar reignición, y 15 minutos representa un criterio conservador adecuado para incendios por derrame en condiciones de almacenamiento interior.

5.1.6. Análisis y cálculo del escenario 3: incendio en patio de tanques (TK-12)

En el desarrollo de la presente investigación, se analizó el escenario de incendio en el patio de tanques, tomando como caso representativo el tanque TK-12, en concordancia con la información contenida en la memoria descriptiva. La selección de este tanque no responde únicamente a su ubicación dentro del sistema, sino a las

condiciones reales de exposición térmica y proximidad con otros tanques, las cuales configuran un escenario con alto potencial de interacción entre unidades.

A diferencia del incendio por derrame evaluado previamente, donde el control se basa en la aplicación directa de espuma sobre la superficie del combustible, en el caso de incendios en tanques de almacenamiento el enfoque de control cambia de manera sustancial. En estos escenarios, la masa de combustible disponible permite sostener el proceso de combustión durante periodos prolongados, lo que implica una liberación continua de energía térmica. Bajo estas condiciones, la estrategia principal no es la extinción inmediata del incendio, sino la protección de los tanques expuestos mediante enfriamiento, con el fin de evitar la degradación estructural del material y la propagación del evento hacia otras unidades (API, 2014; NFPA 15).

5.1.6.1. Fundamento físico

El análisis del escenario permitió identificar que el mecanismo predominante de transferencia de calor corresponde a la radiación térmica. Este fenómeno se define como la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas desde una superficie a alta temperatura hacia su entorno, sin necesidad de un medio material para su propagación (Drysdale, 2011).

En el caso de incendios en tanques, la radiación térmica generada por el tanque en combustión incide directamente sobre las superficies de los tanques adyacentes, produciendo un incremento progresivo de temperatura en sus paredes. Este aumento térmico no es uniforme ni instantáneo, sino acumulativo, y depende de factores como la distancia entre tanques, el área expuesta y la intensidad del incendio.

Desde el punto de vista estructural, el incremento de temperatura en el acero de los tanques provoca una reducción de sus propiedades mecánicas, particularmente del límite de fluencia, lo que puede conducir a deformaciones, pérdida de estabilidad e

incluso falla del recipiente. En condiciones extremas, este proceso puede derivar en fenómenos como ruptura estructural o eventos de tipo BLEVE, incrementando significativamente la severidad del incendio.

Figura 14

Esquema de exposición térmica entre tanques (TK-12)



Fuente: Propia

Tal como se muestra en la figura 14, el tanque central actúa como fuente de radiación, afectando parcialmente la superficie de los tanques circundantes.

Criterio de diseño adoptado

Para el dimensionamiento del sistema de enfriamiento, se adoptó un criterio basado en la práctica de ingeniería industrial y en lineamientos establecidos en normas como API 521 y NFPA 15. Este criterio considera que no toda la superficie de los

tanques adyacentes está expuesta de manera uniforme a la radiación térmica, sino que existe una fracción de la superficie que recibe la mayor carga térmica.

En este sentido, se asumió que aproximadamente un tercio de la superficie lateral de los tanques adyacentes se encuentra sometido a radiación significativa. Este valor no es arbitrario, sino que responde a observaciones experimentales y criterios de diseño utilizados en la industria, donde se reconoce que la exposición térmica es más intensa en la zona directamente enfrentada al foco del incendio.

5.1.6.2. Determinación del área a enfriar

El área total a proteger se determinó considerando la suma del área del tanque incendiado y la fracción expuesta de los tanques adyacentes, de acuerdo con la siguiente relación:

$$AT = Ainc + 1/3 \sum Aady \quad (9)$$

Donde:

- AT: Área total a enfriar
- Ainc: Área del tanque incendiado
- Aady: Área de tanques adyacentes

Esta expresión responde a la necesidad de cuantificar la superficie efectiva sobre la cual debe aplicarse el sistema de enfriamiento, integrando tanto el foco del incendio como las superficies susceptibles de ser afectadas por radiación.

A partir de los datos obtenidos en la memoria descriptiva, se determinó que el área total de exposición corresponde a:

$$AT = 278.08 \text{ m}2$$

Este valor representa la superficie que debe ser protegida de manera continua para evitar la propagación del incendio.

5.1.6.2.1. Justificación del área del tanque incendiado (Ainc) y áreas adyacentes (Aady)

La determinación de las variables AincA_{inc}Ainc y AadyA_{ady}Aady no corresponde a valores asumidos, sino que se obtiene directamente a partir de la geometría real de los tanques considerados en la memoria descriptiva del sistema. En este sentido, el análisis se basa en las dimensiones físicas de los equipos, lo cual garantiza que los resultados reflejen condiciones reales de operación.

En el caso del área del tanque incendiado AincA_{inc}Ainc, se consideró la **superficie lateral del tanque**, ya que es la zona que participa activamente tanto en la liberación de calor como en la interacción térmica con el entorno. Este criterio se fundamenta en el hecho de que, durante un incendio en tanque, la transferencia de calor hacia el exterior ocurre principalmente a través de la envolvente lateral, siendo esta la superficie que emite radiación térmica hacia los tanques vecinos.

Geométricamente, esta área se determina a partir de la expresión del área lateral de un cilindro:

$$A_{inc} = \pi \cdot D \cdot H$$

donde D corresponde al diámetro del tanque y H a la altura del nivel de líquido o altura efectiva expuesta. Estos valores se obtienen de la memoria descriptiva, por lo que el cálculo no introduce supuestos, sino que reproduce la configuración real del tanque TK-12.

Por otro lado, las áreas correspondientes a los tanques adyacentes AadyA_{ady}Aady se determinan utilizando el mismo criterio geométrico, considerando igualmente sus superficies laterales. Sin embargo, desde el punto de vista físico, no toda esta superficie está sometida a la misma intensidad de radiación térmica.

La exposición depende de la orientación respecto al tanque incendiado y de la distancia entre unidades.

Por esta razón, el modelo de cálculo no considera la totalidad de la superficie de los tanques adyacentes, sino únicamente una fracción representativa de la zona efectivamente expuesta. En este estudio se adopta el criterio de **un tercio (1/3) del área lateral**, el cual es ampliamente utilizado en prácticas de diseño industrial y está alineado con recomendaciones de normas como API 521.

Este criterio responde a la distribución angular de la radiación térmica, donde la máxima intensidad se concentra en la zona frontal directamente expuesta al incendio, mientras que las zonas laterales y posteriores reciben una carga térmica significativamente menor. En términos prácticos, asumir un tercio del área permite representar de manera razonable la superficie crítica que requiere enfriamiento.

Desde el punto de vista del resultado, la combinación de AincA_{inc}Ainc y la fracción de AadyA_{ady}Aady conduce a un área total de enfriamiento de **278.08 m²**, valor que integra tanto la fuente de calor como las superficies susceptibles de falla por exposición térmica.

Este resultado es consistente con la configuración del sistema descrita en la memoria, donde la proximidad entre tanques favorece la interacción térmica. Asimismo, el valor obtenido no es excesivo ni subestimado, lo que indica que el modelo adoptado representa adecuadamente la condición real de exposición.

En términos de diseño, este enfoque tiene una implicancia directa: el sistema de enfriamiento no se dimensiona únicamente para el tanque incendiado, sino para el conjunto de superficies que pueden verse comprometidas por la radiación. Esto refuerza la idea de que el escenario de tanques no es un evento aislado, sino un sistema acoplado térmicamente.

- **Conclusión técnica**

  La definición de Aincy Aady se encuentra sustentada en:

- la geometría real de los tanques (memoria descriptiva),
- principios físicos de transferencia de calor por radiación,
- criterios de diseño establecidos en normas y prácticas industriales (API 521).

En consecuencia, el área total calculada no es un valor supuesto, sino el resultado de integrar la configuración real del sistema con el comportamiento térmico del incendio, lo cual garantiza que el dimensionamiento del sistema contra incendios responda a condiciones reales y no teóricas.

Estas áreas se calculan a partir de la geometría real de los tanques de la memoria descriptiva, considerando la superficie lateral, y en el caso de los tanques adyacentes se toma un tercio del área como zona efectiva de radiación, según criterios de API.

5.1.6.2.2. Justificación del uso del área lateral en el análisis de enfriamiento de tanques

En el análisis del escenario de incendio en el patio de tanques, se emplea la superficie lateral como base para el cálculo del área a enfriar, debido a que la transferencia de calor dominante es la radiación entre superficies enfrentadas. En estos eventos, la energía térmica emitida por el tanque incendiado incide principalmente sobre las envolventes laterales de los tanques adyacentes, que presentan mayor área efectiva y alineación geométrica con la fuente de calor.

La superficie superior no constituye una zona crítica de exposición, ya que no está directamente enfrentada al foco radiativo y recibe un flujo térmico significativamente menor por efectos de geometría y dispersión. Incluirla en el cálculo implicaría sobreestimar la demanda del sistema sin sustento físico.

Asimismo, considerar el área total del tanque incorporaría superficies con baja participación en el intercambio radiativo, distorsionando el dimensionamiento hidráulico. En diseño de sistemas contra incendios, el criterio debe representar la exposición real y no condiciones idealizadas.

Este enfoque es consistente con lineamientos del American Petroleum Institute (API 521) y la National Fire Protection Association (NFPA 15), que establecen la aplicación de enfriamiento sobre las superficies efectivamente expuestas, principalmente la envolvente lateral.

En el presente estudio, la configuración del patio favorece la interacción radiativa horizontal, por lo que el uso del área lateral permite estimar de forma representativa la demanda de enfriamiento, evitando sobredimensionamientos y manteniendo coherencia con el comportamiento físico del fenómeno.

Conclusión técnica

El uso del área lateral en el cálculo del sistema de enfriamiento se justifica porque:

. representa la superficie directamente expuesta a radiación térmica,

. concentra la mayor transferencia de calor entre tanques,

. permite modelar de manera realista la interacción térmica del sistema,

. evita la sobreestimación de la demanda hidráulica.

En consecuencia, este criterio garantiza que el dimensionamiento del sistema contra incendios se base en condiciones físicas reales del fenómeno de incendio, en concordancia con prácticas de ingeniería y normativa aplicable.

Porque se considera solo el área lateral

Porque la radiación térmica entre tanques ocurre principalmente entre superficies enfrentadas, que corresponden a las superficies laterales; incluir otras áreas no representaría correctamente el fenómeno físico.

5.1.6.2.3. Justificación del uso de 1/3 del área lateral de tanques adyacentes

La adopción de un tercio (1/3) del área lateral de los tanques adyacentes como superficie efectiva de enfriamiento se fundamenta en la distribución no uniforme de la radiación térmica emitida por el tanque incendiado. En este tipo de escenarios, la transferencia de calor por radiación se concentra en la zona del tanque directamente enfrentada al foco, disminuyendo conforme aumenta el ángulo de incidencia, en concordancia con los principios de factores de vista y geometría radiativa (Drysdale, 2011).

Desde el punto de vista geométrico, en tanques cilíndricos próximos, la mayor carga térmica se localiza en la franja frontal, mientras que las zonas laterales reciben una contribución significativamente menor debido a la reducción del factor de vista. Considerar el 100% del área lateral implicaría asumir una distribución uniforme del flujo térmico, lo cual no es físicamente representativo y conduce a una sobreestimación del requerimiento de enfriamiento.

El criterio de 1/3 del área lateral corresponde a una aproximación técnica de la zona efectivamente expuesta, asociada a un rango angular cercano a ±60°, donde se concentra la mayor transferencia de calor. Este enfoque es consistente con prácticas de ingeniería y lineamientos del American Petroleum Institute (API 521), que reconocen la exposición parcial de los equipos en función de su orientación y proximidad.

En el contexto del presente estudio, la disposición de los tanques favorece la interacción radiativa directa, por lo que el uso de 1/3 del área lateral permite representar la zona crítica de exposición sin sobredimensionar el sistema de enfriamiento.

Interpretación en el resultado obtenido

Al aplicar este criterio, el área total de enfriamiento calculada (278.08 m²) incorpora tanto la superficie emisora del tanque incendiado como la fracción relevante de los tanques adyacentes. Este valor refleja una condición intermedia entre un escenario conservador extremo (100% de superficie) y uno no seguro (subestimación), permitiendo que el caudal resultante sea coherente con la magnitud real del fenómeno térmico.

Esto tiene una implicancia directa en el diseño: el sistema no se dimensiona para enfriar todo el tanque, sino únicamente la zona que efectivamente puede alcanzar temperaturas críticas. De esta manera, se optimiza la demanda hidráulica sin comprometer la seguridad del sistema.

Conclusión técnica

El uso de un tercio del área lateral de los tanques adyacentes como superficie efectiva de enfriamiento se encuentra sustentado en la forma en que se distribuye la radiación térmica en escenarios de incendio en tanques. En este tipo de eventos, la transferencia de calor no se produce de manera uniforme sobre toda la superficie del tanque receptor, sino que presenta una distribución angular dependiente de la orientación relativa entre el tanque incendiado y los tanques adyacentes. La mayor intensidad de radiación se concentra en la región frontal directamente expuesta al foco del incendio, disminuyendo progresivamente hacia las zonas laterales debido a la reducción del ángulo de incidencia y del factor de vista entre superficies.

Desde el punto de vista físico, el intercambio radiactivo entre dos superficies está gobernado por la fracción de energía que efectivamente “ve” una superficie

respecto a la otra, lo cual se expresa mediante el factor de vista. En configuraciones típicas de tanques cilíndricos dispuestos en proximidad, este factor no es uniforme a lo largo de toda la envolvente, sino que alcanza sus valores máximos en la zona directamente enfrentada al incendio. Como consecuencia, es en esta región donde se concentran los mayores flujos de calor y, por tanto, donde existe mayor probabilidad de alcanzar temperaturas críticas que comprometan la integridad estructural del tanque.

Bajo este enfoque, considerar la totalidad del área lateral implicaría asumir una distribución homogénea de la radiación, lo cual no es consistente con el comportamiento físico del fenómeno y conduciría a una sobreestimación de la demanda hidráulica del sistema. Por otro lado, reducir excesivamente la superficie considerada podría subestimar la zona efectivamente expuesta, comprometiendo la seguridad del diseño. En este contexto, la adopción de un tercio del área lateral representa un equilibrio técnico adecuado, ya que permite capturar de manera razonable la zona de mayor exposición térmica sin introducir conservadurismos excesivos.

Este criterio no solo se sustenta en fundamentos de transferencia de calor por radiación, sino que también es consistente con prácticas de diseño empleadas en la industria de procesos, donde se reconoce que la exposición térmica en tanques adyacentes es parcial y dependiente de la geometría del sistema. En consecuencia, su aplicación en el presente estudio garantiza que el dimensionamiento del sistema de enfriamiento responda a condiciones físicas reales del fenómeno de incendio, permitiendo una estimación coherente de la demanda hidráulica sin incurrir en sobre o subdimensionamientos.

5.1.6.3. Determinación de la densidad de aplicación

Se evaluaron dos criterios de diseño:

Caso 1: Densidad conservadora

D1=4.1 L/min\cdotpm2

Caso 2: Densidad crítica (NFPA/API)

D2=10.2 L/min\cdotpm2

Estas densidades representan:

- Enfriamiento mínimo requerido
- Condición severa de incendio

(NFPA 15; API 521)

La densidad de aplicación de agua constituye el parámetro que define la cantidad de flujo requerido por unidad de superficie para disipar la energía térmica incidente sobre los tanques expuestos. Este valor no es arbitrario, sino que se encuentra establecido en normas de diseño de sistemas de protección contra incendios, particularmente en NFPA 15, donde se especifican rangos de aplicación para el enfriamiento de equipos sometidos a radiación térmica.

En el presente análisis se consideraron dos condiciones de diseño, representativas de distintos niveles de severidad térmica. La primera corresponde a una densidad de 4.1 L/min·m² (0.10 gpm/ft²), la cual representa una condición base de enfriamiento utilizada en escenarios de exposición moderada. Este valor permite controlar el incremento de temperatura en superficies expuestas, manteniéndolas dentro de rangos seguros cuando la carga térmica no es extrema.

