



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

Evaluación del nivel de protección contra incendios respecto al nivel de riesgo de incendio bajo la metodología NFPA 551 en una planta de extracción por solvente (SX) por la empresa consultora ENGINEERING SERVICES & CONSULTING S.A.C.

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico

AUTOR

Giancarlo Alexandre BENITES MUÑOZ

ASESOR

Dr. Eder Clidio VICUÑA GALINDO

Lima, Perú

2024



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

Benites, G. (2024). *Evaluación del nivel de protección contra incendios respecto al nivel de riesgo de incendio bajo la metodología NFPA 551 en una planta de extracción por solvente (SX) por la empresa consultora ENGINEERING SERVICES & CONSULTING S.A.C..* [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Giancarlo Alexandre Benites Muñoz
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	76761374
URL de ORCID	-
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Dr. Eder Clidio Vicuña Galindo
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	09069542
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-4980-0490
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Fanny Blas Rodriguez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10683607
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Jorge Luis Cárdenas Ruiz
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06627695
Datos de investigación	
Línea de investigación	No aplica.
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Universidad Nacional Mayor de San Marcos Latitud: 12° 3' 30" Sur Longitud: 77° 5' 0" Oeste
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Julio 2024 - diciembre 2024

URL de disciplinas OCDE	Ingeniería química https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01 Ingeniería de procesos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02
-------------------------	--



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)

FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA

Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "III Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2024-II", bajo la Presidencia de la **Mg. FANNY BLAS RODRIGUEZ**; **Ing. JORGE LUIS CÁRDENAS RUÍZ** (Miembro) y el **Dr. EDER CLIDIO VICUÑA GALINDO** (Asesor); habiendo presentado para tal efecto la **TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**, titulada **Evaluación del nivel de protección contra incendios respecto al nivel de riesgo de incendio bajo la metodología NFPA 551 en una planta de extracción por solvente (SX)** por la empresa consultora **ENGINEERING SERVICES & CONSULTING S.A.C.** después de **SUSTENTADA Y APROBADA** el trabajo de suficiencia profesional elaborado por el bachiller en Ingeniería Química: **BENITES MUÑOZ, GIANCARLO ALEXANDRE**; para optar el **TÍTULO PROFESIONAL** de **INGENIERO QUÍMICO**, acordaron calificarlo con la **NOTA** de:

DIECISIETE

(LETRAS)

17

(NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 21 de diciembre del 2024

Fanny Blas Rodríguez
Mg. FANNY BLAS RODRIGUEZ

Presidenta

Jorge Luis Cárdenas Ruiz

Ing. JORGE LUIS CÁRDENAS RUÍZ

Miembro

Eder Clidio Vicuña Galindo

Dr. EDER CLIDIO VICUÑA GALINDO

Asesor

Ruben Alfredo Palomino Infante
Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE

Director de la E.P. de Ingeniería Química





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

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, VICUÑA GALINDO EDER CLIDIO en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N°000027-2025-D-FQIQ/UNMSM del trabajo de suficiencia profesional, cuyo título es **Evaluación del nivel de protección contra incendios respecto al nivel de riesgo de incendio bajo la metodología NFPA 551 en una planta de extracción por solvente (SX) por la empresa consultora ENGINEERING SERVICES & CONSULTING S.A.C.**, presentado por el bachiller: **Benites Muñoz, Giancarlo Alexandre** para optar el título Profesional de Ingeniería Química, 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 9% 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 correspondiente.

Lima, 07 de enero de 2025

Firma del Asesor _____

Nombres y Apellidos del asesor: Eder Clidio Vicuña Galindo

DNI 09069542

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mis padres Ruby y César.

Por ser mi inspiración, mi apoyo incondicional y mi
ejemplo a seguir.

Gracias por enseñarme a ser siempre perseverante y a
dar siempre lo mejor de mí.

Con todo mi cariño y gratitud,

Agradecimiento

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo. A ENGINEERING SERVICES & CONSULTING por su invaluable apoyo, orientación y paciencia durante este proceso. Al Doctor Eder Vicuña Galindo por su apoyo y presión constante para realizar un buen trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. Resumen.....	1
2. Justificación de trabajo de suficiencia.....	2
2.1 Aporte académico	2
3. Objetivos del trabajo de suficiencia	3
3.1 Objetivo General	3
3.2 Objetivos Específicos	3
4. Marco Teórico.....	4
4.1 Aspectos fundamentales del proceso a estudiar	4
4.1.1 Descripción de proceso LIX.....	5
4.1.2 Descripción del proceso SX	6
4.1.3 Ventajas de la extracción con solventes orgánicos.....	15
4.1.4 Breve descripción del proceso EW	18
4.2 Aspectos fundamentales del fuego	19
4.2.1 Combustión	19
4.2.2 Punto de Inflamabilidad	20
4.2.3 Punto de Ebullición.....	22
4.2.4 Presión de Vapor.....	23
4.2.5 Química del fuego	24
4.2.6 Tetraedro del fuego	25
4.3 Teoría de extinción de incendios	26
4.3.1 Formas de extinción del fuego.....	26
4.3.2 Extinción de incendios por eliminación de combustible	28
4.3.3 Extinción de incendios por inhibición del oxidante	28
4.3.4 Extinción de incendios por enfriamiento	29
4.3.5 Extinción de incendios por interrupción de la reacción en cadena.....	30
4.4 Sistemas de extinción de incendios.....	31

4.4.1	Sistemas manuales de extinción contra incendios.....	32
4.4.2	Sistemas automáticos de extinción contra incendios	32
4.4.3	Sistema de extinción por espuma.....	33
4.5	Documentación referente en protección contra incendios	34
4.5.1	National Fire Protection	34
5.	Metodología de Evaluación	37
5.1	Evaluación de peligros	38
5.2	Evaluación de escenarios de incendio	39
5.2.1	Escenarios tipo clúster	39
5.3	Evaluación de la probabilidad.....	40
5.4	Evaluación de la severidad	41
5.5	Evaluación del riesgo	43
6.	Resultados	44
6.1	Resultado de evaluación del nivel de riesgo.....	44
6.2	Identificación de peligros inherentes al proceso	44
6.2.1	Fuentes de calor.....	44
6.2.2	Contribuyentes	45
6.3	Identificación de escenarios de incendio	47
6.3.1	Escenario de incendio en mezcladores-decantadores de extracción.....	47
6.3.2	Escenario de incendio en tanque orgánico cargado	47
6.3.3	Escenario de incendio en la fase de re-extracción (S1).....	47
6.3.4	Escenario de incendio en el área de lavado (W1).....	47
6.3.5	Escenario de incendio en el área de electrodeposición	48
6.3.6	Escenario de incendio en tuberías y bombas	48
6.3.7	Escenario de incendio en área de almacenamiento y recirculación de orgánico	
	48	
6.3.8	Escenario de incendio en el sistema de control y electricidad	48

6.4	Evaluación de probabilidad	49
6.4.1	Datos históricos.....	49
6.4.2	Fuentes de calor.....	49
6.4.3	Factor humano	50
6.4.4	Proximidad entre equipos y materiales inflamables:	50
6.4.5	Acceso y ventilación	50
6.4.6	Ubicación de los tanques de almacenamiento:.....	51
6.4.7	Sistema de contención de derrames	51
6.4.8	Valoración de probabilidad	51
6.5	Evaluación de la severidad	52
6.5.1	Desarrollo de un incendio.....	53
6.5.2	Capacidad de extinción de los sistemas contra incendios	55
6.5.3	Impacto a la cadena operativa.....	57
6.5.4	Carga térmica y afectación de equipos.....	60
6.5.5	Valoración de severidad	64
6.6	Resultados finales de la evaluación de riesgo.....	65
7.	Discusión de resultados	67
7.1	Implementación de Sistemas de extinción con espuma	69
7.2	Demanda de agua.....	70
7.3	Monitoreo continuo de gases inflamables	70
7.4	Diseño de barreras Ignífugas	70
7.5	Diseño de sistemas de drenaje de emergencia	70
7.6	Optimización de la ventilación	71
7.7	Aislamiento de fuentes de calor	71
7.8	Capacitación del personal	72
7.9	Diseño de zonas seguras.....	72
7.10	Inspección y mantenimiento regular	72

7.11 Equipos de respuesta a emergencias	72
8. Conclusiones.....	74
9. Bibliografía	75
10. ANEXOS	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de evaluación de probabilidad según metodología NFPA. Fuente: Adaptado de la NFPA 551 Edición 2022 Table A.5.2.5(a).....	41
Tabla 2. Tabla de evaluación de severidad según metodología NFPA. Fuente: Adaptado de la NFPA 551 Edición 2022 Table A.5.2.5(b).....	42
Tabla 3. Tabla de evaluación de nivel de riesgo según metodología NFPA. Fuente: Adaptado de la NFPA 551 Edición 2022 Table A.5.2.5(b).....	43
Tabla 4. Resultado de la evaluación.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del Proceso de Extracción por Solventes	9
Figura 2. Esquema del flujo del orgánico	11
Figura 3. Esquema del flujo del PLs.....	12
Figura 4. Esquema de evaluación según metodología NFPA.....	37
Figura 5. Esquema de separación de fases y secciones de un decantador	56
Figura 6. <i>Inputs</i> de evaluación	61
Figura 7. Resultados de alcance de afectación de equipos por simulación.....	62
Figura 8. Resultados de la evaluación por simulación ALOHA versión 5.4.7	64
Figura 9. Esquema de posicionamiento de descarga de espuma en decantadores abiertos – FM DATA SHEET 0712	79
Figura 10. Esquema de posicionamiento de descarga de espuma en decantadores cerrados - FM DATA SHEET 0712	79
Figura 11. Sistema de drenaje de emergencia hacia tanques colectores - FM DATA SHEET 0712	80