La segunda condición corresponde a una densidad de 10.2 L/min·m² (0.25 gpm/ft²), la cual representa un escenario de exposición severa, caracterizado por la presencia de incendios sostenidos y alta radiación térmica. Este valor es recomendado en NFPA 15 para situaciones donde existe riesgo de afectación estructural de equipos y posible propagación del incendio.

En el contexto del escenario analizado, donde la proximidad entre tanques favorece la interacción térmica y la propagación por radiación, la adopción de la densidad de 10.2 L/min·m² se justifica como criterio de diseño, ya que permite garantizar la capacidad del sistema para disipar la energía térmica bajo condiciones críticas. Este enfoque es consistente con prácticas de ingeniería que establecen que el dimensionamiento del sistema debe basarse en el escenario de mayor severidad y no en condiciones promedio.

Las densidades provienen de NFPA 15, donde 0.10 y 0.25 gpm/ft² representan condiciones de enfriamiento moderado y severo; se adopta la mayor porque el escenario es crítico.

5.1.6.4. Cálculo del caudal requerido

Caso 1:

$$Q=AT\cdot D \qquad 10)$$

$Q1=278.08 \times 4.1 = 1139.13$ L/min

$Q1=300.8$gpm

Caso 2:

$Q2=278.08 \times 10.2 = 2836.42$ L/min

$Q2=749.0$gpm

5.1.6.5. Determinación del volumen requerido

Se estableció un tiempo de operación de:

$t=240$ min (4 horas)

$$V=Q\cdot t \qquad (11)$$

Caso crítico:

$V=749.0\times240=179{,}760$gal

El análisis desarrollado permitió establecer que el escenario de incendio en el tanque TK-12 impone una demanda hidráulica significativamente mayor en comparación con el escenario de almacenamiento interior, lo cual se explica por la naturaleza del fenómeno físico involucrado. En este caso, el caudal requerido no está determinado por la necesidad de extinguir el fuego de manera directa, sino por la exigencia de mantener un enfriamiento continuo sobre las superficies expuestas, con el fin de disipar la energía térmica transferida por radiación.

A diferencia de los incendios por derrame, donde el combustible disponible es limitado y el control puede lograrse en intervalos de tiempo relativamente cortos, el incendio en un tanque de almacenamiento se caracteriza por una combustión sostenida, alimentada por un volumen considerable de producto. Esta condición genera una liberación continua de energía térmica, lo que obliga al sistema contra incendios a operar de manera prolongada para evitar que los tanques adyacentes alcancen temperaturas críticas que comprometan su integridad estructural.

En este contexto, el tiempo de operación adoptado, del orden de varias horas, no responde a una decisión arbitraria, sino a la necesidad de mantener condiciones térmicas seguras durante todo el periodo en que el incendio permanece activo. Como consecuencia directa, el volumen total de agua requerido se incrementa significativamente, reflejando la magnitud de la energía que debe ser absorbida por el sistema.

Desde el punto de vista de la ingeniería, estos resultados evidencian que la demanda del sistema está dominada por la transferencia de calor y no por la extinción inmediata del incendio. En consecuencia, se confirma que el dimensionamiento del sistema contra incendios debe basarse en el escenario de mayor severidad térmica, es

decir, aquel que presenta la mayor liberación de energía y el mayor potencial de propagación, y no necesariamente en el evento de mayor frecuencia de ocurrencia.

5.1.6.5.1. Justificación del tiempo de operación de 4 horas en el escenario de incendio en tanques

El tiempo de operación de 4 horas (240 minutos) adoptado para el sistema de enfriamiento en el escenario de incendio del tanque TK-12 se sustenta en criterios normativos, comportamiento térmico del fenómeno y prácticas de diseño en la industria de hidrocarburos. Estándares de la National Fire Protection Association (NFPA 15) y lineamientos del American Petroleum Institute (API 2030, API 521) establecen que los sistemas de enfriamiento deben operar durante periodos prolongados —típicamente entre 3 y 4 horas para asegurar la protección continua mientras persista la exposición térmica.

Desde el punto de vista físico, los incendios en tanques se caracterizan por su duración sostenida debido al volumen de combustible disponible, generando una radiación térmica continua hacia equipos adyacentes. En este contexto, el objetivo del sistema no es la extinción inmediata, sino limitar el incremento de temperatura en las superficies expuestas, evitando la degradación de las propiedades mecánicas del acero.

El requerimiento de operación continua se justifica además por la inercia térmica del material: una interrupción prematura del enfriamiento puede provocar un aumento posterior de temperatura, aun sin incremento de la carga térmica externa. Por ello, el tiempo de aplicación debe garantizar la estabilización térmica del sistema durante todo el periodo crítico del incendio.

En la presente investigación, la adopción de 4 horas responde a un criterio conservador acorde con la severidad del escenario analizado, permitiendo sostener la disipación de calor y reducir el riesgo de propagación por radiación. Este parámetro

define directamente el volumen total de agua requerido y la autonomía del sistema, constituyendo una variable clave en el dimensionamiento hidráulico.

5.1.6.6. Análisis del comportamiento del sistema

El análisis del escenario de incendio en el tanque TK-12 permitió establecer que el elevado caudal requerido por el sistema contra incendios no es un resultado aislado, sino la consecuencia directa de la interacción entre variables geométricas y fenómenos de transferencia de calor propios de este tipo de eventos. En particular, la magnitud del caudal está fuertemente influenciada por la superficie total expuesta al flujo radiativo y por la configuración del patio de tanques, donde la proximidad entre unidades favorece la interacción térmica. Esta condición genera una transferencia continua de energía desde el tanque en combustión hacia los tanques adyacentes, lo que obliga a mantener un enfriamiento sostenido para evitar el incremento progresivo de temperatura en las paredes de los recipientes (Drysdale, 2011; SFPE, 2016).

Desde el punto de vista físico, el requerimiento de caudal está asociado a la necesidad de disipar la energía térmica incidente mediante la aplicación de agua, la cual actúa como medio de enfriamiento al absorber calor por convección y evaporación. Este mecanismo implica que el sistema debe ser capaz de compensar el flujo de calor radiativo que incide sobre las superficies expuestas; de lo contrario, la temperatura del material continuará aumentando, comprometiendo sus propiedades mecánicas. En este sentido, normas de diseño como NFPA 15 establecen densidades de aplicación orientadas precisamente a garantizar la remoción efectiva de calor en escenarios de exposición severa, mientras que lineamientos del American Petroleum Institute reconocen la radiación térmica como el principal mecanismo de afectación entre tanques en instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos (NFPA, 2022; API, 2014).

En cuanto al volumen total requerido, este se encuentra directamente condicionado por el tiempo de operación del sistema, el cual en este tipo de escenarios debe ser prolongado debido a la naturaleza sostenida del incendio. A diferencia de los incendios por derrame, donde el combustible disponible es limitado, en los tanques de almacenamiento la combustión puede mantenerse durante periodos extendidos, lo que exige un suministro continuo de agua para mantener las condiciones térmicas bajo control. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en la literatura de seguridad industrial, donde se establece que la duración del enfriamiento debe ser suficiente para evitar la acumulación de calor en las estructuras expuestas y prevenir fallas por pérdida de resistencia del material (Lees, 2012; Crowl & Louvar, 2011).

Como consecuencia de lo anterior, el sistema contra incendios debe ser concebido no solo en términos de caudal instantáneo, sino también en función de su capacidad de operación sostenida. Esto implica la necesidad de contar con una fuente de agua que garantice el suministro continuo durante el tiempo de diseño, así como con una capacidad de almacenamiento acorde al volumen total requerido. De igual manera, el sistema de bombeo debe ser capaz de operar de manera estable bajo condiciones de alta demanda, asegurando que el caudal y la presión se mantengan dentro de los rangos necesarios para una adecuada distribución del agua sobre las superficies protegidas.

En este contexto, el análisis del escenario 3 permite identificar de manera clara que el dimensionamiento del sistema está gobernado por la condición de mayor severidad térmica, es decir, aquella en la que la liberación de energía y la interacción entre equipos alcanzan sus valores más críticos. Este resultado no solo define la máxima demanda del sistema, sino que establece las condiciones bajo las cuales deben seleccionarse los componentes principales del sistema contra incendios. En consecuencia, el escenario del tanque TK-12 se consolida como el caso de diseño,

constituyendo el fundamento técnico para el dimensionamiento del sistema y la validación de las hipótesis planteadas en la investigación.

5.1.7. Análisis integrado de escenarios de incendio

Con el propósito de establecer la influencia de cada escenario sobre el comportamiento del sistema contra incendios, se procedió a realizar una comparación directa de los resultados obtenidos, considerando como variables principales el caudal requerido, el tiempo de operación y el volumen total de agua necesario. Esta comparación permite evaluar de manera objetiva la magnitud de la demanda impuesta por cada escenario y su implicancia en el dimensionamiento del sistema.

Tabla 7

Comparación de comportamiento hidráulico

Parámetro	Escenario 1 (Almacenamiento interior)	Escenario 3 (Patio de tanques – TK-12)
Caudal	399.47 gpm	749.0 gpm
Tiempo	15 min	240 min
Volumen	5,812 gal	179,760 gal

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 6 presenta la comparación del comportamiento hidráulico entre los escenarios analizados, permitiendo evidenciar las diferencias en caudal, tiempo de operación y volumen requerido, y establecer el escenario que gobierna el dimensionamiento del sistema contra incendios.

A partir de los resultados presentados, se evidencia que el escenario asociado al tanque TK-12 impone una exigencia hidráulica significativamente mayor en comparación con el almacenamiento interior. Si bien el caudal requerido en el escenario de tanques es aproximadamente 1.9 veces superior, esta diferencia resulta relativamente

moderada cuando se analiza de manera aislada. Sin embargo, el comportamiento del sistema no está determinado únicamente por el caudal instantáneo, sino por la interacción entre caudal y tiempo de operación.

En este sentido, la variable que introduce la mayor diferencia entre escenarios es el tiempo de operación, el cual en el caso del escenario de tanques es del orden de 16 veces mayor que en el almacenamiento interior. Esta condición tiene un efecto directo sobre el volumen total requerido, el cual resulta más de 30 veces superior en el escenario 3. Desde el punto de vista de la ingeniería, este resultado es coherente con el balance energético del sistema, ya que el volumen de agua requerido está directamente relacionado con la cantidad total de energía que debe ser absorbida para controlar el incendio (Incropera et al., 2007; SFPE, 2016).

La diferencia observada responde a la naturaleza física de los incendios evaluados. En el escenario de almacenamiento interior, la combustión se desarrolla sobre una superficie limitada y el control se logra mediante la aplicación de espuma, lo que permite una extinción relativamente rápida del incendio. En contraste, en el escenario de tanques la combustión se mantiene de forma sostenida debido al gran volumen de combustible disponible, y el sistema actúa principalmente mediante enfriamiento, disipando de manera continua la energía térmica transferida por radiación hacia los tanques adyacentes (Drysdale, 2011; API, 2014).

Este comportamiento confirma que la demanda del sistema contra incendios está gobernada por la duración del evento y por la magnitud de la transferencia de calor, más que por el valor del caudal instantáneo. En consecuencia, el escenario del tanque TK-12 se configura como el caso crítico de diseño, ya que representa la condición en la que el sistema debe operar durante el mayor tiempo y bajo la mayor carga térmica.

La inclusión de esta comparación permite no solo visualizar las diferencias entre escenarios, sino también fundamentar técnicamente la selección del escenario de diseño, estableciendo una relación directa entre los resultados obtenidos y los criterios de dimensionamiento del sistema contra incendios. En este sentido, la tabla presentada constituye una herramienta clave para la toma de decisiones en el diseño, al evidenciar de manera cuantitativa cuál es el escenario que gobierna la demanda del sistema.

5.1.8. Determinación del escenario crítico de diseño

En el desarrollo de la presente investigación, la determinación del escenario crítico de incendio se abordó como una etapa decisiva orientada a definir la condición más exigente a la cual debe responder el sistema contra incendios. En el ámbito de la ingeniería de protección contra incendios, el dimensionamiento de los sistemas no se basa en condiciones promedio ni en la ocurrencia más frecuente de eventos, sino en aquellos escenarios que imponen la mayor demanda en términos de energía, recursos hidráulicos y potencial de afectación, garantizando así la operatividad del sistema bajo condiciones severas (Lees, 2012; National Fire Protection Association, 2021).

Bajo este enfoque, la identificación del escenario crítico no constituye una simple selección comparativa, sino un proceso de evaluación técnica que integra los resultados obtenidos en los escenarios previamente analizados, considerando tanto variables hidráulicas como el comportamiento físico del incendio. Este criterio responde a principios ampliamente aceptados en la ingeniería de seguridad industrial, donde la severidad del evento, entendida como la magnitud de sus consecuencias, adquiere mayor relevancia que su probabilidad de ocurrencia (Lees, 2012; American Petroleum Institute, 2014).

5.1.8.1. Criterios para la determinación del escenario crítico

La evaluación se realizó considerando un conjunto de criterios técnicos que permiten caracterizar de manera integral la exigencia impuesta al sistema. Entre estos, destacan la magnitud del caudal requerido, el volumen total de agua necesario, el tiempo de operación del sistema, la extensión del área afectada y el potencial de propagación del incendio. Estos criterios no actúan de forma independiente, sino que se encuentran interrelacionados a través del fenómeno físico que gobierna el incendio, particularmente la transferencia de calor y la disponibilidad de combustible (Drysdale, 2011; SFPE, 2016).

Desde esta perspectiva, el análisis se orientó a identificar no solo el escenario con mayor caudal instantáneo, sino aquel que representa la mayor demanda energética total, entendida como la cantidad de calor que debe ser absorbida por el sistema durante el evento. Este enfoque resulta fundamental en instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos, donde los incendios pueden evolucionar hacia condiciones de alta severidad debido a la interacción entre equipos y la continuidad del proceso de combustión (API, 2014; Lees, 2012).

5.1.8.2. Comparación de escenarios analizados

Con base en los resultados obtenidos, se estableció una comparación integral de los escenarios evaluados, considerando tanto sus características físicas como sus implicancias hidráulicas:

Tabla 8

Comparación de escenarios de incendio

Parámetro	Escenario 1 (Almacenamiento interior)	Escenario 3 (Tanques TK-12)
Tipo de incendio	Derrame (pool fire)	Incendio en tanque

Parámetro	Escenario 1 (Almacenamiento interior)	Escenario 3 (Tanques TK-12)
Mecanismo predominante	Combustión superficial	Radiación térmica
Agente de control	Espuma	Agua (enfriamiento)
Caudal requerido	399.47 gpm	749.0 gpm
Tiempo de operación	15 min	240 min
Volumen requerido	5,812 gal	179,760 gal
Propagación	Limitada	Alta (efecto dominó)

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 7 presenta la comparación técnica entre los principales escenarios de incendio analizados, destacando las diferencias en mecanismo de propagación, agente de control y demanda hidráulica, lo que permite identificar el escenario más exigente para el diseño del sistema contra incendios.

La información presentada permite evidenciar que las diferencias entre escenarios no se limitan a los valores hidráulicos, sino que responden a la naturaleza del incendio y al mecanismo físico predominante en cada caso. Mientras que el escenario de almacenamiento interior está gobernado por la combustión superficial de líquidos inflamables, el escenario en el patio de tanques está dominado por la radiación térmica, la cual genera una transferencia continua de energía hacia los equipos adyacentes (Drysdale, 2011; API, 2014).

5.1.8.3. Análisis técnico comparativo

El análisis comparativo permite establecer que el escenario de almacenamiento interior presenta una demanda controlada, caracterizada por una rápida extinción del incendio debido a la aplicación de espuma, lo que limita tanto la duración del evento como su extensión espacial. En este caso, el sistema actúa directamente sobre el combustible, interrumpiendo el proceso de combustión mediante la supresión de vapores inflamables (NFPA, 2021; Crowl & Louvar, 2011).

En contraste, el escenario de incendio en el tanque TK-12 presenta un comportamiento sustancialmente distinto. La presencia de grandes volúmenes de combustible permite que la combustión se mantenga durante periodos prolongados, mientras que la radiación térmica genera un proceso continuo de transferencia de calor hacia los tanques adyacentes. Esta condición incrementa la severidad del evento, ya que introduce la posibilidad de propagación del incendio por efecto dominó, ampliando el área afectada y elevando la demanda del sistema (API, 2014; Lees, 2012).

Desde el punto de vista hidráulico, la diferencia más significativa entre escenarios no radica únicamente en el caudal, sino en el tiempo de operación, el cual determina el volumen total requerido. Este resultado es consistente con los principios de transferencia de calor, donde la energía total a disipar depende de la duración del evento y no solo de la intensidad instantánea (Incropera et al., 2007; SFPE, 2016).

5.1.8.4. Determinación del escenario crítico

A partir del análisis desarrollado, se establece que el escenario de incendio en el tanque TK-12 constituye el escenario crítico de diseño, al concentrar simultáneamente la mayor demanda de caudal, el mayor tiempo de operación, el mayor volumen de agua requerido y el mayor potencial de propagación del incendio. Esta condición lo convierte en el escenario que impone la máxima exigencia sobre el sistema contra incendios.

Desde una perspectiva de ingeniería, este resultado confirma que el diseño del sistema debe estar gobernado por la condición de mayor severidad térmica, entendida como aquella en la que la liberación de energía y su interacción con el entorno alcanzan niveles críticos. En este sentido, el sistema debe ser capaz de sostener un enfriamiento continuo que permita evitar la falla estructural de los tanques y controlar la propagación del incendio, más que extinguirlo de manera inmediata (API, 2014; NFPA, 2021).

Asimismo, el análisis evidencia que la naturaleza del incendio condiciona directamente la demanda del sistema. Mientras que los incendios por derrame generan requerimientos asociados al uso de espuma y a la extinción rápida, los incendios en tanques imponen demandas significativamente mayores debido a la necesidad de disipar energía térmica de forma sostenida. Esta diferencia constituye un elemento central en la definición del sistema de protección contra incendios.

5.1.8.5. Importancia en el desarrollo de la investigación

La determinación del escenario crítico representa uno de los aportes más relevantes de la presente investigación, ya que establece la base técnica para el dimensionamiento del sistema contra incendios. A partir de este resultado, es posible definir el caudal de diseño, el volumen de almacenamiento de agua y las condiciones de operación del sistema, garantizando que este sea capaz de responder ante el evento de mayor exigencia.

Adicionalmente, este análisis permite validar el enfoque metodológico adoptado, al demostrar que el diseño del sistema debe fundamentarse en la evaluación del riesgo y en la comprensión del comportamiento físico del incendio. De esta manera, se confirma que la protección contra incendios no puede abordarse desde una perspectiva simplificada, sino que requiere integrar variables térmicas, hidráulicas y operativas para garantizar la seguridad de la instalación.

En consecuencia, la identificación del escenario crítico no solo orienta el diseño del sistema, sino que constituye un elemento clave para la validación de las hipótesis planteadas, al evidenciar que la demanda del sistema contra incendios está directamente condicionada por la severidad del escenario evaluado.

5.1.9. Validación de resultados del modelo de cálculo

En el desarrollo de la presente investigación, la validación de los resultados obtenidos se realizó mediante la contrastación directa con criterios normativos y rangos de diseño establecidos en la ingeniería de protección contra incendios, particularmente en estándares de la National Fire Protection Association y lineamientos del American Petroleum Institute. Este proceso permite verificar que los valores calculados no solo sean coherentes internamente, sino también consistentes con prácticas aceptadas en el diseño de sistemas contra incendios (NFPA, 2021; API, 2014).

5.1.9.1. Validación del escenario 1 – Sistema de espuma

El dimensionamiento del sistema de espuma se basa en la densidad de aplicación superficial establecida en la norma NFPA 11, la cual define valores mínimos en función del tipo de combustible y del método de aplicación. Los valores presentados en la Tabla 8 establecen los rangos de densidad de aplicación de espuma para incendios en hidrocarburos, conforme a NFPA 11. Estos rangos permiten seleccionar una tasa de aplicación acorde con la severidad del escenario, constituyendo la base para el dimensionamiento del sistema de supresión.

Tabla 9

Densidades de aplicación para espuma (NFPA 11)

Tipo de riesgo	Densidad (gpm/ft²)
Hidrocarburos (mínimo)	0.10
Hidrocarburos (recomendado)	0.16 – 0.20
Riesgos severos / diseño conservador	0.20 – 0.30

Fuente: NFPA 11 (2021)

En la presente investigación se adoptó una densidad de:

R=0.20gpm/ft2

Este valor corresponde al límite superior del rango recomendado para hidrocarburos, lo cual se justifica por:

. condiciones de almacenamiento interior

. presencia de vapores inflamables

. necesidad de control rápido del incendio

Desde el punto de vista normativo, el valor adoptado cumple con los criterios establecidos por NFPA 11, garantizando una cobertura suficiente para la supresión de vapores inflamables y el control del incendio.

Asimismo, la proporción de concentrado utilizada:

C=3%

corresponde a concentraciones típicas de espumas tipo AFFF para hidrocarburos, conforme a NFPA 11 y literatura técnica especializada (NFPA, 2021; Crowl & Louvar, 2011).

5.1.9.2. Validación del escenario 3 – Sistema de enfriamiento de tanques

El dimensionamiento del sistema de enfriamiento se basa en densidades de aplicación de agua establecidas en NFPA 15 y prácticas del API, las cuales dependen del nivel de exposición térmica. Los valores consignados en la Tabla 9 corresponden a las densidades de enfriamiento utilizadas en la protección de tanques expuestos a radiación térmica, diferenciadas según el nivel de severidad del incendio. Estos criterios permiten ajustar la demanda de agua en función de la intensidad de la exposición térmica y las condiciones de interacción entre equipos.

Tabla 10

Densidades de enfriamiento de tanques

Condición	Densidad (L/min·m²)	Equivalente (gpm/ft²)
Mínima (protección básica)	4.1	0.10
Intermedia	6.1 – 8.1	0.15 – 0.20
Crítica (alta radiación)	10.2	0.25

Fuente: NFPA 15 (2022); API 2030

En el presente estudio se evaluaron dos condiciones:

. Caso base: 4.1 L/min·m²

. Caso crítico: 10.2 L/min·m²

Adoptándose finalmente la condición crítica para el diseño, debido a:

. proximidad entre tanques

. posibilidad de efecto dominó

. exposición prolongada a radiación térmica

Este criterio es consistente con lo establecido por API, donde se reconoce que la radiación térmica es el mecanismo predominante de afectación entre tanques en incendios de hidrocarburos (API, 2014). La información de la Tabla 9 define los niveles de aplicación de agua requeridos para el enfriamiento de tanques, en función de la intensidad de la radiación incidente. Esta diferenciación permite establecer un criterio de diseño acorde con la severidad del escenario y sustentar la selección de la condición más exigente para el dimensionamiento del sistema.

5.1.9.3. Validación del tiempo de operación

Tabla 11

Tiempo de aplicación según tipo de sistema

Sistema	Tiempo típico
Espuma (derrames)	10 – 20 min
Enfriamiento de tanques	3 – 4 horas

Fuente: NFPA 11; NFPA 15; API 2030

Los valores de tiempo de operación adoptados en la investigación corresponden a 15 minutos para el sistema de espuma en el escenario de almacenamiento interior y 240 minutos para el sistema de enfriamiento en el escenario de incendio en tanques. El primer valor se encuentra dentro de los rangos establecidos en la normativa para incendios por derrame de líquidos inflamables, donde el control del fuego se logra en periodos relativamente cortos mediante la supresión de vapores. En contraste, el tiempo de 240 minutos responde a un criterio conservador ampliamente utilizado en el diseño de sistemas de enfriamiento de tanques, en los cuales el incendio presenta un comportamiento sostenido.

Desde el punto de vista físico, esta diferencia se explica por la naturaleza del proceso de combustión y del mecanismo de transferencia de calor involucrado. En incendios de tanques, la disponibilidad de grandes volúmenes de combustible permite que la liberación de energía térmica se mantenga en el tiempo, generando un flujo continuo de radiación hacia los tanques adyacentes. Bajo estas condiciones, la aplicación de agua no tiene como objetivo la extinción inmediata del incendio, sino la disipación constante de la energía térmica para evitar el incremento progresivo de temperatura en las superficies expuestas. Si el enfriamiento se interrumpe antes de que

la carga térmica haya disminuido, el calor acumulado en el material puede provocar un aumento posterior de temperatura, debido a la inercia térmica del sistema, comprometiendo la integridad estructural de los equipos.

En este sentido, el tiempo prolongado de operación se justifica como una condición necesaria para garantizar la estabilidad térmica del sistema durante todo el periodo crítico del incendio, lo cual es consistente con los principios de transferencia de calor y con el comportamiento observado en incendios industriales de hidrocarburos (Drysdale, 2011; Lees, 2012).

5.1.9.4. Validación global del sistema

La coherencia de los resultados también se verifica mediante la relación:

$V=Q\cdot t$

donde el volumen total requerido refleja la energía térmica que debe ser absorbida por el sistema. Esta relación es consistente con los principios de conservación de energía y transferencia de calor, ampliamente desarrollados en la literatura de ingeniería térmica (Incropera et al., 2007).

Los tiempos de operación adoptados en la presente investigación, correspondientes a 15 minutos para el sistema de espuma en el escenario de almacenamiento interior y 240 minutos para el sistema de enfriamiento en el escenario de incendio en tanques, responden a criterios normativos y a la naturaleza física de los incendios analizados. En el caso del sistema de espuma, el tiempo de aplicación se encuentra dentro de los rangos establecidos por la National Fire Protection Association en la norma NFPA 11, donde se indica que los incendios por derrame de líquidos inflamables pueden ser controlados en intervalos relativamente cortos, debido a que el mecanismo de extinción se basa en la supresión de vapores y la interrupción de la combustión superficial (NFPA, 2021; Crowl & Louvar, 2011).

Por el contrario, el tiempo de 240 minutos adoptado para el enfriamiento de tanques responde a criterios más exigentes, establecidos en normas como NFPA 15 y en prácticas recomendadas por el American Petroleum Institute, donde se reconoce que los incendios en tanques de almacenamiento presentan un comportamiento sostenido en el tiempo, asociado a la gran cantidad de combustible disponible y a la continuidad del proceso de combustión (NFPA, 2022; API, 2014). En este tipo de escenarios, la aplicación de agua no tiene como finalidad la extinción inmediata del incendio, sino la disipación de la energía térmica transferida por radiación hacia los tanques adyacentes, con el objetivo de evitar su calentamiento progresivo y la eventual falla estructural.

Desde el punto de vista de la transferencia de calor, el requerimiento de un tiempo prolongado de operación se justifica por la necesidad de compensar un flujo térmico continuo. La radiación emitida por el tanque en combustión genera un aporte constante de energía sobre las superficies expuestas, el cual debe ser contrarrestado mediante la aplicación sostenida de agua. Si el enfriamiento se interrumpe antes de que disminuya la intensidad del incendio, el calor acumulado en el material puede dar lugar a un incremento posterior de temperatura debido a la inercia térmica, lo que incrementa el riesgo de pérdida de resistencia mecánica del acero y de propagación del evento (Drysdale, 2011; Incropera et al., 2007).

En consecuencia, el tiempo de operación adoptado no constituye un valor arbitrario, sino un parámetro de diseño directamente vinculado con la magnitud y duración del fenómeno térmico, garantizando que el sistema contra incendios sea capaz de mantener condiciones seguras durante todo el periodo crítico del incendio. Este enfoque es consistente con los principios de la ingeniería de protección contra incendios, donde el dimensionamiento del sistema se basa en la condición de mayor

severidad y en la necesidad de asegurar la estabilidad térmica de las estructuras expuestas (Lees, 2012; SFPE, 2016).

5.1.10. Validación y comprobación de hipótesis

La validación de hipótesis en la presente investigación se fundamenta en la contrastación entre las proposiciones planteadas y los resultados obtenidos a partir del análisis hidráulico y la evaluación de escenarios de incendio. Según Roberto Hernández Sampieri (2014), la comprobación de hipótesis requiere evidencia objetiva que permita verificar la relación entre variables; en este caso, dicha verificación se realiza mediante parámetros cuantificables como caudales, presiones y tiempos de respuesta del sistema.

En el ámbito de la ingeniería de seguridad, la validación no se limita a la consistencia de los datos, sino que exige coherencia con los principios físicos que gobiernan el fenómeno. En este sentido, Frank P. Lees (2012) establece que la efectividad de un sistema contra incendios debe evaluarse en función de su capacidad de respuesta ante escenarios críticos, mientras que Daniel A. Crowl y Joseph F. Louvar (2011) indican que la validación del riesgo implica analizar variables físicas y parámetros que controlan el comportamiento del incendio.

Bajo este enfoque, la comprobación de las hipótesis se sustenta en: (i) los resultados de los cálculos hidráulicos, (ii) la interpretación del comportamiento del incendio en términos de transferencia de calor y combustión, y (iii) la concordancia con criterios normativos de la National Fire Protection Association y el American Petroleum Institute. Esta integración permite afirmar que el diseño propuesto responde técnicamente a las condiciones operativas del terminal, validando la relación entre demanda hidráulica, escenarios de riesgo y desempeño del sistema.

5.1.10.1. Validación y comprobación de la hipótesis principal

La hipótesis principal de la presente investigación se formula en coherencia con el problema general identificado y el objetivo principal planteado, estableciendo una relación directa entre la intervención ingenieril propuesta y la mejora en las condiciones de seguridad del sistema evaluado. En este sentido, se plantea que:

"Con el diseño del sistema agua-espuma se reduce el riesgo de incendio en el terminal de almacenamiento de hidrocarburos y productos químicos de la empresa Blending S.A.C., en la región del Callao, Lima–Perú."

La formulación de esta hipótesis se sustenta en el principio de que el diseño de sistemas contra incendios en instalaciones industriales no puede basarse en condiciones promedio, sino en la capacidad de respuesta frente a escenarios de mayor severidad. Desde el enfoque de la ingeniería de seguridad, el riesgo se define como la combinación entre la probabilidad de ocurrencia de un evento y la magnitud de sus consecuencias, siendo este último el factor predominante en sistemas donde se manejan grandes volúmenes de sustancias inflamables (Lees, 2012).

Evidencia cuantitativa del análisis de escenarios

Con el propósito de sustentar la hipótesis planteada, se presentan los resultados obtenidos en la determinación de la demanda hidráulica para los escenarios representativos de incendio, La Tabla 11 sintetiza la demanda hidráulica asociada a los escenarios evaluados, integrando caudal, tiempo de operación y volumen requerido. Esta comparación permite identificar la condición que controla el diseño del sistema en función de la exigencia hidráulica total.

Tabla 12

Demanda hidráulica por escenario de incendio

Parámetro	Escenario 1 (Almacenamiento interior)	Escenario 3 (Tanque TK-12)
Tipo de incendio	Derrame (pool fire)	Incendio en tanque
Caudal requerido	399.47 gpm	749.0 gpm
Tiempo de operación	15 min	240 min
Volumen total	5,812 gal	179,760 gal

Fuente: Elaboración propia

Fundamento técnico

El riesgo de incendio en instalaciones industriales se define como función de la probabilidad de ocurrencia y la magnitud de sus consecuencias, siendo este último el factor predominante en sistemas de almacenamiento de hidrocarburos (Lees, 2012). En este contexto, la severidad del evento está directamente relacionada con la cantidad de energía térmica liberada durante el incendio, la cual puede representarse de manera proporcional mediante la relación:

$$V=Q\cdot t$$

donde el volumen total requerido (V) constituye un indicador indirecto de la energía que el sistema debe disipar (Incropera et al., 2007).

Asimismo, en incendios de tanques, la radiación térmica se establece como el mecanismo predominante de transferencia de calor, generando un flujo continuo de energía hacia los equipos adyacentes, lo cual incrementa el riesgo de propagación por efecto dominó (API, 2014; Drysdale, 2011).