1. Resumen

Este proyecto tuvo como objetivo principal evaluar el nivel de riesgo de incendio en una planta de extracción por solventes (SX) y correlacionar la calidad de las medidas de protección contra incendios con la reducción del riesgo. Se utilizó un enfoque cualitativo basado en la metodología de la NFPA 551 para analizar la efectividad de sistemas de detección y supresión, la adecuación de equipos a normativas internacionales y el impacto de la capacitación del personal y los protocolos de emergencia en la mitigación de riesgos. También se identificaron peligros inherentes al proceso SX, como el manejo de solventes inflamables y la interacción con fuentes de ignición; los eventos peligrosos se analizaron en términos de probabilidad y severidad, determinando un nivel de riesgo alto. Los resultados demostraron que los sistemas de protección alineados con normativas internacionales son más efectivos para reducir el riesgo de incendio; que la implementación de medidas preventivas, capacitación del personal y protocolos adecuados contribuyen significativamente a mitigar los riesgos. Se concluye que las estrategias de protección contra incendios bien implementadas y alineadas con normativas reducen significativamente el riesgo en plantas SX, maximizando la seguridad operativa.

2. Justificación de trabajo de suficiencia

La investigación, de evaluación del nivel de riesgo de incendio en plantas de extracción por solvente (SX), se encuentra dentro del marco de la política de investigación institucional de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, que promueve la seguridad, la sostenibilidad y la responsabilidad social en las actividades industriales; así como también respecto a la formación de profesionales competentes en la industria minera y de procesos químicos.

Este tema no solo contribuye a la comprensión y gestión de riesgos industriales, sino que también fortalece el desarrollo académico y práctico en áreas críticas como la seguridad de procesos (*Process Safety*), el diseño de operaciones unitarias, y la optimización de sistemas industriales complejos. Esto es particularmente importante en el contexto de la educación universitaria, donde se busca formar ingenieros y técnicos capacitados en la identificación y mitigación de riesgos en operaciones unitarias, que son los bloques fundamentales de cualquier proceso químico o minero.

Finalmente, la investigación en este tema promoverá una cultura de seguridad y prevención que es esencial para cualquier profesional involucrado en el diseño y operación de sistemas industriales. Esto resalta la importancia de integrar la seguridad de procesos en la formación académica, asegurando que los futuros profesionales estén equipados no solo con habilidades técnicas, sino también con un compromiso profundo hacia la protección de la vida, el medio ambiente y las instalaciones industriales.

2.1 Aporte académico

Esta evaluación de riesgos de incendio en plantas de extracción por solventes (SX) ofrece un importante aporte académico para la universidad y el campo de la seguridad de procesos, al profundizar en un ámbito crítico en la industria minera y química. En el contexto universitario, este proyecto contribuye al desarrollo de conocimientos especializados en ingeniería de seguridad, capacitando a futuros profesionales para abordar y mitigar riesgos

en sistemas complejos y mejorando la preparación académica en áreas como la ingeniería de protección contra incendios, la evaluación de peligros y la gestión de riesgos. Además, al generar datos específicos y adaptados al entorno de plantas SX, se permite una comprensión más precisa de los factores de riesgo en instalaciones reales, lo cual enriquece los recursos de aprendizaje de los estudiantes y docentes en la institución.

Para el campo de seguridad de procesos, este análisis fortalece la identificación y evaluación de prácticas de seguridad en la manipulación de solventes y en la prevención de incendios. La integración de este conocimiento no solo mejora las prácticas de ingeniería de seguridad, sino que también establece un marco metodológico que otros profesionales e investigadores pueden emplear para diseñar sistemas de prevención de incendios más eficientes y efectivos. Esto, a su vez, optimiza los procesos operativos, garantizando tanto la seguridad del personal como la estabilidad de los procesos productivos, generando un impacto positivo y sostenible en la seguridad de la industria.

3. Objetivos del trabajo de suficiencia

3.1 Objetivo General

Evaluar la influencia del nivel de protección contra incendios en el nivel de riesgo de incendio en una planta de extracción por solventes (SX), a través de un análisis cualitativo de la efectividad de medidas de seguridad como sistemas de detección y supresión de incendios, protocolos de emergencia, capacitación del personal y adecuación de equipos a normativas de seguridad, con el fin de establecer una correlación entre la calidad de estas estrategias de protección y la reducción del riesgo en condiciones operativas reales.

3.2 Objetivos Específicos

- Analizar la influencia de las medidas de protección contra incendios (sistemas de detección y supresión de incendios, protocolos de emergencia, capacitación del personal y adecuación de equipos) en la reducción del nivel de riesgo de incendio en una planta de extracción por solventes (SX).

- Evaluar la calidad e implementación de las estrategias de seguridad en la planta SX, considerando su alineación con normativas internacionales de seguridad como la NFPA, con el fin de establecer la correlación entre estas medidas y la disminución del riesgo de incendio.
- Contribuir al campo de la Seguridad de Procesos proporcionando un análisis cualitativo de la efectividad de los sistemas de protección contra incendios en plantas de extracción por solventes, que pueda ser utilizado como referencia en futuras investigaciones y estudios de seguridad industrial.
- Generar un aporte significativo al conocimiento académico en el ámbito de la seguridad industrial, brindando a la comunidad universitaria datos y perspectivas sobre la evaluación cualitativa de los sistemas de protección contra incendios y su impacto en la mitigación de riesgos en plantas SX.
- Proponer mejoras y recomendaciones para la implementación de sistemas de protección contra incendios en plantas de extracción por solventes, basadas en los hallazgos del análisis cualitativo, con el objetivo de optimizar la seguridad operativa y reducir el riesgo de incidentes.

4. Marco Teórico

4.1 Aspectos fundamentales del proceso a estudiar

El método de Lixiviación-Extracción por Solventes-Electrodeposición (LXV-SX-EW) es uno de los procesos más eficaces y ampliamente utilizados en la obtención de cobre de alta pureza a partir de minerales oxidados. Este proceso comienza con la lixiviación, una etapa en la cual el mineral de cobre se disuelve en una solución de ácido sulfúrico, generando una solución de sulfato de cobre. La lixiviación permite extraer cobre de manera eficiente, incluso de minerales con baja concentración, lo cual es esencial en yacimientos donde el contenido de cobre en la roca es limitado. Este proceso se realiza en pilas de lixiviación, donde se distribuye el ácido de forma uniforme para lograr una extracción completa del metal (Schlesinger et al., 2011).

Posteriormente, la solución de sulfato de cobre pasa a la etapa de extracción por solventes (SX), en la cual un solvente orgánico selectivo separa el cobre de otros iones presentes en la solución. Este solvente se mezcla con la solución de lixiviado, permitiendo que el cobre se transfiera al solvente, mientras otros metales no deseados quedan en el lixiviado. Luego, el cobre disuelto en el solvente es transferido a una fase acuosa mediante un proceso llamado reextracción o *stripping*. Esta etapa garantiza una mayor pureza del cobre y reduce las impurezas que podrían afectar el producto final (Rydberg et al., 2004).

La última etapa es la electrodeposición (EW), donde el cobre es depositado en cátodos de alta pureza mediante la aplicación de una corriente eléctrica. En este proceso, el cobre disuelto en la solución acuosa es reducido y depositado en láminas de cobre de 99.99% de pureza, listas para ser utilizadas en diversas aplicaciones industriales. La electrodeposición permite la obtención de cobre de alta calidad de manera continua y controlada, y su alta pureza hace que el producto final cumpla con los estándares industriales más exigentes (Davenport et al., 2002).

4.1.1 Descripción de proceso LIX

La lixiviación es un proceso utilizado en la metalurgia para recuperar metales valiosos de minerales, especialmente en la minería del cobre. Este proceso consiste en disolver el metal en un disolvente, generalmente una solución ácida, lo que facilita la separación de los metales de la roca mineral. En el caso del cobre, se emplea comúnmente una solución de ácido sulfúrico que reacciona con el mineral, liberando los iones de cobre en la disolución Wills, B. A. (2006).

Existen dos métodos principales de lixiviación: la lixiviación en pilas y la lixiviación en tanques. En la lixiviación en pilas, los minerales triturados se apilan en grandes montones y se riegan con la solución lixivante, permitiendo que el metal se disuelva gradualmente. Este método es especialmente eficiente para minerales de baja ley y es menos costoso que otros métodos (Crundwell et al., 2011). Por otro lado, la lixiviación en tanques implica la mezcla continua del mineral con la solución en grandes tanques, proporcionando un

control más preciso sobre las condiciones del proceso y una extracción más rápida (Rydberg et al., 2004).