Análisis de resultados

A partir de los valores obtenidos, se observa que el escenario de incendio en el tanque TK-12 impone una demanda significativamente mayor al sistema contra incendios. El caudal requerido es aproximadamente 1.9 veces superior al del escenario interior; sin embargo, la diferencia más relevante se presenta en el tiempo de operación, el cual es 16 veces mayor. Como consecuencia directa de esta relación, el volumen total requerido alcanza un valor superior en más de 30 veces respecto al escenario de almacenamiento interior.

Desde el punto de vista de la ingeniería, esta diferencia evidencia que el comportamiento del sistema está dominado por la duración del evento y por la transferencia continua de calor, más que por la intensidad instantánea del incendio. En el escenario interior, el fuego se controla mediante espuma en un tiempo reducido, debido a la supresión de vapores inflamables. En contraste, el incendio en tanques requiere un enfriamiento prolongado, ya que la combustión se mantiene debido a la gran cantidad de combustible disponible y a la radiación térmica hacia los tanques adyacentes.

El diseño del sistema contra incendios ha sido desarrollado considerando esta condición crítica, garantizando la capacidad de suministrar un caudal de 749.0 gpm durante 240 minutos. Esta condición asegura que el sistema puede disipar la energía térmica incidente y mantener la temperatura de los tanques dentro de límites seguros, evitando su falla estructural. De acuerdo con los lineamientos de la National Fire Protection Association y el American Petroleum Institute, el diseño basado en el escenario de mayor consecuencia constituye el criterio fundamental para la reducción del riesgo en instalaciones industriales (NFPA, 2021; API, 2014).

Adicionalmente, la incorporación de sistemas de espuma para el escenario de almacenamiento interior permite controlar incendios por derrame en tiempos cortos,

complementando la estrategia de protección del sistema frente a diferentes mecanismos de incendio.

Comprobación de la hipótesis

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema diseñado:

. satisface la demanda del escenario más exigente

. controla los mecanismos predominantes del incendio (radiación y combustión superficial)

. reduce la probabilidad de propagación del evento

En términos de ingeniería, esto implica que el sistema incrementa su capacidad de respuesta frente a incendios de alta severidad, actuando directamente sobre la magnitud de las consecuencias.

Conclusión

En base a la evidencia cuantitativa, el análisis técnico y la concordancia con criterios normativos, se concluye que la **hipótesis principal queda validada y comprobada**, al demostrarse que el diseño del sistema agua-espuma permite mejorar la capacidad de control del incendio bajo condiciones críticas, reduciendo de manera efectiva el nivel de riesgo en el terminal de almacenamiento.

5.1.10.2. Validación y comprobación de la hipótesis específica 1

La primera hipótesis específica se formula en correspondencia con el objetivo orientado a evaluar el impacto de los escenarios de incendio dentro del terminal. En este sentido, se plantea que:

“La determinación del grado de impacto de los escenarios de riesgo de incendio permitirá definir el nivel de protección requerido en el terminal de almacenamiento de

hidrocarburos y productos químicos de la empresa Blending S.A.C., en la región del Callao, Lima–Perú.”

La formulación de esta hipótesis se sustenta en el principio de que el diseño de sistemas contra incendios debe responder a la magnitud del evento que se pretende controlar. Desde el enfoque de la ingeniería de seguridad, el impacto de un incendio está asociado a la cantidad de energía liberada, la extensión del área afectada y el potencial de propagación del evento, variables que determinan la severidad del riesgo (Lees, 2012). El análisis comparativo de los escenarios de incendio evidencia diferencias sustanciales en su comportamiento y nivel de afectación, particularmente en términos de propagación, extensión del área comprometida y demanda del sistema contra incendios. La Tabla 12 resume estos aspectos, permitiendo visualizar cómo la severidad del evento condiciona los requerimientos hidráulicos y operativos del sistema.

Evidencia cuantitativa

Tabla 13

Comparación del impacto de escenarios

Parámetro	Escenario 1 (Interior)	Escenario 3 (TK-12)
Tipo de incendio	Pool fire	Incendio en tanque
Propagación	Superficial	Radiación térmica
Área afectada	Localizada	Extendida
Caudal requerido	399.47 gpm	749.0 gpm
Tiempo de operación	15 min	240 min
Volumen requerido	5,812 gal	179,760 gal

Fuente: Elaboración propia

Fundamento técnico

El impacto de un incendio se relaciona con la energía liberada y su capacidad de propagación, lo cual define la severidad del evento (Lees, 2012). En incendios de tanques, la radiación térmica genera transferencia de calor continua, incrementando el riesgo de afectación de equipos adyacentes (API, 2014; Drysdale, 2011).

Análisis

Los resultados evidencian que el escenario 3 presenta una severidad significativamente mayor, no solo por el caudal requerido, sino por el tiempo de operación y el volumen total, lo que implica una mayor energía térmica involucrada. Esta condición obliga a diseñar el sistema con mayor capacidad hidráulica.

Comprobación

Se verifica que el nivel de protección requerido está directamente condicionado por el impacto del escenario, siendo el escenario de tanques el que define el diseño.

Conclusión

La hipótesis queda validada y comprobada, al demostrarse que el análisis del impacto de escenarios determina el nivel de protección del sistema.

5.1.10.3. Validación y comprobación de la hipótesis específica 2

La segunda hipótesis específica se formula en relación con la identificación de las condiciones que favorecen la ocurrencia de incendios en el sistema. En este sentido, se plantea que:

"La identificación y caracterización de las fuentes de ignición y de las condiciones operativas del terminal permitirá estimar la probabilidad de ocurrencia de incendios en el sistema de almacenamiento de hidrocarburos y productos químicos de la empresa Blending S.A.C., en la región del Callao, Lima–Perú."

Esta hipótesis se sustenta en el principio fundamental del triángulo del fuego, según el cual la ocurrencia de un incendio depende de la presencia simultánea de

combustible, comburente y fuente de ignición. Desde el enfoque de la ingeniería de procesos, la probabilidad de ocurrencia de incendios está directamente relacionada con la interacción entre estos elementos en condiciones operativas reales (Crowl & Louvar, 2011).

En este contexto, la caracterización del sistema permite identificar las condiciones bajo las cuales pueden generarse incendios, considerando factores como la manipulación de sustancias inflamables, la presencia de equipos operativos y las posibles fuentes de ignición. Tal como señala Trevor Kletz, los accidentes en instalaciones industriales no ocurren de manera aleatoria, sino como resultado de la combinación de condiciones que favorecen su ocurrencia.

Asimismo, la literatura especializada en seguridad industrial establece que la estimación de la probabilidad de eventos peligrosos requiere la identificación de escenarios plausibles, lo cual se logra mediante el análisis de las condiciones operativas del sistema (Lees, 2012). En este sentido, la hipótesis plantea que el reconocimiento de estas condiciones permite sustentar técnicamente la ocurrencia de incendios.

Desde el punto de vista físico, la presencia de vapores inflamables, combinada con una fuente de ignición, puede generar procesos de combustión rápida, lo cual justifica la necesidad de identificar estas condiciones como parte del análisis del riesgo.

En consecuencia, la hipótesis específica establece que la identificación de las condiciones del sistema permite estimar la probabilidad de ocurrencia de incendios.

Evidencia técnica del sistema evaluado

A partir de la caracterización del terminal y del análisis desarrollado en los capítulos anteriores, se identificaron las condiciones reales de operación y los elementos que intervienen en la ocurrencia de incendios.

Tabla 14

Identificación de condiciones que influyen en la probabilidad de incendio

Variable	Condición identificada en el terminal	Implicancia técnica
Tipo de combustible	Líquidos inflamables y combustibles (Clase 3, 3.3)	Alta facilidad de ignición
Estado del combustible	Presencia de vapores inflamables	Formación de atmósferas explosivas
Condición de almacenamiento	Interior (confinado) y exterior (tanques)	Acumulación de vapores / dispersión
Operación	Carga, descarga y almacenamiento	Posibilidad de derrames
Fuentes de ignición	Equipos, electricidad estática, fricción	Activación del proceso de combustión

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis del sistema

Las condiciones presentes en el terminal configuran un entorno propicio para la ocurrencia de incendios, debido a la combinación de combustibles inflamables, generación de vapores, actividades operativas y posibles fuentes de ignición. La Tabla 13 organiza estas variables junto con su implicancia técnica, permitiendo entender su influencia en la probabilidad de inicio del evento.

Fundamento técnico

Desde el punto de vista de la ingeniería de seguridad contra incendios, la ocurrencia de un incendio depende de la coexistencia de tres elementos fundamentales: combustible, comburente y fuente de ignición. Este principio, conocido como el triángulo del fuego, establece que la probabilidad de ignición aumenta

significativamente cuando estos elementos interactúan bajo condiciones favorables (Crowl & Louvar, 2011).

Asimismo, la literatura especializada indica que la probabilidad de ocurrencia en sistemas industriales no se determina de manera aislada, sino a partir del análisis de las condiciones operativas del sistema. En este sentido, Lees (2012) señala que la identificación de escenarios plausibles, basada en la caracterización del proceso, constituye el primer paso para la estimación del riesgo.

Desde el punto de vista físico, la presencia de líquidos inflamables con alta volatilidad favorece la formación de vapores, los cuales, al mezclarse con el aire dentro de límites de inflamabilidad, pueden encenderse en presencia de una fuente de ignición, generando fenómenos como flash fire o explosión de vapores (Drysdale, 2011).

Análisis de resultados

Los resultados obtenidos evidencian que el terminal presenta simultáneamente los elementos necesarios para la ocurrencia de incendios. La presencia de combustibles inflamables, combinada con operaciones de transferencia y almacenamiento, genera condiciones propicias para la formación de vapores inflamables. Esta condición se ve intensificada en áreas interiores, donde la ventilación limitada favorece la acumulación de mezclas inflamables.

Adicionalmente, la existencia de múltiples fuentes potenciales de ignición, tales como equipos eléctricos, fricción mecánica y descargas electrostáticas, incrementa la probabilidad de activación del proceso de combustión. En este contexto, no se trata de un escenario hipotético, sino de una condición operativa real donde la probabilidad de ocurrencia está directamente asociada a la interacción entre las variables identificadas.

Este análisis permite establecer que la probabilidad de incendio no se asume, sino que se sustenta técnicamente a partir de la caracterización del sistema y de la identificación de sus condiciones operativas.

Comprobación de la hipótesis

A partir de la evidencia presentada, se comprueba que:

. la identificación de las condiciones del sistema permite reconocer la presencia de los elementos del triángulo del fuego

. la interacción entre combustible, vapores y fuentes de ignición sustenta la ocurrencia de incendios

. los escenarios definidos en la investigación corresponden a condiciones reales y plausibles

En términos de ingeniería, esto confirma que la probabilidad de ocurrencia puede ser estimada a partir del análisis del sistema, sin necesidad de recurrir exclusivamente a modelos probabilísticos complejos.

Conclusión

En base al análisis técnico, el fundamento físico y la evidencia obtenida, se concluye que la hipótesis específica 2 queda validada y comprobada, al demostrarse que la identificación y caracterización de las fuentes de ignición y de las condiciones operativas del terminal permiten estimar de manera objetiva la probabilidad de ocurrencia de incendios en el sistema.

5.1.10.4. Validación y comprobación de la hipótesis específica 3

La tercera hipótesis específica se formula en relación con la cuantificación de la demanda del sistema contra incendios. En este sentido, se plantea que:

“La determinación del consumo de agua y de concentrado de espuma para escenarios de incendio permitirá cuantificar la demanda hidráulica máxima del sistema de protección contra incendios en el terminal de almacenamiento de hidrocarburos y productos químicos de la empresa Blending S.A.C., en la región del Callao, Lima–Perú.”

Esta hipótesis se sustenta en el principio de que el dimensionamiento de un sistema contra incendios depende de la cantidad de agente extintor necesario para controlar el incendio bajo condiciones críticas. Desde el punto de vista de la ingeniería hidráulica, esta demanda se expresa en términos de caudal, tiempo de operación y volumen total requerido (Çengel & Cimbala, 2014).

Evidencia cuantitativa de los escenarios analizados

A partir del desarrollo de los cálculos hidráulicos realizados para los escenarios representativos, se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 15

Demanda hidráulica del sistema contra incendios

Parámetro	Escenario 1 (Almacenamiento interior)	Escenario 3 (Tanque TK-12)
Tipo de agente	Espuma (3%)	Agua (enfriamiento)
Caudal total (Q)	399.47 gpm	749.0 gpm
Tiempo de operación (t)	15 min	240 min
Volumen total (V)	5,812 gal	179,760 gal
Concentrado de espuma	11.98 gpm	—

Parámetro	Escenario 1 (Almacenamiento interior)	Escenario 3 (Tanque TK-12)
Volumen de concentrado	179.76 gal	—

Fuente: Elaboración propia

Las exigencias operativas del sistema varían de forma significativa entre los escenarios evaluados, no solo en términos de caudal y tiempo, sino también en el tipo de agente extintor y el consumo asociado. Estas diferencias reflejan la naturaleza del incendio y el objetivo del sistema en cada caso: supresión rápida en incendios por derrame y enfriamiento sostenido en incendios de tanques. La Tabla 14 integra estos parámetros, permitiendo visualizar de manera conjunta la demanda total del sistema y los requerimientos específicos de operación en cada escenario.

Fundamento técnico

El dimensionamiento hidráulico de sistemas contra incendios se basa en la relación fundamental entre caudal, tiempo y volumen:

$$V = Q \cdot t$$

Esta expresión representa el balance entre el flujo de agente extintor suministrado y el tiempo durante el cual debe mantenerse su aplicación, constituyendo un indicador directo de la capacidad del sistema para controlar el incendio (Çengel & Cimbala, 2014; Munson et al., 2013).

Desde el punto de vista físico, el volumen requerido está asociado a la cantidad de energía térmica que el sistema debe disipar durante el incendio. En escenarios de

tanques, donde la combustión es sostenida, la transferencia de calor por radiación genera una demanda prolongada de enfriamiento, lo que incrementa significativamente el volumen requerido (Incropera et al., 2007; API, 2014).

En el caso de incendios por derrame, el uso de espuma permite controlar la combustión mediante la supresión de vapores inflamables, lo que reduce el tiempo de aplicación y, por tanto, la demanda total del sistema (NFPA, 2021).

Análisis de resultados

Los resultados obtenidos evidencian que la demanda hidráulica del sistema no está determinada únicamente por el caudal requerido, sino principalmente por el tiempo de operación. En el escenario de almacenamiento interior, el sistema requiere 399.47 gpm durante 15 minutos, lo que genera un volumen de 5,812 gal. En contraste, el escenario de incendio en tanques requiere un caudal de 749.0 gpm durante 240 minutos, alcanzando un volumen de 179,760 gal.

Esta diferencia implica que el volumen requerido en el escenario de tanques es más de 30 veces superior, lo cual confirma que la variable dominante en el diseño es el tiempo de operación. Desde el punto de vista de la ingeniería, esto se explica porque el incendio en tanques no se extingue de manera inmediata, sino que requiere un enfriamiento continuo para disipar la energía térmica y evitar la propagación del incendio.

Asimismo, la determinación del consumo de concentrado de espuma (11.98 gpm) y su volumen total (179.76 gal) permite definir de manera precisa los requerimientos del sistema de dosificación, lo cual es fundamental para garantizar la efectividad del control en incendios por derrame.

Este análisis demuestra que la cuantificación del consumo de agentes extintores permite establecer de manera objetiva la capacidad hidráulica del sistema y dimensionar sus componentes principales.

Comprobación de la hipótesis

A partir de la evidencia cuantitativa y del análisis técnico, se comprueba que:

. la determinación del caudal y del tiempo permite calcular el volumen total requerido

. el volumen define la capacidad de almacenamiento y suministro del sistema

. el escenario de mayor consumo (tanques) establece la demanda hidráulica máxima

En términos de ingeniería, esto confirma que el cálculo del consumo de agua y espuma constituye el criterio fundamental para el dimensionamiento del sistema contra incendios.

Conclusión

En base a los resultados obtenidos, el fundamento físico y la interpretación técnica, se concluye que la hipótesis específica 3 queda validada y comprobada, al demostrarse que la determinación del consumo de agua y concentrado de espuma permite cuantificar de manera precisa la demanda hidráulica máxima del sistema de protección contra incendios.

5.1.10.5. Validación y comprobación de la hipótesis específica 4

La cuarta hipótesis específica se formula en relación con la selección del sistema de protección contra incendios. En este sentido, se plantea que:

“La selección del sistema de protección contra incendios, basada en los escenarios de riesgo evaluados, permitirá especificar los equipos contra incendio

requeridos en el terminal de almacenamiento de hidrocarburos y productos químicos de la empresa Blending S.A.C., en la región del Callao, Lima–Perú."

Esta hipótesis se sustenta en el principio de que la elección del sistema contra incendios debe responder a las características del incendio que se pretende controlar. Desde el enfoque de la ingeniería de protección contra incendios, el tipo de agente extintor y los equipos requeridos dependen del mecanismo físico predominante del incendio (NFPA, 2021).

Evidencia técnica de los escenarios evaluados

A partir del análisis desarrollado en los escenarios de incendio, se identificaron los mecanismos físicos predominantes y los requerimientos de control asociados a cada uno de ellos. La selección del sistema contra incendios no responde a un criterio uniforme, sino a la interacción entre el tipo de incendio y el fenómeno físico dominante en cada escenario. En función de ello, se definen estrategias de control diferenciadas, orientadas ya sea a la supresión del proceso de combustión o a la disipación de la carga térmica. La Tabla 15 sintetiza esta relación, vinculando el comportamiento del incendio con la solución técnica adoptada.

Tabla 16

Relación entre escenario, fenómeno físico y sistema requerido

Escenario	Tipo de incendio	Mecanismo predominante	Requerimiento de control	Sistema seleccionado
Almacenamiento interior	Derrame (pool fire)	Combustión superficial	Supresión de vapores	Espuma (3%)
Patio de tanques (TK-12)	Incendio en tanque	Radiación térmica	Disipación de calor	Agua (enfriamiento)

Fuente: Elaboración propia

Fundamento técnico

En ingeniería de protección contra incendios, la selección del sistema no es arbitraria, sino que depende directamente del mecanismo físico que gobierna el incendio. De acuerdo con la National Fire Protection Association, los incendios de líquidos inflamables deben ser controlados mediante agentes que supriman la liberación de vapores, como la espuma (NFPA 11), mientras que los incendios en estructuras o tanques expuestos requieren sistemas de enfriamiento por agua para disipar la energía térmica (NFPA 15).

Desde el punto de vista físico, la espuma actúa formando una película que aísla el combustible del oxígeno y reduce la evaporación, interrumpiendo el proceso de combustión (Drysdale, 2011). Por otro lado, el agua aplicada sobre superficies expuestas permite absorber calor mediante convección y evaporación, reduciendo la temperatura del material y evitando su falla estructural (Incropera et al., 2007).

Asimismo, el American Petroleum Institute establece que en incendios de tanques el objetivo principal no es la extinción inmediata, sino el control del incendio mediante enfriamiento continuo para prevenir la propagación (API, 2014).

Análisis de resultados

Los resultados obtenidos en la investigación evidencian que cada escenario de incendio presenta un comportamiento distinto, lo cual impide la utilización de un único sistema de protección para toda la instalación. En el caso del almacenamiento interior, el incendio se desarrolla sobre la superficie del líquido, por lo que el control se logra mediante la aplicación de espuma, la cual reduce la liberación de vapores inflamables y permite una extinción rápida del fuego.

En contraste, el incendio en tanques presenta un comportamiento dominado por la radiación térmica, donde la combustión se mantiene en el tiempo debido a la gran

cantidad de combustible disponible. En este escenario, el problema principal no es la extinción directa, sino la transferencia de calor hacia los tanques adyacentes, lo cual puede generar una propagación del incendio. Por esta razón, el uso de agua como agente de enfriamiento resulta fundamental para disipar la energía térmica y evitar la falla estructural de los equipos.

Esta diferenciación evidencia que la selección del sistema contra incendios está directamente condicionada por el tipo de incendio y por el mecanismo físico predominante, lo cual permite definir de manera técnica los equipos necesarios para el sistema, tales como sistemas de dosificación de espuma, bombas, redes hidráulicas y sistemas de enfriamiento.

Comprobación de la hipótesis

A partir del análisis desarrollado, se comprueba que:

. cada escenario de incendio requiere un mecanismo de control distinto

. el tipo de agente extintor depende del fenómeno físico predominante

. la selección del sistema permite definir los componentes y equipos necesarios

Desde el punto de vista de la ingeniería, esto confirma que la selección del sistema contra incendios es una consecuencia directa del análisis de escenarios y no una decisión arbitraria de diseño.

Conclusión

En base a la evidencia técnica, el fundamento físico y el análisis realizado, se concluye que la hipótesis específica 4 queda validada y comprobada, al demostrarse que la selección del sistema de protección contra incendios, basada en los escenarios de riesgo evaluados, permite especificar de manera precisa los equipos requeridos en el terminal de almacenamiento.

5.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados en la presente investigación se orienta a interpretar los valores obtenidos en el capítulo anterior, estableciendo su significado desde el punto de vista de la ingeniería de protección contra incendios y su coherencia con los principios físicos que gobiernan el fenómeno del fuego. A diferencia de la etapa de cálculo, donde se determinan magnitudes como caudal, tiempo de operación y volumen requerido, el análisis permite comprender cómo estos resultados se relacionan con el comportamiento real del incendio y con la capacidad de respuesta del sistema.

Desde el enfoque metodológico, el análisis de resultados constituye la fase en la que los datos obtenidos son interpretados y contrastados con el marco teórico, permitiendo extraer conclusiones válidas sobre el fenómeno estudiado (Hernández Sampieri et al., 2014; Arias, 2012). En el campo de la ingeniería de seguridad industrial, esta interpretación debe sustentarse en la relación entre las variables físicas del sistema y los mecanismos de propagación del incendio, tales como la transferencia de calor, la combustión y la interacción entre equipos (Lees, 2012; Drysdale, 2011).

En este contexto, el análisis desarrollado se basa en tres ejes fundamentales: la interpretación de la demanda hidráulica del sistema, la identificación del escenario crítico que gobierna el diseño y la evaluación de la capacidad del sistema contra incendios para responder a condiciones de alta severidad. Asimismo, los resultados son analizados en concordancia con criterios normativos establecidos por la National Fire Protection Association y el American Petroleum Institute, asegurando que las conclusiones obtenidas respondan a prácticas reconocidas en el diseño de sistemas contra incendios (NFPA, 2021; API, 2014).

En consecuencia, el análisis de resultados no solo permite interpretar los valores obtenidos, sino que constituye el vínculo entre el desarrollo técnico de la investigación y la validación de las hipótesis planteadas, proporcionando una base sólida para la formulación de conclusiones y recomendaciones.

5.2.1.1. Análisis de la caracterización del sistema

La caracterización del terminal permitió establecer que la configuración espacial de las instalaciones no responde a un arreglo aislado de equipos, sino a un sistema interconectado donde la proximidad entre unidades condiciona directamente el comportamiento del incendio. La disposición de tanques y áreas operativas favorece la transferencia de calor por radiación, lo cual incrementa la probabilidad de afectación entre unidades en caso de incendio.

Este resultado confirma que el análisis del sistema no puede abordarse de manera descriptiva, sino como un elemento determinante en la evaluación del riesgo, en concordancia con los principios de interacción térmica en instalaciones industriales (Lees, 2012; API, 2014).

5.2.1.2. Análisis de las sustancias almacenadas

El análisis de las sustancias evidenció que el terminal maneja productos con alta volatilidad y capacidad de generación de vapores inflamables, lo cual condiciona el tipo de incendio esperado. En almacenamiento interior predominan incendios por derrame con rápida propagación superficial, mientras que en tanques el comportamiento está dominado por la masa de combustible y la liberación sostenida de energía.

Este resultado confirma que la naturaleza físico-química del producto define el mecanismo de incendio y, por tanto, el tipo de respuesta requerida, tal como lo establece la literatura en dinámica del fuego (Drysdale, 2011).

5.2.1.3. Análisis de los escenarios de incendio

La definición de escenarios permitió identificar que el comportamiento del incendio no es uniforme en toda la instalación, sino dependiente de la forma de almacenamiento y de la interacción entre equipos. Se evidenció una diferencia clara entre incendios por derrame y incendios en tanques, tanto en su desarrollo como en su potencial de propagación.

Este análisis confirma que el diseño del sistema contra incendios debe basarse en escenarios representativos y no en condiciones generales, en concordancia con metodologías de análisis de riesgo industrial (Lees, 2012).

5.2.1.4. Análisis de la evaluación del riesgo

La evaluación del riesgo permitió establecer que, en el terminal, la severidad del evento tiene mayor peso que la probabilidad de ocurrencia. Aunque algunos escenarios presentan mayor frecuencia potencial, el escenario de incendio en tanques concentra el mayor nivel de consecuencia debido a la posibilidad de propagación por radiación térmica.

Este resultado es consistente con los criterios de diseño en instalaciones de hidrocarburos, donde el enfoque se orienta a controlar eventos de alta severidad (API, 2014; NFPA, 2021).

5.2.1.5. Análisis de la demanda de espuma (escenario interior)

El análisis del escenario de almacenamiento interior evidenció que la demanda del sistema es moderada, con un caudal de 399.47 gpm y un tiempo de operación de 15 minutos. Esta condición se explica por la naturaleza del incendio, donde la espuma actúa suprimiendo vapores inflamables y permitiendo una extinción rápida.

Este resultado confirma que los incendios por derrame presentan una alta velocidad de desarrollo, pero una menor duración, lo cual reduce la demanda total del sistema en términos de volumen.

5.2.1.6. Análisis del escenario de tanques (TK-12)

El análisis del escenario de incendio en tanques evidenció que la demanda del sistema está dominada por la necesidad de enfriamiento continuo, con un caudal de 749.0 gpm durante 240 minutos. Esta condición responde a la transferencia sostenida de calor por radiación hacia los tanques adyacentes.

El resultado confirma que en este tipo de incendios la variable crítica no es el caudal instantáneo, sino el tiempo de operación, lo cual incrementa significativamente el volumen total requerido y define el diseño del sistema.

5.2.1.7. Análisis integrado de escenarios

La integración de los escenarios permitió establecer que la diferencia entre ellos no radica únicamente en el tipo de incendio, sino en la magnitud de la energía térmica involucrada. El escenario de tanques presenta una demanda hidráulica significativamente mayor debido a su duración y capacidad de propagación.

Este análisis confirma que el comportamiento del sistema contra incendios está gobernado por el escenario de mayor transferencia de energía, lo cual constituye un criterio fundamental de diseño.

5.2.1.8. Análisis del escenario crítico de diseño

El análisis permitió identificar que el escenario de incendio en el tanque TK-12 representa la condición más exigente del sistema. La combinación de alto caudal, tiempo prolongado y gran volumen requerido lo posiciona como el caso que gobierna el dimensionamiento del sistema.

Este resultado valida el principio de diseño basado en el peor escenario, ampliamente utilizado en ingeniería de seguridad industrial (NFPA, 2021).

5.2.1.9. Análisis del dimensionamiento del sistema

El dimensionamiento del sistema contra incendios evidenció que la capacidad requerida está determinada por la relación entre caudal y tiempo de operación. La diferencia entre escenarios demuestra que el volumen total es la variable que define la infraestructura necesaria, incluyendo almacenamiento, bombeo y distribución.

Este resultado confirma que el diseño hidráulico no depende únicamente del caudal, sino de la capacidad del sistema para sostener la operación en el tiempo.

El Anexo 6 incluye el listado de equipos del sistema contra incendios, tales como hidrantes, mangueras, válvulas, monitores y tuberías, junto con sus especificaciones técnicas y configuración del sistema.

5.2.1.10. Análisis de la validación de hipótesis

La validación y comprobación de las hipótesis permitió demostrar que el comportamiento del sistema contra incendios está directamente relacionado con el análisis de escenarios, la cuantificación de la demanda hidráulica y la selección adecuada de agentes extintores.

Los resultados obtenidos confirman que el diseño del sistema mejora la capacidad de control del incendio, reduce la severidad del evento y responde a los principios de ingeniería de seguridad, lo cual valida el enfoque metodológico adoptado en la investigación.

VI. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten entender que el comportamiento del sistema contra incendios en el terminal no puede interpretarse de manera uniforme, ya que responde a condiciones operativas distintas según el tipo de almacenamiento y la naturaleza del incendio. Esta diferencia se hace evidente al comparar los escenarios analizados, donde no solo cambian los valores hidráulicos, sino también el mecanismo físico que gobierna el desarrollo del fuego.

En el caso del almacenamiento interior, los valores calculados muestran una demanda relativamente contenida. El caudal de 399.47 gpm aplicado durante 15 minutos genera un volumen total de 5,812 gal, lo cual indica que el incendio puede ser controlado en un periodo corto. Esto se relaciona directamente con el tipo de evento, ya que se trata de un incendio por derrame, donde la combustión ocurre sobre la superficie del líquido. Bajo estas condiciones, la aplicación de espuma actúa de forma efectiva al limitar la liberación de vapores inflamables, lo que reduce la duración del evento.

Sin embargo, al analizar el escenario de incendio en el tanque TK-12, la situación cambia de manera considerable. Los resultados muestran una demanda de 749.0 gpm durante 240 minutos, alcanzando un volumen de 179,760 gal. Esta diferencia no responde únicamente a un mayor tamaño del incendio, sino a un comportamiento completamente distinto. En este caso, el fuego se mantiene en el tiempo debido a la cantidad de combustible disponible y, principalmente, a la transferencia de calor hacia los tanques cercanos.

Esta condición permite identificar un aspecto clave: el problema deja de ser la extinción inmediata y pasa a ser el control del calor. La necesidad de mantener el enfriamiento durante varias horas explica por qué el volumen requerido es

significativamente mayor, incluso cuando el incremento en el caudal no es proporcional. En otras palabras, el sistema no se dimensiona por la intensidad del incendio, sino por su duración.

Al comparar ambos escenarios, se observa que el volumen requerido en el caso de tanques es más de 30 veces superior al del almacenamiento interior. Esta relación pone en evidencia que la variable que define el diseño no es el caudal por sí solo, sino el tiempo durante el cual el sistema debe operar. Este resultado resulta coherente con el hecho de que los incendios de gran volumen implican una liberación sostenida de energía, lo que obliga a mantener condiciones de enfriamiento estables para evitar la propagación.

Por otro lado, el análisis de las condiciones del terminal confirma que los escenarios considerados no son hipotéticos. La presencia de líquidos inflamables, junto con operaciones de carga y descarga, genera situaciones donde es posible la formación de vapores. Si a esto se suman posibles fuentes de ignición, se configura un entorno donde la ocurrencia de incendios resulta técnicamente viable. Esto refuerza la validez de los escenarios evaluados y justifica su uso como base para el diseño.

En cuanto al dimensionamiento del sistema, los resultados muestran que la infraestructura necesaria está directamente ligada al volumen total requerido. Esto implica que aspectos como la capacidad de almacenamiento de agua, el sistema de bombeo y la red de distribución deben responder a condiciones de operación prolongadas, especialmente en el escenario de tanques. Bajo este enfoque, el sistema no se diseña para responder rápidamente, sino para sostener su operación en el tiempo.

Otro aspecto relevante es la selección del agente de control. Los resultados evidencian que no todos los incendios pueden ser tratados de la misma manera. En el almacenamiento interior, la espuma resulta adecuada debido a su efecto sobre los

vapores inflamables. En cambio, en el caso de los tanques, el uso de agua es necesario para disipar el calor y evitar la afectación de las estructuras cercanas. Esta diferencia no es arbitraria, sino que responde al mecanismo predominante en cada escenario.