Un aspecto crítico de la lixiviación es la cinética del proceso, que está influenciada por factores como la temperatura, la concentración de la solución y el tamaño del mineral. Optimizar estos parámetros es esencial para maximizar la eficiencia de la extracción (Harris & Rawlings, 2017). La lixiviación no solo permite la recuperación de metales valiosos, sino que también puede ser una forma sostenible de aprovechar recursos minerales, especialmente en comparación con métodos más agresivos que generan un mayor impacto ambiental.

4.1.2 Descripción del proceso SX

La obtención de cobre mediante el proceso denominado Lixiviación-Extracción por Solvente-Electrodeposición (LIX-SX-EW) es un método el cual presenta numerosas ventajas para la industria metalúrgica debido a su relativa facilidad para obtener el cobre en alta pureza. Este método permite la recuperación eficiente de cobre de minerales oxidados de baja ley, usando ácido sulfúrico para disolver el cobre en una solución lo que permite reducir los costes de procesos de extracción del cobre de las rocas minerales. Es por ello que, estas operaciones son las que se realizan en las unidades mineras dedicadas al procesamiento de extracción de minerales en el Perú y el mundo en mayor cantidad a diferencia de métodos como la fundición o pirometalurgia. El proceso consiste en realizar la lixiviación de la roca que contiene el cobre con una solución de Ácido Sulfúrico para que este resultante se separe en una etapa de extracción por solvente para finalmente pasar a una etapa de electrodeposición para la obtención de dicho mineral en alta pureza. Este último proceso de electrodeposición (EW - ElectroWinining) asegura una recuperación del mineral hasta de un (99.99%) según Rydberg et al. (2004).

El desarrollo del proceso de Extracción por Solventes es un método por el cual, sin realizar operaciones complejas se puede lograr la separación de cobre de forma eficiente y con la ventaja de pocas pérdidas en el proceso. Esta técnica consiste en la extracción

aprovechando la solubilidad de las sustancias, es decir, sus propiedades de miscibilidad. El principio de este método es aprovechar que el ácido sulfúrico, un líquido polar, entrará en contacto con un líquido con propiedades apolares, es decir, no existirá solubilidad entre ambas sustancias y permitirá al cobre pasar de una sustancia a otra (Extracción) sin pérdidas, trazas o contaminación en el proceso. La sustancia con propiedades apolares, es un líquido el cual, mencionado anteriormente como un líquido inflamable, está conformado por dos compuestos donde uno es denominado el “extractante” y el otro el “diluyente”. Estas dos sustancias juegan un rol importante en la separación, donde el extractante es usado por lo general en una concentración de 6% cuyo fin es “atrapar” al cobre por alta selectividad, mientras que el diluyente usado en una concentración de 94% es usado para disminuir la viscosidad del extractante para facilitar el “atrapamiento” del cobre.

En términos de reacciones químicas, el ion de cobre que se encuentra en una sustancia denominada PLS (*Pregnant Liquid Solution*) se contacta con el extractante y diluyente que ocasiona la extracción de cobre hacia la solución orgánica (Extractante y Diluyente). La solución orgánica con todo el cobre extraído se denomina Orgánico Cargado. Posteriormente, este líquido orgánico cargado pasa a otra etapa donde extraído bajo el mismo proceso SX con un electrolito el cual participa en el proceso Rydberg (2004). El proceso ocurrido se muestra en la siguiente reacción química, donde el extractante está representado por la nomenclatura RH:



Este proceso, se realiza en grandes pozos denominados “*Settler*”, cuya función realizar el contacto de forma lenta de las sustancias para que se realice el atrapamiento de cobre. La configuración más común que expresa el flujo del proceso se muestra en la Figura 1. Posteriormente, estos dos líquidos se separan donde uno obtendrá el cobre del proceso anterior. Cabe mencionar que la realización de este método se hace en etapas que aseguran la completa transferencia del cobre hacia el líquido orgánico, es decir, el uso de *settlers* en

serie donde los dos líquidos fluyen en contracorriente para realizar la extracción y recuperación más eficiente. Rydberg (2004).

A. Etapas en la extracción por solventes

Circuito del orgánico

El circuito del orgánico en el proceso de extracción por solventes (SX) juega un papel esencial en la transferencia del cobre desde la fase acuosa hacia la orgánica. Este circuito comienza con el ingreso del reactivo orgánico fresco, típicamente compuesto por diluyentes y extractantes, como derivados de oxima o aldoxima, que son químicos selectivos para el cobre. A medida que la solución orgánica recircula en el sistema, se somete a intercambios repetidos de cobre con la solución acuosa. Durante el proceso, el orgánico cargado (con cobre extraído) fluye hacia el circuito de *stripping*, donde se libera el cobre y el orgánico regresa regenerado para continuar su función. Este sistema depende de una gestión estricta de variables como la relación orgánico-agua (O/A) y la pureza del orgánico, ya que la acumulación de contaminantes o degradación del reactivo puede afectar significativamente la eficiencia y estabilidad del circuito (Habashi, 1993; Biswas & Davenport, 2013).

El diseño del circuito del orgánico incluye equipos clave como settlers, bombas y tanques de mezcla, todos configurados para optimizar el contacto entre las fases y minimizar pérdidas de reactivos por evaporación o arrastre. La correcta operación de este circuito es crítica para mantener el balance de fases y evitar problemas operativos, como el arrastre de orgánico hacia la fase acuosa, que puede impactar la eficiencia del proceso y generar desafíos ambientales (Mackinnon & Bartsch, 2016).

La Figura 2 ilustra el flujo de soluciones y fases orgánicas en el proceso de extracción por solventes (SX). En el gráfico, se observa cómo el PLS (solución rica en cobre) ingresa a la primera etapa de extracción, E-1, donde se pone en contacto con la fase orgánica para transferir el cobre. Posteriormente, el orgánico parcialmente cargado se somete a una segunda etapa, E-2, para completar la transferencia del metal. Luego, el orgánico cargado se almacena en un tanque antes de ser enviado a la etapa de re-extracción (*stripping*), representada aquí como S-1, donde el cobre se transfiere desde la fase orgánica a una

solución acuosa de refino. El proceso incluye un circuito cerrado que optimiza el uso del reactivo orgánico y asegura el máximo aprovechamiento del cobre, resaltando la eficiencia del diseño operativo (Figura 2).

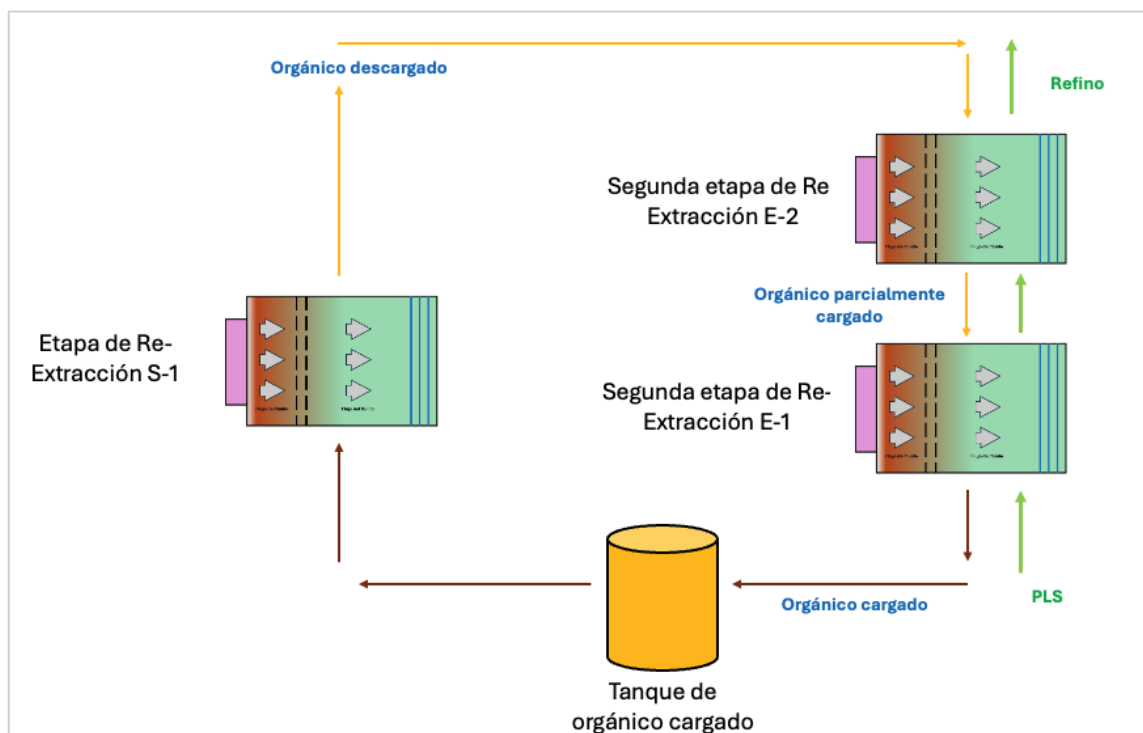


Figura 2. Esquema del flujo del orgánico

Circuito del PLS

El circuito del PLS (Pregnant Leach Solution) es el punto de partida para el proceso de SX, dado que transporta la solución cargada con cobre extraído de las pilas de lixiviación hacia las etapas de extracción. Este circuito incluye una red de tuberías, estanques de almacenamiento y bombas que garantizan un flujo constante de la solución hacia los mixers-settlers. El PLS típicamente contiene una concentración de cobre variable, junto con impurezas como hierro, manganeso y aluminio, cuya presencia puede afectar el desempeño del circuito de SX si no se gestionan adecuadamente. Para ello, se monitorea continuamente el pH y la concentración de cobre en la solución, asegurando condiciones ideales para la interacción con la fase orgánica (Habashi, 1993; Biswas & Davenport, 2013).