Finalmente, la validación de las hipótesis confirma que el enfoque adoptado en la investigación es consistente con los resultados obtenidos. El sistema ha sido dimensionado considerando el escenario más exigente, lo cual garantiza su capacidad de respuesta ante condiciones críticas. Este resultado no surge de una suposición, sino de la comparación directa entre los valores obtenidos en cada escenario.

En conjunto, la discusión permite afirmar que el diseño del sistema contra incendios debe basarse en la comprensión del fenómeno físico del incendio y no únicamente en criterios generales. Los resultados muestran que el escenario de incendio en tanques es el que define las condiciones de diseño, debido a su mayor demanda en términos de tiempo y volumen, lo que lo convierte en el caso que gobierna el comportamiento del sistema.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

1. El comportamiento del sistema contra incendios está gobernado por el escenario de incendio en tanques (TK-12), el cual presenta la mayor demanda hidráulica del sistema, con un caudal de 749.0 gpm durante 240 minutos y un volumen total requerido de 179,760 gal. Este valor supera en más de 30 veces el volumen requerido en el escenario de almacenamiento interior, lo que confirma que el

diseño debe basarse en la condición de mayor severidad y no en la de mayor frecuencia.

2. La variable crítica en el dimensionamiento del sistema no es el caudal instantáneo, sino el tiempo de operación, ya que este determina el volumen total requerido. Mientras que el caudal del escenario de tanques es aproximadamente 1.9 veces mayor que el del escenario interior, el tiempo de operación es 16 veces superior, lo que explica el incremento exponencial en la demanda total del sistema.

3. El escenario de incendio por derrame en almacenamiento interior presenta una demanda hidráulica moderada y controlable, con un requerimiento de 399.47 gpm durante 15 minutos, equivalente a 5,812 gal. Este comportamiento confirma que los incendios tipo *pool fire* pueden ser controlados eficientemente mediante la aplicación de espuma, debido a la supresión de vapores inflamables y la rápida interrupción del proceso de combustión.

4. El incendio en tanques está dominado por la transferencia de calor por radiación, lo que genera una carga térmica sostenida en el tiempo. Esta condición obliga a implementar un sistema de enfriamiento continuo, donde el objetivo principal no es la extinción inmediata, sino la disipación de energía térmica para evitar la falla estructural de los tanques y la propagación del incendio.

5. La relación hidráulica V=Q·tV = Q \cdot tV=Q·t define el dimensionamiento real del sistema, evidenciando que el volumen requerido es el parámetro que condiciona la capacidad de almacenamiento de agua, el sistema de bombeo y la red de distribución. Este resultado confirma que el diseño no puede basarse

únicamente en caudales nominales, sino en la capacidad de sostener la operación durante el tiempo requerido.

6. La selección de los agentes de control está directamente determinada por el mecanismo físico del incendio, estableciéndose que:

    . La espuma es adecuada para incendios por derrame, donde predomina la combustión superficial.

    . El agua es indispensable para incendios en tanques, donde predomina la transferencia de calor.

   Esta diferenciación valida que el sistema debe ser mixto (agua–espuma) y no basado en un solo agente.

7. Las condiciones operativas del terminal confirman la viabilidad de los escenarios de incendio analizados, debido a la presencia simultánea de combustibles inflamables, generación de vapores y fuentes potenciales de ignición. Esto demuestra que los escenarios considerados no son teóricos, sino representativos de condiciones reales de operación.

8. El análisis integrado de escenarios permitió establecer que la demanda del sistema está controlada por la energía térmica del incendio y no únicamente por su tamaño, lo cual explica por qué los incendios en tanques generan mayores requerimientos hidráulicos que los incendios por derrame.

9. El diseño del sistema contra incendios mejora de manera efectiva la capacidad de respuesta ante eventos críticos, al estar dimensionado para cubrir la demanda del escenario más exigente. Esto reduce la probabilidad de propagación del

incendio y limita sus consecuencias, cumpliendo con los principios de diseño en seguridad industrial.

10. La validación y comprobación de las hipótesis confirma la coherencia entre el análisis de escenarios, la cuantificación hidráulica y la selección del sistema, demostrando que el enfoque adoptado en la investigación es técnicamente consistente y aplicable a instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos.

7.2. RECOMENDACIONES

1. Dimensionar el sistema hidráulico considerando el escenario crítico como condición de diseño permanente. Se recomienda que el sistema contra incendios sea diseñado y verificado hidráulicamente para sostener un caudal mínimo de 749.0 gpm durante 240 minutos, correspondiente al escenario de incendio en tanques. Esto implica que tanto la capacidad de almacenamiento de agua como el sistema de bombeo deben garantizar operación continua bajo esta condición, evitando diseños basados en promedios o escenarios de menor demanda.

2. Verificar la capacidad real del sistema de bombeo mediante análisis hidráulico detallado. Es necesario realizar un cálculo hidráulico completo de la red (pérdidas por fricción, pérdidas locales, presión residual en puntos críticos), asegurando que el sistema pueda entregar el caudal requerido en las condiciones más desfavorables. Se recomienda validar la curva de operación de las bombas frente al punto de trabajo real del sistema, evitando sobredimensionamiento o fallas por déficit de presión.

3. Implementar un sistema de almacenamiento de agua acorde al volumen requerido del escenario crítico. Se recomienda que la capacidad de almacenamiento no sea inferior a 179,760 gal, considerando además un margen de seguridad operativo. Este volumen debe estar disponible de forma inmediata y sin dependencia de reposición externa, garantizando autonomía durante todo el tiempo de operación del sistema.

4. Diseñar sistemas independientes para agua y espuma, evitando interferencias operativas. Dado que los mecanismos de incendio son distintos, se recomienda mantener sistemas diferenciados:

- Sistema de espuma para almacenamiento interior (dosificación al 3%)
- Sistema de agua para enfriamiento de tanques

Esto permite optimizar la respuesta del sistema y evitar fallas por incompatibilidad de operación o pérdidas de eficiencia en la aplicación del agente.

5. Optimizar la distribución de la red contra incendios considerando la cobertura de enfriamiento de tanques adyacentes. Se recomienda ubicar los puntos de aplicación (monitores, rociadores o sistemas fijos) de manera que aseguren cobertura efectiva sobre el tanque involucrado y al menos el 1/3 de la superficie lateral de los tanques adyacentes, conforme a criterios de exposición térmica. Esto garantiza una disipación adecuada del calor y reduce el riesgo de propagación.
6. Controlar las condiciones de ventilación en almacenamiento interior para reducir acumulación de vapores. Se recomienda implementar sistemas de ventilación natural o forzada que limiten la formación de atmósferas inflamables

en áreas confinadas. Esta medida reduce la probabilidad de ignición y mejora las condiciones de seguridad operativa.

7. Implementar sistemas de detección temprana y activación rápida del sistema contra incendios. Dado que el tiempo de respuesta es crítico en incendios por derrame, se recomienda integrar sistemas de detección (temperatura, flama o vapores) que permitan activar el sistema de espuma en etapas incipientes del incendio, aumentando la efectividad del control.

8. Establecer procedimientos operativos y de mantenimiento basados en la demanda real del sistema. El sistema debe ser probado periódicamente bajo condiciones cercanas a su punto de diseño, verificando:

- caudal real entregado
- presión en puntos críticos
- tiempo de respuesta

Esto evita degradación del sistema y asegura su operatividad en condiciones reales

9. Realizar simulaciones térmicas complementarias para validar escenarios de radiación. Se recomienda, en etapas futuras, incorporar herramientas de simulación (CFD o modelos térmicos) que permitan validar la distribución de radiación térmica entre tanques, optimizando aún más la ubicación de sistemas de enfriamiento.

10. Adoptar un enfoque de diseño basado en consecuencias y no en probabilidades Se recomienda mantener el criterio aplicado en esta investigación, donde el

sistema se diseña en función del escenario más severo y no del más frecuente. Este enfoque garantiza mayor robustez del sistema y reduce significativamente el riesgo de fallas catastróficas.

BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS

8.1. REFERENCIAS

American Petroleum Institute (API). (2014). API Standard 521: Pressure-relieving and depressuring systems. API. https://scholar.google.com/scholar?q=API+521

American Petroleum Institute. (2020). Recommended practice for fire protection in the petroleum industry. API.

American Petroleum Institute. (s.f.). API Publication 2030: Application of fixed water spray systems for fire protection in the petroleum industry. API.

API (2020). *Recommended Practice for Fire Protection in Petroleum Facilities*. American Petroleum Institute. https://www.api.org/

Arias, F. (2012). *El proyecto de investigación*. Episteme. https://scholar.google.com/

Aven, T. (2015). Risk analysis. Wiley. https://scholar.google.com

Babbie, E. (2016). The practice of social research (14th ed.). Cengage Learning.

https://scholar.google.com/scholar?q=Babbie+2016

Babrauskas, V. (2018). *Flame spread in fire safety engineering*. SFPE. https://www.sfpe.org/

Beard, A., & Carvel, R. (2012). *The handbook of tunnel fire safety*. ICE Publishing. https://www.icevirtuallibrary.com/

Bernal, C. A. (2010). *Metodología de la investigación*. Pearson. https://www.pearson.com/

Blank, L., & Tarquin, A. (2012). *Engineering economy*. McGraw-Hill. https://www.mheducation.com/

Blaxter, L., Hughes, C., & Tight, M. (2010). How to research (4th ed.). McGraw-Hill.

https://scholar.google.com/scholar?q=Blaxter+2010

Bunge, M. (2004). *La investigación científica*. Siglo XXI. https://www.worldcat.org/

Carmines, E. G., & Zeller, R. A. (1979). Reliability and validity assessment. SAGE Publications.

https://scholar.google.com/scholar?q=Carmines+Zeller+1979

Carrasco, P. (2023). *Diseño y optimización de sistema contra incendio*. Universidad de Piura. https://pirhua.udep.edu.pe/

CCPS. (2010). Guidelines for risk based process safety. Wiley. https://scholar.google.com

Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2014). Fluid mechanics: Fundamentals and applications (3rd ed.). McGraw-Hill. https://scholar.google.com

Chitty, R. (2016). Foam firefighting systems. Fire Protection Association. https://scholar.google.com

Cochran, W. G. (1977). Sampling techniques (3rd ed.). Wiley.

https://scholar.google.com/scholar?q=Cochran+1977+sampling+techniques

Creswell, J. (2014). *Research design*. Sage. https://us.sagepub.com/

Creswell, JW y Creswell, JD (2018) Diseño de investigación: enfoques cualitativos, cuantitativos y de métodos mixtos. Sage, Los Ángeles. https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrgzSjg5u9pIAIAAy97egx.;_ylu=Y29sbwNncTEEcG9zAzQEdnRpZAMEc2VjA3Ny/RV=2/RE=1778539488/RO=10/RU=https%3a%2f%2fwww.scirp.org%2freference%2freferencespapers%3freferenceid%3d2697821/RK=2/RS=cxNchv.Q7rJ42UKtjjcm65eEfA0-

Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2019). *Chemical process safety*. Pearson. https://www.pearson.com/

Drysdale, D. (2011). *An introduction to fire dynamics*. Wiley. https://www.wiley.com/

D'ugard, & Díaz (2023). *Diseño de sistema contra incendio*. Universidad Nacional del Callao. http://repositorio.unac.edu.pe/

Falagas, M. E., Pitsouni, E. I., Malietzis, G. A., & Pappas, G. (2008). Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: Strengths and weaknesses. FASEB Journal.

Fay, J. A. (2018). Oil spill science and technology. Gulf. https://scholar.google.com

Flick, U. (2015). *Introducción a la investigación cualitativa*. Morata. https://www.morata.es/

Fox, R. W., McDonald, A. T., & Pritchard, P. J. (2015). Fluid mechanics. Wiley. https://scholar.google.com

García, E. (2022). *Cálculo hidráulico sistema contra incendio*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. https://cybertesis.unmsm.edu.pe/

Grant, G., Brenton, J., & Drysdale, D. (2000). Fire suppression. https://scholar.google.com

Hernández Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill. https://www.mheducation.com/

Hernández-Sampieri, R. & Mendoza, C (2018). Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta, Ciudad de México, México: Editorial Mc Graw Hill Education, Año de edición: 2018, ISBN: 978-1-4562-6096-5, 714 p.

Heskestad, G. (2002). Fire plumes, flame height, and air entrainment. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. https://scholar.google.com

Hurley, M. J., et al. (2016). *SFPE handbook of fire protection engineering*. Springer. https://link.springer.com/

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). Fundamentals of heat and mass transfer (6th ed.). Wiley.sure fire dynamics. CRC Press. https://scholar.google.com

Karlsson, B., & Quintiere, J. (2000). Enclosure fire dynamics. CRC Press. https://scholar.google.com

Kerlinger, F., & Lee, H. (2002). *Investigación del comportamiento*. McGraw-Hill. https://www.mheducation.com/

Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews. Keele University. https://scholar.google.com/scholar?q=Kitchenham+2004+systematic+review

Kletz, T. (2001). *Learning from accidents*. Butterworth-Heinemann. https://www.elsevier.com/

Lees, F. P. (2012). *Loss prevention in process industries*. Elsevier. https://www.elsevier.com/

Levin, R. I., & Rubin, D. S. (2004). Statistics for management (7th ed.). Pearson. https://scholar.google.com/scholar?q=Levin+Rubin+2004

Mannan, S. (2012). *Lees' loss prevention in the process industries*. Elsevier. https://www.elsevier.com/

Martín-Martín, A., Orduna-Malea, E., Thelwall, M., & Delgado López-Cózar, E. (2018). Google Scholar, Web of Science, and Scopus: A systematic comparison of citations. Scientometrics.https://scholar.google.com/scholar?q=Martin+Martin+2018+google+scholar

Meacham, B. (2016). *Performance-based building design*. Wiley. https://www.wiley.com/

Ministerio de Energía y Minas (2007). *Reglamento de seguridad para hidrocarburos*. https://www.gob.pe/minem

Morgan D. (2013). published Integrating Qualitative and Quantitative Methods: A Pragmatic Approach | Find, read and cite all the research you need on https://r.search.yahoo.com/_ylt=Awr9.2X95e9pSAIApGV7egx.;_ylu=Y29sbwNncTEEcG9zAzEEdnRpZAMEc2VjA3Ny/RV=2/RE=1778539262/RO=10/RU=https%3a%2f%2fwww.researchgate.net%2fpublication%2f273133414_Integrating_Qualitative_a

nd_Quantitative_Methods_A_Pragmatic_Approach/RK=2/RS=49t68liGLbI0eZZuklFnVgjfL_A-

Mott, R. (2006). Applied fluid mechanics. Pearson. https://scholar.google.com

Mudan, K. S. (2015). Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires. Progress in Energy and Combustion Science.

National Fire Protection Association (NFPA). (2021a). NFPA 11: Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam. NFPA.

https://scholar.google.com/scholar?q=NFPA+11

National Fire Protection Association (NFPA). (2021b). NFPA 30: Flammable and Combustible Liquids Code. NFPA.

https://scholar.google.com/scholar?q=NFPA+30

Neuman, W. L. (2014). Social research methods: Qualitative and quantitative approaches (7th ed.).Pearson.https://scholar.google.com/scholar?q=Neuman+2014+social+research+methods

NFPA. (2022). Fire Protection Handbook. https://scholar.google.com

Ñaupas, H., Mejía, E., Novoa, E., & Villagómez, A. (2014). *Metodología de la investigación*. Ediciones de la U. https://edicionesdelau.com/

Okoli, C. (2015). A guide to conducting a standalone systematic literature review. Communications of the Association for Information Systems.

https://scholar.google.com/scholar?q=Okoli+2015+systematic+review

Park, C. (2011). *Contemporary engineering economics*. Pearson. https://www.pearson.com/

Peters, M., Timmerhaus, K., & West, R. (2003). *Plant design and economics for chemical engineers*. McGraw-Hill. https://www.mheducation.com/

Popper, K. (2002). *La lógica de la investigación científica*. Tecnos. https://www.tecnos.es/

Quintiere, J. (2017). *Fundamentals of fire phenomena*. Wiley. https://www.wiley.com/

SFPE (2019). *Performance-based fire protection*. https://www.sfpe.org/

Society of Fire Protection Engineers. (2016). SFPE handbook of fire protection engineering (5th ed.). Springer.

Speight, J. (2014). The chemistry and technology of petroleum. CRC Press. https://scholar.google.com

Sullivan, W., et al. (2015). *Engineering economy*. Pearson. https://www.pearson.com/

Swiss Re (2020). *Global insurance loss reports*. https://www.swissre.com/

Tamayo y Tamayo, M. (2004). *El proceso de la investigación científica*. Limusa. https://www.limusa.com/

Torero, J. (2013). *Fire safety challenges in developing countries*. SFPE. https://www.sfpe.org/

Towler, G., & Sinnott, R. (2013). *Chemical engineering design*. Elsevier. https://www.elsevier.com/

World Health Organization (2018). *Burns fact sheet*. https://www.who.int/

World Health Organization (2023). *Global health estimates*. https://www.who.int/data

8.2. ANEXOS

Tabla 17

8.2.1. Anexo 1. Matriz de consistencia

TITULO
"Diseño del Sistema Contra Incendio de Agua y Espuma en Terminal de Almacenamiento de hidrocarburos y Químicos en la región Callao, Lima-Perú.

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
PRINCIPAL	PRINCIPAL	PRINCIPAL		
¿Cómo diseñar un sistema agua espuma para reducir el riesgo de incendio en el terminal de almacenamiento de Hidrocarburos y Químicos en la región del Callao, Lima-Perú?	diseñar un sistema agua espuma para reducir el riesgo de incendio en el terminal de almacenamiento de Hidrocarburos y Químicos en la región del Callao, Lima-Perú.	Con el diseño del sistema agua espuma se reduce el riesgo de incendio en el terminal de almacenamiento de Hidrocarburos y Químicos en la región del Callao, Lima-Perú.	**PRINCIPAL** Riesgo de incendio **SECUNDARIA** Sistema contra incendio agua espuma	**NIVEL** APLICADA **ENFOQUE** CUANTITATIVO **DISEÑO** NO EXPERIMENTAL

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS
ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS	ESPECÍFICAS
¿Cómo determinar el impacto de diferentes escenarios de riesgo de incendio para establecer el nivel de protección en el terminal de almacenamiento de Hidrocarburos y Químicos en la región del Callao, Lima-Perú?	Determinar el grado de impacto de los diferentes escenarios de riesgo de incendio, para establecer el nivel de protección en el terminal de almacenamiento de Hidrocarburos y Químicos en la región del Callao, Lima-Perú.	Si se determina el grado de impacto de los diferentes escenarios de riesgo de incendio, se podrá establecer el nivel de protección en terminal de almacenamiento de Hidrocarburos y Químicos en la región del Callao, Lima-Perú.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS
ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS	ESPECÍFICAS
¿Cómo Determinar los parámetros de diseño que permita el dimensionamiento del sistema contra incendio que reduzca el riesgo en terminal de almacenamiento de Hidrocarburos y Químicos en la región del Callao, Lima-Perú?	Determinar los parámetros de diseño que permita el dimensionamiento del sistema contra incendio que reduzca el riesgo en terminal de almacenamiento de Hidrocarburos y Químicos en la región del Callao, Lima-Perú.	Los parámetros de diseño permiten el dimensionamiento del sistema contra incendio que reduzca el riesgo en terminal de almacenamiento de Hidrocarburos y Químicos en la región del Callao, Lima-Perú.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS
ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS	ESPECÍFICAS
¿Cómo determinar el consumo de agua y concentrado de espuma para identificar la mayor demanda en terminal de almacenamiento de Hidrocarburos y Químicos en la región del Callao, Lima-Perú?	Determinar el consumo de agua y concentrado De espuma consumo para identificar la mayor demanda en terminal de almacenamiento de Hidrocarburos y Químicos en la región del Callao, Lima-Perú.	Si se determina el consumo de agua y concentrado de espuma se podrá identificar la mayor demanda en terminal de almacenamiento de Hidrocarburos y Químicos en la región del Callao, Lima-Perú.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS
ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS	ESPECÍFICAS
¿Cómo seleccionar el sistema adecuado que permita la elección de equipos contra incendio en terminal de almacenamiento de Hidrocarburos y Químicos en la región del Callao, Lima-Perú?	Seleccionar el sistema adecuado que permita la elección correcta de equipo contra incendio en terminal de almacenamiento de Hidrocarburos y Químicos en la región del Callao, Lima-Perú.	La selección del tipo de sistema permite la elección de equipos contra incendio en terminal de almacenamiento de Hidrocarburos y Químicos en la región del Callao, Lima-Perú.

8.2.2. ANEXO 2. Base legal y estándares aplicados

La legislación peruana por su influencia y por base técnica desde la creación de las regulaciones de seguridad en 1962 ha tomado como fuente y ha asumido los códigos y regulaciones internacionales de:

1. National Fire Protection Association - NFPA

NFPA 10: Extintores portátiles para Incendio

NFPA 11: Espumas de baja, media y alta expansión

NFPA 14: Estándar para la instalación de conexiones, hidrantes y sistemas de mangueras

NFPA 15: Sistemas fijos de agua pulverizada para protección contra Incendios

NFPA 20: Instalación de bombas estacionarias contra incendios.

NFPA 22: Estándar para tanques de agua en instalaciones privadas.

NFPA 24: Estándar para instalación de tuberías para el servicio privado contra incendios y sus accesorios.

NFPA 25: Inspección, prueba y mantenimiento de sistemas de agua de protección contra incendios.

NFPA 30 :Código de líquidos inflamables y combustibles

NFPA 170 : Estándar de símbolos de seguridad.

NFPA 230 : Estándar para la protección contra incendios de almacenamientos

NFPA 430 : Código para el almacenamiento de oxidantes líquidos y sólidos

2. API PUBLICATION 2030: Application of Fixe Water Spray System for Fire Protection in the Petroleum Industry.

3. Ley Nº 26221 Orgánica de Hidrocarburos y Reglamentos

TITULO CUARTO, CAPITULO VII, Protección Contra Incendio

Art. 84.- En la extinción de incendios en instalaciones para almacenamiento de hidrocarburos deben ser considerados, además de agua de extinción y enfriamiento,

los agentes extintores como espumas mecánicas y polvos químicos secos y otros como el dióxido de carbono y líquidos vaporizantes que no afecten el ozono; siempre y cuando se encuentren normados de acuerdo al NFPA y sean necesariamente listados y aprobados en su eficacia y calidad por UL, FM o USCG.

3.A. Decreto Supremo D.S N º 043 – 2007 – EM, Aprueban el Reglamento de Seguridad para Actividades de Hidrocarburos y modifican diversas disposiciones.

3.B. Decreto Supremo D.S 015-2006 Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos.

4. Code of Practices CEFIC, European Chemical Industrie Council.

8.2.3. Anexo 3: Productos almacenados

- ✓ ***Nitrato de Zinc***
- ✓ ***ULTRAZOL™ 8219C***
- ✓ ***NP-2000-LEAD NITRATE***
- ✓ ***AERO®400 Promoter***
- ✓ ***AEROPHINE® 6931 Promoter***
- ✓ ***UNISOL® LIQUID GREEN 3BP***
- ✓ ***SUPERFLOC® N-300 Flocculant***

✓ ***Nitrato de Zinc.***

El ***Nitrato de Zinc*** está clasificado como un líquido combustible Clase IIIB, nivel 1 en rango de inflamabilidad conforme a NFPA 704.

✓ ***ULTRAZOL™ 8219C***

El ***ULTRAZOL™ 8219C*** es un aditivo de gasolina, clasificado como líquido inflamable Clase IC, nivel 3 en rango de inflamabilidad conforme a NFPA 704, representa un peligro considerable ya que puede causar un incendio repentino.
Al ser calentado puede despedir emanaciones tóxicas, gases o vapores por combustión. Los vapores pueden ser más pesados que el aire y pueden propagarse por el suelo hacia una fuente de ignición distante provocando un retorno de llama.

El material no posee propiedades explosivas en su estado líquido, pero sus vapores pueden formar mezclas explosivas.

✓ ***NP-2000-LEAD NITRATE***

✓ ***AERO®400 Promoter***

El ***AERO®400 Promoter*** está clasificado como líquido combustible Clase IIIB, nivel 1 en rango de inflamabilidad conforme a NFPA 704, no representa un peligro.

✓ ***AEROPHINE® 6931 Promoter***

AEROPHINE® 6931 Promoter, está clasificado como líquido combustible Clase IIIB, nivel 1 en rango de inflamabilidad conforme a NFPA 704, en mezcla con ácidos o soluciones acuosas de ácidos produce generación de gas de sulfuro de hidrogeno.

✓ ***UNISOL® LIQUID GREEN 3BP***

El ***UNISOL® LIQUID GREEN 3BP*** está clasificado como líquido combustible Clase IC, nivel 3 en rango de inflamabilidad conforme a NFPA 704, representa un riesgo de importante ya que los vapores pueden causar atmosferas explosivas.
El producto expuesto a temperaturas elevadas, puede desprender productos de descomposición peligrosos, como monóxido y dióxido de carbono, humos y óxido de nitrógeno.

- ✓ ***SUPERFLOC® N-300 Flocculant***

Es de aspecto sólido, clase IIIB, el polvo puede ser explosivo si se mezcla con el aire en proporciones críticas y en la presencia de una fuente de ignición.

En el Almacén # 1, se almacenan materiales peligrosos sólidos y líquidos combustibles e inflamables de:

- Clase 3,
- Clase 3.3,
- Clase 5.1
- Clase 8,

Productos que por su naturaleza química deben segregarse.

PRODUCTOS UBICADOS EN ALMACEN # 1



Foto 5. AEROFLAT 242 PROMOTER



Foto 6. AERO 4037 PROMOTER



Foto 7. AERODRI® 104 DEWATERING AID



Foto 8. Cellfroth 80-A



Foto 9. LEAD NITRATE

8.2.4. Anexo 4: Sistema de primera respuesta

Prácticamente todos los incendios son pequeños al originarse y podrían extinguirse sin dificultad si se aplicase rápidamente el tipo y cantidad apropiada de agente extintor. Los extintores portátiles se diseñan con este objetivo, pero el éxito de su empleo depende de las siguientes condiciones:

1. El extintor debe estar bien situado y en buenas condiciones de funcionamiento.

2. Debe ser del tipo apropiado para combatir el fuego desencadenado.

3. El fuego debe detectarse lo suficientemente pronto como para que el extintor pueda ser eficaz.

4. El fuego debe ser cubierto por una persona preparada para emplear el extintor.

5. Los extintores constituyen la primera línea de defensa contra el fuego y deben instalarse independientemente de cualquier otra medida de control.

6. Los extintores portátiles son un medio primario de defensa para controlar incendios de tamaño limitado (**NFPA 10)**

7. La selección e instalación de extintores es independiente de si el edificio está equipado con rociadores automáticos, tuberías verticales y mangueras u otros equipos fijos de protección

8. Se deben usar extintores de químicos secos de gran capacidad de 10lb. (4.54kg.) o mayor y una tasa de descarga de 1lb/seg.(0.45 kg/seg.) o más para proteger estos riesgos.

9. Incendios de Líquidos Inflamables Solubles en Agua(Solventes Polares). No se deben usar extintores de incendios tipo espuma formadora de película acuosa (AFFF) y espuma de fluroproteina formadora de película (FFFP) para la protección de líquidos inflamables solubles en el agua, como alcoholes, acetona, éteres, acetonas, etc., a menos que se mencionen específicamente en la placa de identificación del extintor de incendios.

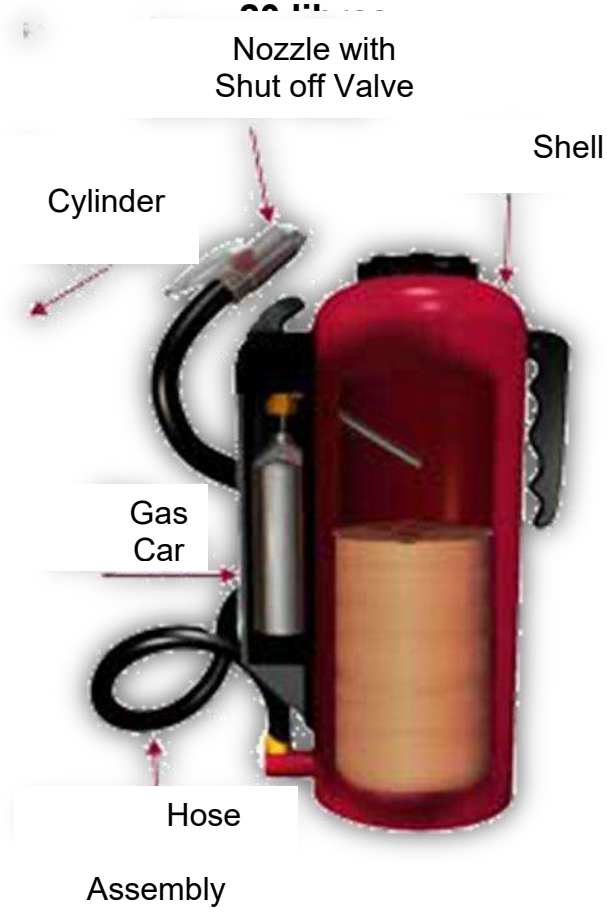
10. Se debe colocar una placa en un lugar cerca del extintor indicando que se debe activar el sistema de protección contra incendios antes de usar el extintor.

11. Los gabinetes que albergan extintores de incendios no deben cerrarse con cerrojo, excepto cuando los extintores estén sometidos al abuso y los gabinetes incluyen un medio de acceso de emergencia.

12. Los extintores de incendios montados en gabinetes o huecos de pared se deben colocar de manera que las instrucciones de operación del extintor queda hacia afuera.