La calidad del PLS influye directamente en la eficiencia del proceso. Soluciones con alta turbidez o contaminantes orgánicos, como aceites o partículas finas, pueden dificultar la separación de fases y generar problemas como emulsiones o arrastre. Por ello, sistemas de pretratamiento, como clarificadores o filtros, suelen estar integrados en este circuito para asegurar que el PLS que entra al proceso de SX esté en condiciones óptimas para una extracción eficiente y segura (Mackinnon & Bartsch, 2016).

La Figura 3 ilustra el flujo del PLS (solución rica en cobre) desde las canchas de lixiviación hasta las etapas de extracción por solventes, pasando por diferentes pozas y etapas de tratamiento. El PLS, extraído de las canchas de lixiviación, es recolectado en las pozas de colección y luego bombeado a las pozas de alimentación para estabilizar su flujo hacia la planta SX. A partir de ahí, ingresa a la primera etapa de extracción E-1, donde una porción significativa del cobre es transferida al orgánico. El PLS parcialmente descargado pasa a una segunda etapa de extracción E-2, donde se extrae el cobre restante antes de enviarlo a la poza de refino para su disposición o reciclaje. Este proceso asegura un uso eficiente de los reactivos y la recuperación óptima del cobre.

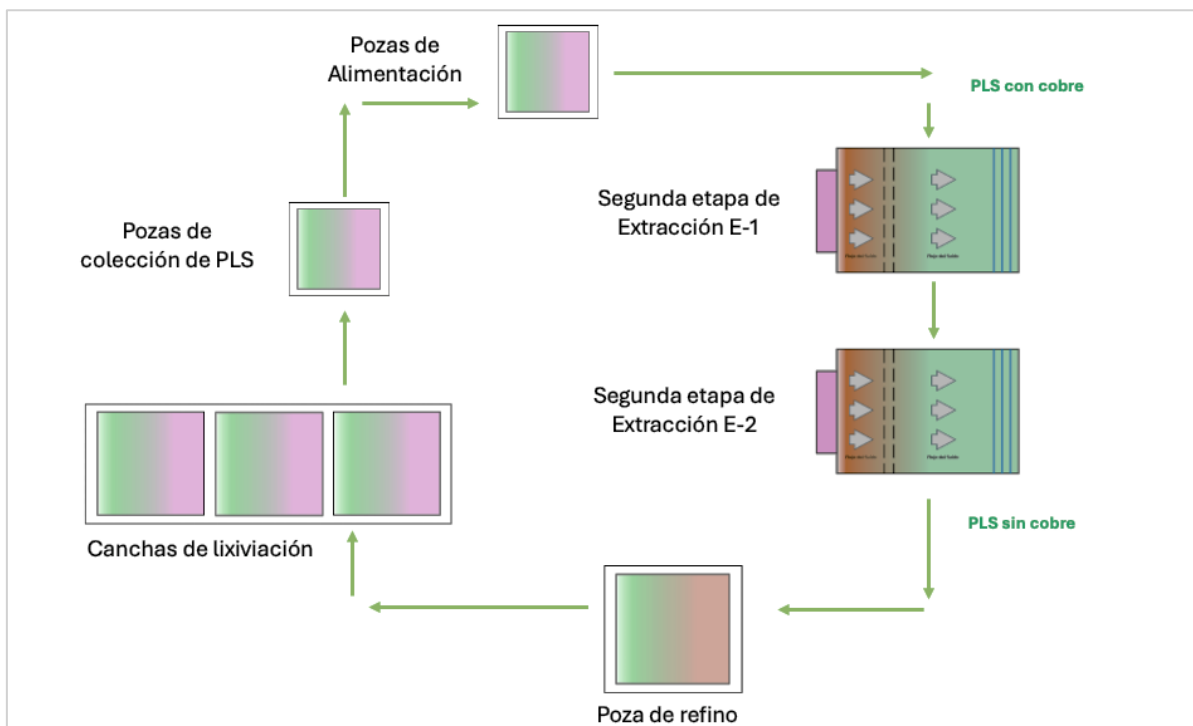


Figura 3. Esquema del flujo del PLs

B. Etapa 1 de extracción E-1

La etapa de extracción E1 en el proceso de extracción por solventes (SX) es fundamental para la separación eficiente del cobre contenido en la solución de lixiviación. En esta fase inicial, el cobre disuelto en la solución acuosa (conocida como PLS, *Pregnant Leach Solution*) se transfiere selectivamente a una fase orgánica que contiene un reactivo de extracción, como un oxima modificado. Este proceso ocurre mediante una reacción química en la que el cobre se liga al extractante, mientras los otros metales permanecen mayormente en la fase acuosa. La extracción es altamente dependiente de parámetros como el pH, la temperatura y la concentración de reactivo en la fase orgánica, los cuales son ajustados cuidadosamente para maximizar la recuperación de cobre y minimizar la presencia de impurezas en la fase cargada de cobre (Prasad et al., 1992).

Una vez que la fase orgánica ha capturado el cobre, esta solución cargada es transferida a las etapas posteriores del proceso SX, como el *stripping*, donde el cobre es liberado para su concentración en una solución electrolítica que será utilizada en el paso de electro-obtención. La eficiencia en E1 no solo afecta la recuperación de cobre, sino también la estabilidad del circuito SX en su conjunto, siendo clave para mantener un balance adecuado entre las fases acuosa y orgánica en los diferentes pasos del proceso (Prasad et al., 1992).

C. Etapa 2 de extracción E-2

La etapa E2 del proceso de extracción por solventes (SX) es crítica para maximizar la recuperación de cobre del PLS y mejorar la eficiencia global del circuito. En esta etapa, la solución orgánica previamente cargada con cobre durante E1 se somete a un contacto adicional con la solución acuosa, pero con menor concentración de cobre. Esto permite un intercambio más selectivo y eficiente, reduciendo los niveles residuales de cobre en el PLS de salida. El objetivo principal de E2 es lograr una extracción adicional del metal, alcanzando un equilibrio óptimo entre las fases orgánica y acuosa. La relación fase

orgánica/acuosa (O/A) y la agitación controlada en los *mixers-settlers* son esenciales para asegurar una transferencia eficiente y evitar problemas como la formación de emulsiones.

El diseño de los *settlers* y *mixers* en E2 está optimizado para manejar mayores volúmenes y garantizar una separación efectiva de fases. Esto incluye configuraciones con *picket fences* y deflectores que promueven una sedimentación rápida de las gotas de solución orgánica dispersas. Además, en esta etapa se monitorea rigurosamente el pH y la temperatura, ya que condiciones fuera de rango pueden impactar la eficiencia de extracción y la estabilidad del reactivo. La operación adecuada de E2 no solo incrementa la recuperación de cobre, sino que también prepara el PLS restante para su disposición o tratamiento posterior, minimizando su impacto ambiental (Mackinnon & Bartsch, 2016; Hiskey & Wadsworth, 1995).

D. Etapa de re-extracción S-1

La etapa S1 en el proceso de extracción por solventes (SX) es el primer paso del circuito de *stripping* (o despojo), donde el cobre cargado en la solución orgánica durante las etapas de extracción es transferido de vuelta a una solución acuosa concentrada, conocida como electrolito. En S1, el objetivo principal es regenerar el reactivo orgánico para que pueda ser reutilizado en las etapas de extracción, mientras se transfiere el cobre a la solución electrolítica que alimentará la etapa de electro-obtención (EW). Esto se logra al poner en contacto la solución orgánica con un electrolito ácido que tiene una concentración elevada de sulfato y baja de cobre, generando un gradiente de concentración favorable para el intercambio de metales (Habashi, 2013).

En esta etapa, los parámetros operativos son críticos, especialmente el equilibrio de la relación fase orgánica/acuosa (O/A) y el control del pH del electrolito. Una relación incorrecta puede reducir la eficiencia del despojo y aumentar el arrastre de orgánico al circuito de EW, generando problemas operativos como la formación de espuma y contaminación del cátodo. Además, el diseño de los *mixers-settlers* en S1 incluye elementos que facilitan la separación rápida y efectiva de fases, como *picket fences* y

sistemas de agitación optimizados. El control adecuado en esta etapa asegura una recuperación eficiente del cobre, prolonga la vida útil del reactivo orgánico y reduce los costos operativos generales del proceso (Hiskey & Wadsworth, 1995).

E. Etapa de lavado W-1

La etapa W1, que corresponde al primer contacto de lavado (*wash*) en el circuito de extracción por solventes (SX), se centra en la eliminación de impurezas acuosas arrastradas durante el contacto entre la solución acuosa y la fase orgánica en las etapas anteriores. Este proceso es fundamental para garantizar que las fases orgánica y acuosa que ingresan al circuito de *stripping* y extracción posterior estén lo más puras posibles. La etapa W1 utiliza agua o una solución ligeramente acidificada como fase de lavado para remover trazas de soluciones acuosas adheridas a la fase orgánica, que podrían contener sulfato, cloro o impurezas metálicas como hierro y manganeso. Estas impurezas, si no se eliminan, pueden contaminar el electrolito final y afectar la calidad del cátodo de cobre en la etapa de electro-obtención (Habashi, 1993).

El diseño y operación de la etapa W1 están optimizados para maximizar la eficiencia del lavado y minimizar la pérdida de reactivo orgánico. Los mezcladores en esta etapa aseguran un contacto íntimo entre las fases para promover la transferencia de impurezas, mientras que los *settlers* permiten una separación rápida y eficiente de las fases. El uso de *picket fences* y sistemas de control de caudal asegura la estabilidad del proceso, evitando problemas como la formación de emulsiones. Además, el monitoreo continuo de la calidad del orgánico lavado y del agua de desecho permite ajustar los parámetros operativos en tiempo real para mantener la eficiencia del proceso y reducir los costos asociados al consumo de reactivos químicos.

4.1.3 Ventajas de la extracción con solventes orgánicos

Este método permite la recuperación eficiente de cobre de minerales oxidados de baja ley, usando ácido sulfúrico para disolver el cobre en una solución lo que permite reducir los

costes de procesos de extracción del cobre de las rocas minerales. Es por ello que, estas operaciones son las que se realizan en las unidades mineras dedicadas al procesamiento de extracción de minerales en el Perú y el mundo en mayor cantidad a diferencia de métodos como la fundición o pirometalurgia. El proceso consiste en realizar la lixiviación de la roca que contiene el cobre con una solución de Ácido Sulfúrico para que este resultante se separe en una etapa de extracción por solvente para finalmente pasar a una etapa de electrodeposición para la obtención de dicho mineral en alta pureza. Este último proceso de electrodeposición (EW - ElectroWinining) asegura una recuperación del mineral hasta de un (99.99%) según Rydberg et al. (2004).

El desarrollo del proceso de Extracción por Solventes ha permitido optimizar la separación de cobre de manera eficiente y con mínimas pérdidas, sin requerir operaciones complejas. Esta técnica se basa en el aprovechamiento de las propiedades de solubilidad de las sustancias, específicamente sus capacidades de miscibilidad. El principio fundamental del proceso radica en la interacción entre el ácido sulfúrico, un líquido polar, con un líquido apolar, con el cual no existe solubilidad mutua. Esta diferencia permite que el cobre pase de una sustancia a otra (extracción) sin pérdidas significativas, trazas o contaminación en el proceso.

El líquido apolar, utilizado en este proceso, es un compuesto inflamable compuesto por dos componentes clave: el "extractante" y el "diluyente". El extractante, generalmente usado en una concentración del 6%, juega un papel crucial al "atrapar" el cobre con alta selectividad. Por otro lado, el diluyente, empleado en una concentración del 94%, se utiliza para reducir la viscosidad del extractante, facilitando así la captación del cobre. Esta técnica ha demostrado ser la opción más eficiente y confiable hasta la fecha para la extracción de cobre, gracias a su capacidad para maximizar la recuperación del metal y minimizar las pérdidas en el proceso. Sin embargo, dado que involucra el uso de sustancias inflamables, es esencial implementar rigurosos sistemas de seguridad para mitigar los riesgos asociados.

En la SX, además del queroseno, que es uno de los líquidos más comúnmente utilizados debido a sus propiedades de solubilidad y compatibilidad con diversos extractantes, existen otros líquidos extractantes que se utilizan dependiendo de las características del proceso y el metal que se quiere extraer. Algunos de los más comunes incluyen:

Diisobutilcetona (DIBK): Este líquido extractante es un solvente polar que se utiliza para la extracción de metales como el cobre y el oro. Su ventaja es que tiene una alta selectividad, especialmente en procesos de extracción con ácidos. Sin embargo, tiene una mayor viscosidad que el queroseno y puede requerir aditivos para mejorar su fluidez y eficiencia en la separación.

Alcoholes: En algunos procesos, los alcoholes como el alcohol isopropílico o el butanol pueden utilizarse como solventes para la extracción de ciertos metales, aunque son menos comunes en la extracción de cobre. Los alcoholes tienen una menor volatilidad que los líquidos más apolares, pero suelen ser menos eficaces para disolver compuestos metálicos, lo que puede hacer que la eficiencia del proceso sea menor en comparación con los solventes como el queroseno (Pradhan & Mishra, 2020).

Ácidos orgánicos (como el ácido carboxílico): En algunos casos, los ácidos orgánicos son utilizados para la extracción de metales, ya que son efectivos en ciertas condiciones. Aunque tienen una buena selectividad, su principal desventaja es que son más corrosivos que otros solventes y pueden generar más problemas de mantenimiento en los equipos utilizados para el proceso de extracción (Pradhan & Mishra, 2020).

Desventajas de líquidos no inflamables comparados con líquidos inflamables como el queroseno:

Eficiencia en la extracción: Los líquidos no inflamables como el alcohol o ciertos ácidos orgánicos tienden a tener una menor eficiencia en la extracción de metales debido a su menor solubilidad con los extractantes y una menor capacidad para disolver metales en

comparación con líquidos apolares como el queroseno. Esto puede resultar en una menor selectividad o un proceso más lento.

Viscosidad: Algunos líquidos extractantes no inflamables pueden tener una viscosidad mayor que los líquidos inflamables como el queroseno, lo que dificulta el flujo del solvente a través del sistema de extracción y puede hacer que el proceso sea menos eficiente (Pradhan & Mishra, 2020).

Costos y disponibilidad: Los líquidos extractantes no inflamables suelen ser más caros y menos accesibles que los líquidos inflamables como el queroseno, que se encuentran fácilmente disponibles y son más económicos. Esto aumenta los costos operativos de los procesos que requieren estos líquidos no inflamables (Pradhan & Mishra, 2020).

Riesgos operativos: Aunque los líquidos no inflamables tienen la ventaja de ser menos peligrosos en términos de inflamabilidad, algunos pueden ser más corrosivos o tóxicos, lo que plantea riesgos para la seguridad en términos de exposición a vapores o contacto directo, además de requerir materiales más costosos para los equipos de extracción (Pradhan & Mishra, 2020).

Existen alternativas al queroseno como líquidos extractantes, cada uno tiene sus propias ventajas y desventajas, y la elección del solvente dependerá de los requisitos específicos del proceso, como la selectividad, la eficiencia, la seguridad y los costos operativos.

4.1.4 Breve descripción del proceso EW

El proceso de electrodeposición o Electrowinning (EW) es una técnica clave en la metalurgia para la recuperación de metales, especialmente en la industria del cobre. Este proceso se utiliza después de la lixiviación, donde los iones metálicos disueltos en la solución se recuperan mediante un proceso electroquímico. En el caso del cobre, la solución que contiene los iones de cobre se introduce en una celda electrolítica, donde una

corriente eléctrica se aplica a través de electrodos, lo que provoca que el cobre se deposite en el cátodo (Rydberg et al., 2004).

La eficacia del proceso de electrowinning (EW) está influenciada por varios factores, tales como la densidad de corriente, la temperatura, la composición de la solución y el tiempo de electrólisis. Optimizar estos parámetros permite mejorar la recuperación del metal y reducir la generación de subproductos indeseables. Además, el diseño adecuado del sistema de electrólisis es crucial; los electrodos deben ser diseñados para aumentar la superficie de contacto y favorecer la transferencia de masa durante el proceso. Sanaie. (2015).

El EW es un método que ofrece varias ventajas, como la producción de cobre de alta pureza (hasta un 99.99%), lo que lo hace altamente valorado en el mercado. Este proceso es también más sostenible en comparación con los métodos tradicionales de refinación, ya que puede funcionar con una menor huella ambiental y un consumo energético más eficiente. El proceso de EW, combinado con la lixiviación, forma parte de una cadena de procesos que optimizan la recuperación de recursos, contribuyendo a la sostenibilidad en la minería.

4.2 Aspectos fundamentales del fuego

4.2.1 Combustión

La combustión es un proceso químico de oxidación rápida que libera energía en forma de calor y luz, comúnmente conocido como fuego. Este proceso ocurre cuando un combustible, generalmente en forma de gas, líquido o sólido, se mezcla con un oxidante, como el oxígeno, y se enciende en presencia de una fuente de calor o chispas. La reacción de combustión requiere una combinación de elementos, comúnmente descritos como el "triángulo de fuego": combustible, oxígeno y calor. La falta de cualquiera de estos tres elementos interrumpe el proceso de combustión, lo cual es clave en los sistemas de protección contra incendios en la industria (Williams, 2020).