Extintor Industrial para fuegos de clase

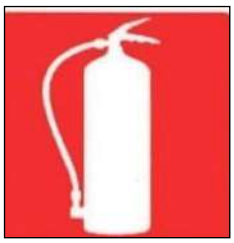
“B” con cartucho exterior



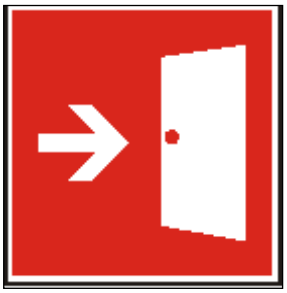
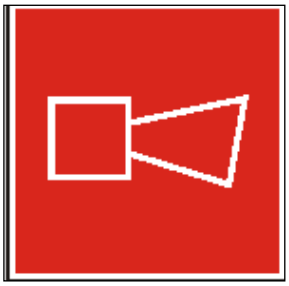
Características:

- ✓ Capacidad: 20 libras de PQS
- ✓ Polvo Químico Seco: Bicarbonato de Potasio – Purpura K
- ✓ Cartucho exterior: Gas nitrógeno de impulsor
- ✓ Certificado por UL y aprobado por FM

8.2.5. Anexo 5: Señalización del sistema

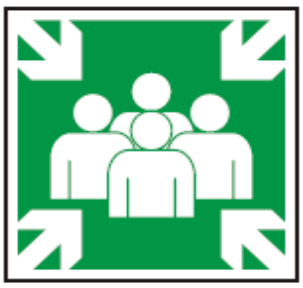
Señales de Equipos Contra Incendios		
Ítem	**Señal de Seguridad**	**Significado de la Señal**
1		HIDRANTE
2		MANGUERA CONTRA INCENDIOS
3		EXTINTOR

Ítem	Señal de Seguridad	Significado de la Señal
4		ESCALERA DE EMERGENCIA EN CASO DE INCENDIO
5		ESCALERA DE EMERGENCIA EN CASO DE INCENDIO
6		SALIDA DE EMERGENCIA (SALIDA DEL RECINTO)
Ítem	**Señal de Seguridad**	**Significado de la Señal**
7		ESCAPE

8		SALIDA DE EMERGENCIA EN CASO DE INCENDIO
9		ALARMA CONTRA INCENDIOS
10		AVISADOR SONORO EN CASO DE INCENDIO

Señales de Prohibición		
item	**Señal de Seguridad**	**Significado de la Señal**
1		PROHÍBIDO FUMAR

2		PROHÍBIDO HACER FUEGO ABIERTO O FOGATAS
3		PROHÍBIDO HACER FUEGO

Señales de Evacuación y Emergencia		
item	**Señal de Seguridad**	**Significado de la Señal**
1		SALIDA (fotoluminiscente)
2		SALIDA DE EMERGENCIA (fotoluminiscente)
3		PUNTO DE REUNIÓN EN CASO DE EMERGENCIA

8.2.6. Anexo 6: Relación de equipos y componentes del sistema de *agua y espuma contra incendios*

Sistema de Agua Contra Incendios						
Ítem	**Imagen**	**Cantidad**	**Descripción**	**Marca**	**Precio Unitario**	**Precio Total**
1		07	Hidrante con 2 válvulas angulares	Fabricación nacional	$ 300	$ 2100.00
1a		07	Válvulas angulares con ingreso de 2 1/2" (hembra) y salida de 2 1/2" (macho) x 300 psig (20.68 bar) con tapa de bronce y cadena, peso 11 3/4 " modelo U-25 2.5. Listado por UL y aprobado por FM.	ELKHART BRASS/ U-25 2.5	$ 570.00	$ 3,990.00
1b		01	Standpipe	AKRON	$ 300	$ 300.00

2		06	Manguera contra incendio de Nitrilo/PVC 2 1/2" x 30 m, color amarilla, con acoples de duraluminio. Con alta resistencia al impacto, a las roturas y a los cortes. Fáciles de limpiar, resistentes al petróleo y sus derivados, ácido y álcalis, completamente a prueba de moho, que no necesita secarse, livianas y flexibles, alta resistencia a la abrasión, no son afectadas por el agua de mar, luz ultravioleta, ozono y el calor. Listada y aprobada por UL. Cumple con la Norma British Standard 6391 Tipo3, UK Maritime & Coastguard Agency, Det Norske Veritas, German DIN 14811. Swedish SS 2840, Norwegian NS 4017/8, Swiss SFV 2 y NFPA 1961.	ANGUS FIRE /DURALINE	$ 517.00	3,102.00
Ítem	**Imagen**	**Cantidad**	**Descripción**	**Marca**	**Precio Unitario**	**Precio Total**
3		12	Mangueras contra incendio de Nitrilo/PVC 1 1/2" X 30 m, color amarillo, con acoples de duraluminio. Con alta resistencia al impacto, a las roturas y a los cortes. Fáciles de limpiar, resistente al petróleo y sus derivados, ácido y álcalis, completamente a prueba de moho, que no necesita secarse, livianas y flexibles, alta resistencia a la abrasión, no son afectadas por el agua	ANGUS FIRE /DURALINE	$ 375.00	$ 4,500.00

			de mar, luz ultravioleta, ozono y el calor. Listada y aprobada por UL. Cumple con la Norma British Standard 6391 Tipo 3, UK Maritime & Coastguard Agency, Det Norske Veritas, German DIN 14811. Swedish SS 2840, Norwegain NS 4017/8, Swiss SFV 2 y NFPA 1961			
4		02	Bifurcación reductora, ingreso de 2 1/2" (hembra giratoria), dos salidas de 1 1/2" (macho), rosca NST, material aluminio endurecido Elk – O – Lite. Con válvulas de corte, manubrios de válvulas de corte de Urethane, peso 4.5 lbs.	ELKHART BRASS/ B100A	$ 600.00	$ 1,200.00
5		01	Monitor Portátil con dos rack para mangueras de 2 ½”	AKRON	$ 8,000.00	$8,000.00
6		**04**	**Pitón Select-O-Matic con caudal automático de 60 a 125 gl/min @ 100 psig, de 1 1/2", con válvula de control y empuñadura tipo pistola, permite el uso de espuma AFFF, resistente a la corrosión, cumple con NFPA 1964.**	**ELKHART BRASS/ SM – 10 FG**	**$ 1,200.00**	**$ 4, 800.00**

Ítem	Imagen	Cantidad	Descripción	Marca	Precio Unitario	Precio Total
7		120m	Tubo de Ø 8" SCH 40	Conforme a estándares Barcino S.A, es posible combinar con HDPE	$ 56.00	$ 6, 720.00
		170 m	Tubo de Ø 6" SCH 40		$ 45.00	$ 7,650.00
8		02	Válvulas compuerta de Ø8" con vástago ascendente	Velan o Crane	$ 850	$ 1,700.00
		01	Válvulas compuerta de Ø6" con vástago ascendente		$ 650.00	$ 650.00

9		08	1 Hora de aire comprimido, tipo D. Facilidad en el uso y la facilidad en el mantenimiento, combinándolas con un rendimiento destacado. Cumple plenamente con 42 CFR 84 de NIOSH y NFPA 1981, edición d e 1997.El Fi	SCOTT	$ 5000.00	$ 40,000.00
10		08	Los Cilindros Stealth son los cilindros de aire SCBA más livianos. Cuentan con una cubierta de fibra de carbón liviana y de alto rendimiento, lo que reduce el peso del cilindro por un factor de dos a seis libras.	SCOTT	$1,000.00	$ 8,000.00
TOTAL					**$ 92,730.00**	

8.2.7. Anexo 7: Cálculo Hidráulico de la Red de Distribución — Escenario Crítico (TK-12)

Esta sección desarrolla el cálculo hidráulico de la red de distribución (selección de diámetro, pérdidas de carga por fricción y localizadas, y verificación de presión residual) para el caudal de diseño obtenido en el escenario crítico E-3 (TK-12): Q = 749.0 gpm, determinado en el capítulo de Resultados.
Nota: Los parámetros geométricos de la red (longitud de tubería entre la sala de bombas y TK-12, trazado y cantidad de accesorios) no forman parte del levantamiento de campo de esta tesis. Se presentan como valores de diseño asumidos, declarados explícitamente, con el único fin de demostrar el procedimiento de cálculo hidráulico completo exigido para el dimensionamiento del sistema. Estos valores deben ser reemplazados por datos reales de campo o de ingeniería de detalle en una etapa posterior de implementación del proyecto.

1. Selección del diámetro de tubería
Para este ramal se optó por fijar el diámetro a partir del límite de velocidad que exige NFPA 20 en tuberías de descarga de sistemas contra incendio —Vmáx = 15 pies/s (4.57 m/s)—, en lugar de partir de un diámetro comercial arbitrario y verificar después.

$$D = \sqrt{(4Q / \pi Vmáx)}$$

Con Q = 749.0 gpm = 0.04725 m³/s y Vmáx = 4.57 m/s:

$$D = 0.1147\ m = 4.52\ pulg \rightarrow \text{Diámetro comercial seleccionado: 6" (Di = 6.065 pulg), Acero ASTM A53 Sch. 40}$$

Verificación de velocidad real con el diámetro comercial seleccionado:

$$V = Q / A = 0.04725 / 0.01864 = 2.54\ m/s\ (8.32\ pies/s) < 4.57\ m/s \quad Cumple$$

Nota metodológica — fórmula de Azevedo Netto

Como referencia comparativa (metodología aplicada en la ingeniería básica de Isopetrol Lubricants del Perú S.A.C., empresa vinculada al grupo de Blending S.A.C., para el dimensionamiento de su red de descarga), se evaluó también la fórmula empírica de Azevedo Netto:

$$Do = 1.3 \cdot n^{(1/4)} \cdot \sqrt{Qb}$$

Esa fórmula da por hecho que la bomba trabaja dentro de un ciclo diario que se repite (n = horas de bombeo / 24), algo pensado para redes de abastecimiento continuo. Ese supuesto no encaja con un sistema contra incendio: la bomba permanece detenida la mayor parte del tiempo y solo opera de forma continua durante una emergencia real, como el escenario de TK-12 evaluado aquí. Al forzar n = 1 (asumiendo operación continua) se obtiene Do ≈ 11.13 pulg, un valor mayor al que exige el criterio de velocidad de NFPA 20. Por esa incompatibilidad de supuestos, se prioriza el criterio de velocidad —pensado específicamente para redes de protección contra incendio— y

Azevedo Netto queda solo como punto de comparación frente a la práctica documentada en el grupo empresarial.

2. Pérdida de carga por fricción — Hazen-Williams

Hf = 4.52 · Q^1.85 / (C^1.85 · D^4.87) [psi/pie; Q en gpm; D en pulg]

Con Q = 749.0 gpm, C = 120 (acero nuevo Sch. 40, tubería húmeda) y D = 6.065 pulg:

$$Hf = 0.0206 \text{ psi/pie} = 0.0676 \text{ psi/m}$$

3. Longitud equivalente de tubería (paramétrica)

Se asume una longitud de tramo recto de 150 m entre la sala de bombas y el punto de aplicación en TK-12 (valor de diseño, no de campo). Los accesorios se estiman con base en una configuración típica de red de este tipo:

Accesorio	Cantidad	Leq unitario (pie)	Leq total (pie)
Codo 90° estándar, 6"	4	14	56
Válvula compuerta OS&Y, 6"	2	3	6
Válvula check tipo charnela, 6"	1	35	35
Subtotales accesorios			97 pie = 29.57 m

Longitud total equivalente: L = 150 + 29.57 = 179.57 m

Pérdida de carga por fricción total:

$$Hf,total = 0.0676 \text{ psi/m} \times 179.57 \text{ m} = 12.14 \text{ psi}$$

4. Pérdida/ganancia por elevación

Se asume un desnivel Δz = 3.0 m entre la bomba y el punto de descarga en TK-12 (valor de diseño):

$$Pe = \Delta z / 0.7031 = 3.0 / 0.7031 = 4.27 \text{ psi}$$

5. Verificación de presión residual en el punto crítico

Para que el monitor sobre TK-12 opere dentro del rango de diseño adoptado en esta tesis, se exige una presión residual mínima de 100 psi en el punto de aplicación —el mismo umbral usado a lo largo del documento para gabinetes e hidrantes.

$$Pbomba = Pt,requerida + Hf,total + Pe$$

$$Pbomba = 100 + 12.14 + 4.27 = 116.41 \text{ psi}$$

En otras palabras: bajo los supuestos de diseño adoptados, la bomba tiene que entregar como mínimo 116.41 psi a 749.0 gpm para que TK-12 reciba sus 100 psi de presión residual. Una bomba NFPA 20 de 200 psi nominal —como la considerada en esta tesis— cubre ese requerimiento con margen de sobra, incluso contemplando pérdidas adicionales que este cálculo paramétrico no incorpora, como el envejecimiento de la tubería o válvulas de control extra.)

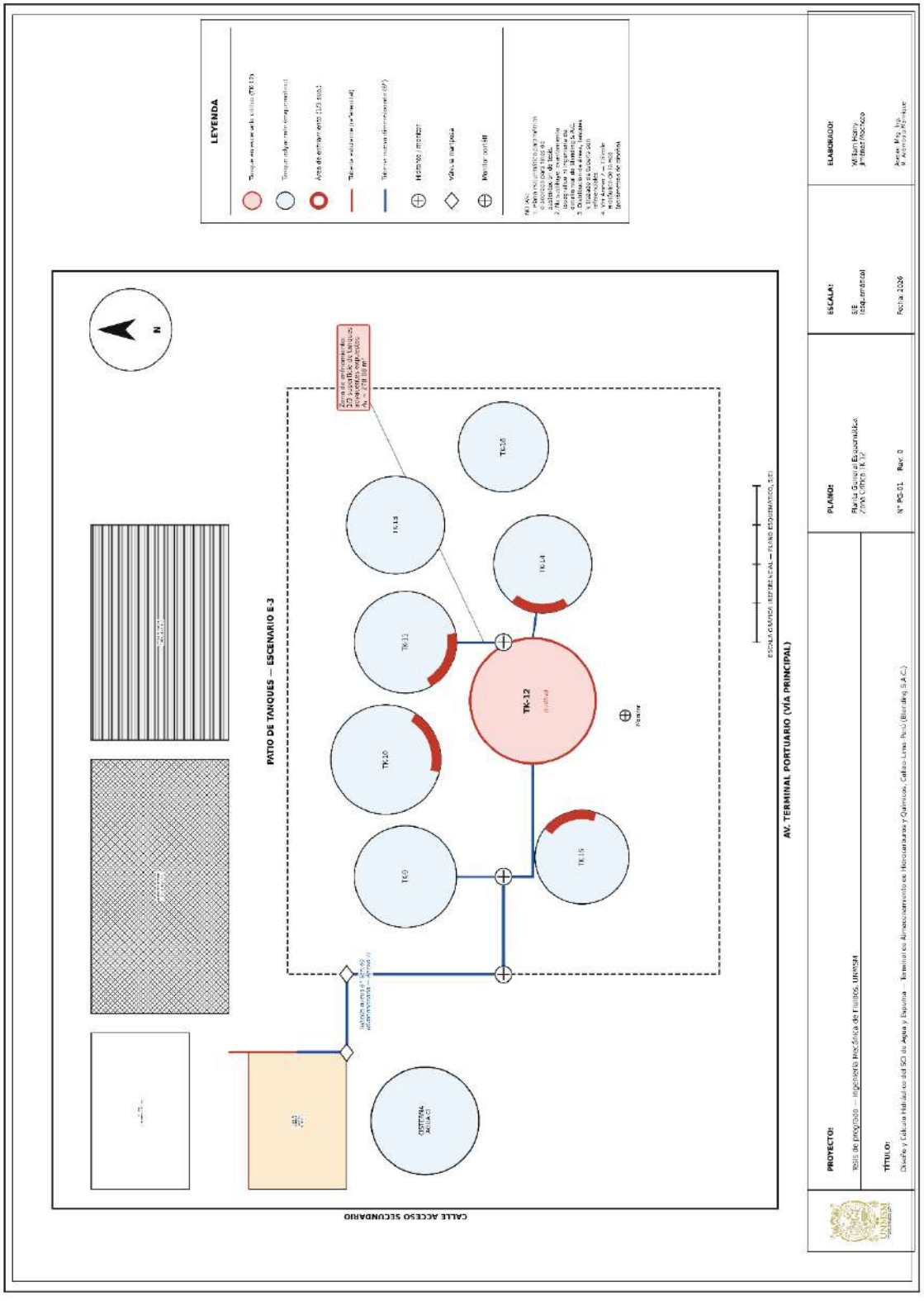
Resumen de resultados

Parámetro	Símbolo	Valor
Caudal de diseño (E-3, TK-12)	Q	749.0 gpm
Diámetro comercial seleccionado	D	6" (Di = 6.065")
Velocidad real en tubería	V	2.54 m/s (8.32 pies/s)
Longitud equivalente total (asumida)	L	179.57 m
Pérdida de carga por fricción	Hf	12.14 psi
Pérdida por elevación (asumida)	Pe	4.27 psi
Presión residual requerida (NFPA)	Pt	100.00 psi
Presión de descarga requerida en bomba	Pbomba	116.41 psi

Todos los valores de longitud, trazado y elevación en esta sección son paramétricos y se declaran como tales. El procedimiento (selección de diámetro por criterio de velocidad NFPA 20, pérdida de carga por Hazen-Williams, pérdidas localizadas y verificación de presión residual) es el que debe aplicarse con datos de campo reales de Blending S.A.C. cuando estén disponibles.

8.2.8. Anexo 8: Plano de Planta General Esquemático — Escenario Crítico TK-12

Plano esquemático paramétrico, estilo CAD, que representa el escenario crítico E-3 (TK-12) analizado en esta tesis: distribución referencial de tanques del patio, zona de enfriamiento (1/3 de la superficie de tanques adyacentes expuestos, AT = 278.08 m²) y trazado de la red de agua contra incendio dimensionada en el Anexo 7 (tubería 6" Sch. 40, Q = 749.0 gpm).



Plano N° PG-01. Elaboración propia. Escala S/E (esquemático, no a escala real).

Nota: la distribución de áreas, la posición de tanques adyacentes y el trazado de tubería son referenciales y paramétricos. No sustituyen un levantamiento topográfico ni un plano de ingeniería de detalle de Blending S.A.C. Ver Anexo 7 para el desarrollo completo de los parámetros de diseño asumidos