Desde el enfoque termodinámico, la combustión es una reacción que libera energía térmica, incrementando la temperatura del entorno. Esta reacción puede ser completa o incompleta, dependiendo del oxígeno disponible. En una combustión completa, el combustible se oxida por completo, generando dióxido de carbono y agua. Sin embargo, en una combustión incompleta, por la falta de oxígeno, se producen subproductos como monóxido de carbono y hollín, que son perjudiciales para la salud y el medio ambiente. (Tuve 1976).

La velocidad de la combustión también es un factor determinante en su naturaleza y en la cantidad de energía liberada. La combustión puede ocurrir en forma de llamas, en fase gaseosa, o sin llama, en combustión de sólidos, como en el caso de la madera o el carbón. La intensidad de la combustión se ve influenciada por factores como la presión, la temperatura y la concentración de oxígeno en el aire. Este conocimiento permite a los ingenieros de seguridad en procesos diseñar sistemas que mitiguen los riesgos de incendios, mediante la regulación de estos parámetros (Hoffman, 2017).

En la industria, la comprensión detallada de la combustión es esencial para la gestión de riesgos y el desarrollo de sistemas de protección contra incendios. El control de la combustión en entornos industriales, especialmente en instalaciones que manejan productos químicos inflamables, es un tema crucial en el campo de la seguridad de procesos. La evaluación de estos riesgos y la implementación de estrategias de prevención son fundamentales para evitar incidentes graves y proteger tanto a los trabajadores como a las instalaciones industriales (NFPA, 2019).

4.2.2 Punto de Inflamabilidad

El punto de inflamabilidad es la temperatura más baja a la que un líquido inflamable desprende vapores suficientes para formar una mezcla inflamable con el aire cerca de su superficie. Este concepto es fundamental en la seguridad industrial, ya que permite determinar el riesgo de incendio que presenta una sustancia específica bajo ciertas condiciones de temperatura y presión. En términos prácticos, el punto de inflamabilidad

indica la temperatura mínima a la que un material puede encenderse en presencia de una fuente de ignición, como una chispa o una llama, lo cual es clave en el diseño de medidas de prevención de incendios en áreas industriales (Crowl & Louvar, 2011).

En la práctica, existen diversos métodos estandarizados para medir el punto de inflamabilidad de una sustancia, siendo los más comunes los métodos de copa abierta y de copa cerrada. En el método de copa cerrada, la muestra se calienta en un recipiente cerrado hasta alcanzar una temperatura específica, mientras que en el método de copa abierta, se permite que la muestra esté en contacto con el aire. Cada método presenta ventajas y limitaciones; sin embargo, el método de copa cerrada suele ser preferido en industrias que requieren precisión, como la petroquímica, debido a su capacidad para prevenir la evaporación del líquido y obtener una lectura más controlada (NFPA, 2020).

La importancia del punto de inflamabilidad radica en su utilidad para clasificar los líquidos inflamables y combustibles en categorías de peligrosidad, lo cual es indispensable para establecer los procedimientos de almacenamiento, manipulación y transporte de materiales peligrosos. Según la clasificación de la NFPA (National Fire Protection Association), los líquidos con un punto de inflamabilidad por debajo de 37.8°C (100°F) se consideran inflamables, mientras que aquellos con puntos superiores son considerados combustibles. Esta distinción permite a las industrias adoptar controles específicos para minimizar los riesgos de incendio en función de las características del líquido utilizado (NFPA, 2019).

En el contexto de la seguridad en plantas de extracción por solventes y procesos industriales, conocer el punto de inflamabilidad es crucial para evaluar el nivel de riesgo de incendios. Las instalaciones que manejan líquidos inflamables o combustibles deben contar con sistemas de control que mantengan los materiales bajo sus puntos de inflamabilidad para evitar la formación de vapores inflamables. Estas precauciones incluyen desde el control de la temperatura hasta la instalación de sistemas de ventilación, ya que incluso un

pequeño incremento por encima del punto de inflamabilidad puede dar lugar a situaciones de alto riesgo (Zalosh, 2003).

4.2.3 Punto de Ebullición

El punto de ebullición es la temperatura a la cual un líquido cambia a estado gaseoso, un fenómeno que ocurre cuando la presión de vapor del líquido se iguala a la presión atmosférica circundante. En condiciones normales, es decir, a una atmósfera de presión, el agua, por ejemplo, hierve a 100°C. Este concepto es fundamental en química y en el diseño de procesos industriales, ya que permite determinar las condiciones necesarias para la evaporación y condensación de sustancias, lo cual es esencial en procesos de separación y purificación (Brown et al., 2018).

Las características moleculares de una sustancia afectan directamente su punto de ebullición. Factores como el tipo de enlace y las fuerzas intermoleculares (fuerzas de Van der Waals, enlaces de hidrógeno y fuerzas dipolo-dipolo) influyen en la cantidad de energía necesaria para que las moléculas se separen y pasen al estado gaseoso. Por ejemplo, las moléculas con enlaces de hidrógeno, como el agua, tienen puntos de ebullición significativamente más altos que aquellos con fuerzas intermoleculares débiles (Silbey et al., 2004).

Además, el punto de ebullición varía con la presión atmosférica: cuando esta disminuye, como en altitudes elevadas, el punto de ebullición de los líquidos también disminuye. Este principio se aplica en muchos procesos industriales, como la destilación a vacío, donde se reducen las condiciones de presión para lograr la evaporación a temperaturas más bajas, protegiendo así componentes sensibles al calor (Perry & Green, 2007). En el ámbito de la extracción y procesamiento de minerales, estos principios ayudan a optimizar las condiciones de los procesos de evaporación y separación.

El conocimiento del punto de ebullición y su relación con la presión es también fundamental en la ingeniería de seguridad, ya que muchas sustancias peligrosas presentan

riesgos de inflamación o explosión al alcanzar su punto de ebullición en ciertas condiciones de presión y temperatura. En este sentido, el control preciso de las condiciones operativas y el conocimiento detallado de los puntos de ebullición de los solventes utilizados son esenciales para diseñar sistemas seguros y eficientes en plantas de extracción por solventes y otras operaciones industriales (Coulson & Richardson, 2002).

4.2.4 Presión de Vapor

La presión de vapor es la presión ejercida por un vapor en equilibrio con su fase líquida o sólida en un sistema cerrado a una temperatura constante. Este fenómeno ocurre cuando las moléculas en el líquido adquieren suficiente energía cinética para superar las fuerzas de cohesión y pasar a estado gaseoso. A medida que la temperatura aumenta, la energía cinética de las moléculas también lo hace, lo que provoca un incremento en la presión de vapor (Tuve. 1976).

La presión de vapor de una sustancia depende de la temperatura y de la naturaleza del líquido. Los líquidos con fuerzas intermoleculares más débiles, como las fuerzas de Van der Waals, suelen tener una presión de vapor más alta y tienden a evaporarse rápidamente a temperaturas más bajas. En cambio, los líquidos con enlaces fuertes, como los enlaces de hidrógeno en el agua, tienen presiones de vapor más bajas y, por tanto, requieren más calor para la vaporización (Silbey, Alberty & Bawendi, 2004).

En el campo industrial, la presión de vapor es un factor clave en procesos como la destilación y la extracción. En la destilación, se aprovecha la diferencia en la presión de vapor de los componentes de una mezcla para separarlos de manera eficiente. Por otro lado, en la extracción por solventes, un proceso común en la industria minera y de procesamiento de metales, el control de la presión de vapor es esencial para asegurar que el solvente se evapore y se recupere correctamente en cada etapa del proceso (Coulson & Richardson, 2002).

Desde el punto de vista de la seguridad industrial, la presión de vapor tiene implicaciones críticas. En presencia de presión y temperatura adecuadas, los vapores generados pueden acumularse y, en combinación con una fuente de ignición, provocar incendios o explosiones, especialmente en el manejo de solventes volátiles. Por esta razón, el monitoreo y el control de la presión de vapor son fundamentales para la prevención de riesgos en plantas de extracción de solventes y otros entornos de procesos químicos (Crowl & Louvar, 2011).

4.2.5 Química del fuego

La química del fuego se refiere al estudio de los procesos químicos que ocurren durante la combustión, un fenómeno que resulta de una reacción entre un combustible y un oxidante, generalmente oxígeno. La combustión es una reacción exotérmica, lo que significa que libera energía en forma de calor y luz. En términos generales, la reacción de combustión puede ser simplificada como la combinación de un hidrocarburo con oxígeno para formar dióxido de carbono y agua, además de liberar energía. Esta reacción se puede describir mediante la ecuación química básica:



La química del fuego involucra varios aspectos, como la formación de productos intermedios, la propagación de la llama y los mecanismos de extingüimiento. Un concepto clave en la química del fuego es el "triángulo del fuego", que describe los tres elementos necesarios para que ocurra la combustión: el combustible, el oxidante y la energía de activación. La eliminación de cualquiera de estos componentes puede interrumpir el proceso de combustión, lo que es fundamental en las estrategias de prevención y control de incendios (Drysdale, 1999).

La química del fuego también abarca el estudio de los diferentes tipos de combustión, que incluyen la combustión completa e incompleta. En la combustión completa, el combustible se quema completamente, produciendo dióxido de carbono y agua. En

contraste, la combustión incompleta ocurre cuando hay una cantidad insuficiente de oxígeno, lo que puede resultar en la producción de monóxido de carbono, hollín y otros compuestos tóxicos. Esta diferencia no solo afecta la eficiencia del proceso de combustión, sino que también tiene implicaciones en la calidad del aire y la seguridad, ya que los productos de la combustión incompleta son perjudiciales para la salud (Krause, 2001).

La química del fuego se aplica en áreas como la ingeniería química y la seguridad contra incendios. Comprender los procesos de combustión permite diseñar sistemas de prevención más efectivos y desarrollar combustibles más eficientes. Además, estudiar los mecanismos de ignición y propagación de llamas es clave para mejorar la seguridad en plantas industriales y edificios. (Tuve, 1976)

4.2.6 Tetraedro del fuego

El tetraedro del fuego es un modelo que representa los cuatro elementos esenciales necesarios para que se produzca y mantenga un incendio: combustible, oxidante, energía de activación y reacciones en cadena. Este modelo amplía el concepto tradicional del triángulo del fuego, que solo considera el combustible, el oxidante y la energía de activación. La inclusión de las reacciones en cadena subraya la importancia de las reacciones químicas que ocurren durante la combustión y cómo estas pueden perpetuar el proceso de fuego una vez que se ha iniciado (Chow, 2015).

El combustible puede ser cualquier sustancia que tenga la capacidad de arder, como la madera, el papel, la gasolina o los gases. El oxidante, generalmente el oxígeno presente en el aire es esencial para que el combustible pueda reaccionar y liberar energía. La energía de activación es la cantidad mínima de energía requerida para iniciar el proceso de combustión, la cual puede ser suministrada por una chispa, una llama o una fuente de calor intensa. Si alguno de estos elementos falta, el fuego no puede generarse ni mantenerse. Además, las reacciones en cadena que ocurren durante la combustión liberan energía adicional, asegurando que el fuego permanezca activo. (Tuve, 1976).

El tetraedro del fuego tiene aplicaciones prácticas en la seguridad contra incendios y en la ingeniería. Comprender cómo interactúan estos cuatro elementos permite a los ingenieros y especialistas en seguridad desarrollar estrategias efectivas para prevenir y controlar incendios. Por ejemplo, la eliminación de uno de los componentes del tetraedro ya sea mediante la eliminación del combustible, el aislamiento del oxidante, el enfriamiento para reducir la energía de activación o la interrupción de las reacciones en cadena, es esencial para extinguir un fuego (Marsh & Evans, 2005).

Además, el tetraedro del fuego también ayuda a los profesionales a evaluar el riesgo de incendio en diferentes entornos, como plantas industriales, edificios comerciales y residencias. Este modelo se utiliza en la formulación de políticas de prevención de incendios y en la capacitación de personal para responder a situaciones de emergencia, asegurando que se apliquen métodos basados en principios científicos para manejar el fuego de manera segura y efectiva (Krause, 2001).

4.3 Teoría de extinción de incendios

La teoría de extinción de incendios es fundamental para la investigación de un riesgo de incendio, esto proporciona el marco necesario para comprender los principios detrás de los sistemas de protección contra incendios empleados en las plantas de extracción por solventes (SX). Determinar cómo funcionan las diferentes técnicas de extinción, como los sistemas de espuma, rociadores y agentes químicos, es crucial para evaluar su efectividad en la mitigación de riesgos en un entorno industrial tan sensible. Al conocer las teorías que sustentan la extinción de incendios, se puede diseñar y adaptar estrategias de protección más eficientes, alineadas con las normativas internacionales, mejorando la seguridad operativa y reduciendo el impacto de un posible incendio en la planta SX.

4.3.1 Formas de extinción del fuego

Identificar los métodos más efectivos para controlar incendios en plantas de extracción por solventes (SX) es de crucial importancia. Conocer las diferentes técnicas, como la

espuma, los rociadores o agentes químicos, ayuda a diseñar sistemas de protección adecuados que puedan mitigar los riesgos en un entorno industrial de alta peligrosidad, mejorando así la seguridad y reduciendo posibles daños.

Las formas de extinción del fuego pueden ser entendidas en el contexto del tetraedro del fuego, que postula que un incendio se mantiene gracias a la interacción de cuatro elementos: combustible, oxidante, energía de activación y reacciones en cadena. Para extinguir un fuego, es esencial eliminar al menos uno de estos elementos. Existen diversas estrategias de extinción que se pueden clasificar en métodos físicos, químicos y biológicos.

Una de las formas más comunes de extinción es la eliminación del combustible. Esto se puede lograr mediante la eliminación física de materiales inflamables o mediante la creación de cortafuegos, que son zonas libres de combustibles diseñadas para interrumpir la propagación del fuego (Marsh & Evans, 2005). La inhibición del oxidante, que generalmente es el oxígeno en el aire, se puede realizar utilizando agentes extintores, como espuma o dióxido de carbono, que desplazan o reducen la concentración de oxígeno en la zona del fuego (Chow, 2015).

Otra forma efectiva de extinguir un fuego es mediante el enfriamiento, que implica reducir la energía de activación. Esto se consigue mediante el uso de agua u otros agentes refrigerantes que absorben el calor y reducen la temperatura del combustible por debajo de su punto de ignición. Este método es comúnmente empleado en incendios de clase A, los cuales implican materiales sólidos como madera y papel. (Tuve, 1976). Por último, la interrupción de las reacciones en cadena se puede lograr mediante el uso de agentes químicos, como los extintores de polvo químico seco, que reaccionan con los radicales libres en la combustión, frenando así la propagación del fuego (Krause, 2001).

En resumen, comprender las formas de extinción del fuego a través del prisma del tetraedro del fuego es esencial para el desarrollo de técnicas eficaces de prevención y combate de incendios. La elección del método adecuado depende del tipo de incendio y de los elementos involucrados, lo que subraya la importancia de la capacitación en

seguridad contra incendios para el personal en industrias y comunidades (Marsh & Evans, 2005).

4.3.2 Extinción de incendios por eliminación de combustible

La extinción de incendios por eliminación de combustible es un método fundamental en la lucha contra el fuego, basado en el tetraedro del fuego. Esta estrategia se basa en el principio de que, para que un incendio continúe ardiendo, debe haber un suministro constante de material combustible. Al eliminar este material, se interrumpe la fuente de alimentación del fuego, lo que provoca su extinción.

Existen diversas técnicas para eliminar el combustible durante un incendio. Una de las más efectivas es la reacción de cortafuegos, que son zonas donde se retiran o reducen los combustibles naturales, como vegetación o escombros, creando un espacio que limita la propagación del fuego (Marsh & Evans, 2005). Además, la eliminación física de los materiales inflamables, como madera, papel o cualquier otro tipo de combustible, puede ser crucial, especialmente en entornos industriales donde los materiales combustibles son abundantes (Chow, 2015).

Es importante señalar que la eliminación de combustible debe realizarse de manera segura y planificada, ya que la manipulación inadecuada de materiales puede aumentar el riesgo de ignición o provocar la propagación del fuego en direcciones no deseadas. Por lo tanto, la formación adecuada y el uso de equipos de protección personal son esenciales en estos procesos (Tuve, 1976).

4.3.3 Extinción de incendios por inhibición del oxidante

La extinción de incendios por inhibición del oxidante se basa en la reducción de la concentración de los oxidantes, principalmente el oxígeno, en el entorno del fuego. Este método de extinción es fundamental en situaciones donde otros métodos, como la eliminación del combustible o la reducción de la temperatura, pueden no ser efectivos o viables. La inhibición del oxidante se logra a través de diversas técnicas, incluyendo el uso

de agentes químicos que desplazan o reducen el oxígeno en el área afectada (NFPA, 2023; Heskestad, 2019).

Uno de los métodos más comunes para inhibir el oxidante es la utilización de agentes extintores que contienen compuestos químicos capaces de absorber o bloquear el oxígeno. Estos agentes pueden ser gases inertes como el dióxido de carbono (CO₂) o el argón, que desplazan el oxígeno del entorno, creando una atmósfera en la que el fuego no puede sostenerse. Además, existen sistemas de supresión de incendios que utilizan neblinas o aerosoles para reducir la disponibilidad de oxígeno en la zona del incendio (Tuve 1976).

La inhibición del oxidante es especialmente efectiva en ambientes cerrados, donde la acumulación de gases puede ser controlada. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este método puede requerir un manejo cuidadoso para evitar la asfixia de personas en el área afectada, por lo que siempre se deben seguir los protocolos de seguridad adecuados. La combinación de técnicas de extinción, que incluyen la inhibición del oxidante, contribuye a un enfoque integral para la gestión y control de incendios (NFPA, 2023).

4.3.4 Extinción de incendios por enfriamiento

La extinción de incendios por enfriamiento es un método fundamental en la lucha contra el fuego, que se basa en reducir la temperatura del material inflamable por debajo de su punto de ignición. Este proceso se logra generalmente mediante la aplicación de agua u otros agentes refrigerantes que absorben el calor del fuego, interrumpiendo así la reacción en cadena que sostiene la combustión (Heskestad, 2019; NFPA, 2023).

El agua es el agente extintor más utilizado debido a su alta capacidad para absorber calor, lo que ayuda a reducir la temperatura en la zona afectada. Al aplicarse en un incendio, se convierte en vapor, lo que también contribuye a desplazar el oxígeno, ayudando a extinguir el fuego. Este método es especialmente eficaz en incendios de clase A, que involucran materiales sólidos como madera, papel y telas. (Tuve, 1976).

Es importante tener en cuenta que el enfriamiento puede no ser efectivo en todos los tipos de incendios. Por ejemplo, en incendios de líquidos inflamables (clase B) o en incendios eléctricos, el uso de agua puede ser peligroso, ya que podría propagar el fuego o causar electrocución. Por lo tanto, es crucial evaluar el tipo de fuego antes de aplicar métodos de enfriamiento, y, en su caso, utilizar agentes específicos diseñados para esos tipos de incendios (NFPA, 2023).

4.3.5 Extinción de incendios por interrupción de la reacción en cadena

La extinción de incendios por interrupción de la reacción en cadena se basa en el principio de romper la secuencia de reacciones químicas que mantiene el fuego activo. Durante un incendio, los radicales libres, como el hidrógeno y el oxígeno, se liberan en grandes cantidades, perpetuando la combustión. Para detener este proceso, se utilizan agentes químicos que interfieren en estas reacciones, neutralizando los radicales libres y evitando que se forme más calor y llamas (Rydberg et al., 2004). Algunos de los agentes más utilizados para este tipo de extinción incluyen:

Halones y agentes limpios: Estos compuestos químicos fueron ampliamente usados debido a su eficacia para interrumpir la reacción en cadena sin dejar residuos. Sin embargo, los halones han sido restringidos por su impacto ambiental, específicamente por dañar la capa de ozono. Actualmente, se utilizan agentes alternativos como el FM-200 y el Novec 1230, que presentan menos riesgos para el medio ambiente y la salud humana (NFPA, 2023).

Polvos químicos secos: El polvo químico seco, como el fosfato monoamónico, también es efectivo para este propósito. Actúa al interferir en la reacción química del fuego, reduciendo rápidamente la cantidad de radicales libres presentes en el proceso de combustión. Es comúnmente usado en extintores portátiles y sistemas fijos en entornos industriales (MacHunter, 2013).

Sistemas de CO₂: Aunque el dióxido de carbono se usa principalmente para sofocar el fuego al desplazar el oxígeno, también puede tener un efecto de enfriamiento y, en ciertos casos, interferir en la reacción en cadena, especialmente en incendios de líquidos inflamables.

4.4 Sistemas de extinción de incendios

Los sistemas de protección contra incendios son fundamentales para garantizar la seguridad de las personas, proteger bienes materiales y evitar daños graves en caso de incendio. Estos sistemas se dividen principalmente en dos categorías según su funcionamiento: manuales y automáticos. Los sistemas manuales requieren la intervención activa de los ocupantes o del personal encargado de operar los dispositivos de control, como extintores, mangueras y alarmas. En contraste, los sistemas automáticos están diseñados para detectar y combatir incendios de manera autónoma, como los sistemas de rociadores, alarmas de humo y sistemas de supresión de incendios, que se activan sin intervención humana directa.

Además, los sistemas de protección contra incendios pueden clasificarse según su naturaleza en pasivos o activos. Los sistemas pasivos están destinados a prevenir la propagación del fuego y el humo dentro de un edificio, mediante la implementación de materiales resistentes al fuego, compartimentos resistentes y estructuras que limitan el avance del incendio, como puertas cortafuego, paredes y techos resistentes al fuego. Por otro lado, los sistemas activos son aquellos que se activan o intervienen directamente en la detección, control o extinción del fuego, como los sistemas de rociadores automáticos, los sistemas de alarma y los sistemas de supresión por gas.

La combinación de sistemas manuales, automáticos, pasivos y activos es esencial para la creación de un entorno seguro y la protección efectiva frente a los riesgos de incendio, minimizando el impacto de los siniestros y asegurando la seguridad de las personas y las instalaciones.

4.4.1 Sistemas manuales de extinción contra incendios

Los sistemas manuales de extinción contra incendios son aquellos que permiten que el personal intervenga rápidamente antes de que el fuego se propague. Estos sistemas incluyen dispositivos como extintores portátiles, hidrantes con mangueras. Cada uno de estos dispositivos tiene características específicas que los hacen adecuados para diferentes tipos de fuegos. Por ejemplo, los extintores portátiles están diseñados para ser utilizados en fuegos incipientes y vienen con distintos agentes extintores, como agua, polvo químico seco, dióxido de carbono (CO₂) y espuma, los cuales se seleccionan según la clase de fuego (National Fire Protection Association [NFPA], 2022).

Los hidrantes y mangueras contra incendios son fundamentales en instalaciones industriales, especialmente en aquellas con riesgos elevados como las plantas de extracción por solventes (SX). Estos sistemas proporcionan un flujo constante de agua, permitiendo una intervención prolongada y más efectiva, especialmente en áreas amplias o difíciles de alcanzar. Es esencial que el personal esté adecuadamente entrenado en su uso, ya que una respuesta incorrecta no solo podría ser ineficaz, sino también aumentar el riesgo de que el fuego se propague.

4.4.2 Sistemas automáticos de extinción contra incendios

Los sistemas automáticos de extinción contra incendios son mecanismos diseñados para detectar y combatir incendios de forma autónoma, sin la intervención humana directa. Estos sistemas son fundamentales en instalaciones industriales de alto riesgo, como las plantas de extracción por solventes (SX), donde la rapidez y efectividad en la respuesta son cruciales para evitar la propagación del fuego y minimizar los daños. Los sistemas automáticos se activan generalmente al detectar señales tempranas de incendio, como el calor, el humo o las llamas, lo que permite una respuesta inmediata y reduce significativamente el tiempo de reacción (National Fire Protection Association [NFPA], 2021).

Entre los sistemas automáticos más comunes se incluyen los rociadores automáticos, los sistemas de extinción por gas y los de espuma. Los rociadores son eficaces y de bajo costo, activándose cuando la temperatura supera un umbral específico. Los sistemas de gas, como los que utilizan dióxido de carbono (CO₂), son preferidos en áreas sensibles donde el agua podría dañar equipos o generar reacciones no deseadas, funcionando al desplazar el oxígeno y sofocar el fuego rápidamente. (National Fire Protection Association [NFPA], 2020)

Los sistemas de espuma son efectivos para combatir incendios en áreas con líquidos inflamables, como en muchas plantas SX. La espuma forma una capa sobre el líquido, impidiendo que el oxígeno avive el fuego y facilitando su extinción. La elección del sistema automático adecuado depende del tipo de riesgo y materiales combustibles presentes. La correcta implementación, junto con el mantenimiento y las pruebas periódicas, es esencial para garantizar su funcionamiento eficiente en situaciones de emergencia. (FM)

4.4.3 Sistema de extinción por espuma

Los sistemas de extinción por espuma son una de las tecnologías más efectivas para combatir incendios en áreas donde existen riesgos asociados a líquidos inflamables y combustibles, como en las plantas de extracción por solventes (SX). La espuma utilizada en estos sistemas es una mezcla de agua, un agente espumante y aire, que al ser aplicada sobre un incendio, forma una capa densa y estable que cubre la superficie del líquido en llamas. Esta capa de espuma sirve para aislar el oxígeno, enfriar el combustible y suprimir los vapores inflamables, lo que contribuye a sofocar el incendio y prevenir su reencendido (National Fire Protection Association [NFPA], 2022).

Existen diferentes tipos de espuma contra incendios, cada una diseñada para abordar distintos escenarios y tipos de incendios. Las más comunes son la espuma de baja expansión, la de media expansión y la de alta expansión. La espuma de baja expansión es la más utilizada en aplicaciones generales y es eficaz para extinguir incendios en líquidos inflamables. La espuma de alta expansión, por otro lado, es ideal para incendios en

espacios confinados, como bodegas o almacenes, ya que puede cubrir grandes volúmenes rápidamente con un bajo consumo de agua (Gómez & Torres, 2021).

La implementación de sistemas de extinción por espuma incluye métodos como rociadores de espuma, cámaras para tanques y monitores móviles, que pueden activarse automática o manualmente según el diseño. Estos sistemas son especialmente útiles en áreas de alto riesgo con líquidos inflamables. Su efectividad depende de una instalación adecuada, mantenimiento regular y el uso de agentes espumantes compatibles con los productos químicos presentes en la instalación. (National Fire Protection Association [NFPA], 2020) La capacidad de estos sistemas para sofocar incendios rápidamente los hace una opción preferida en instalaciones industriales donde la seguridad es prioritaria.

4.5 Documentación referente en protección contra incendios

Los siguientes documentos son considerados por su importancia, acorde a la entidad que se asocia.

4.5.1 National Fire Protection

De esta entidad se toman en cuenta los siguientes documentos.

A. NFPA 30

La NFPA 30, titulada *Flammable and Combustible Liquids Code*, es un estándar desarrollado por la National Fire Protection Association (NFPA) que establece los requisitos mínimos para el manejo, almacenamiento y uso de líquidos inflamables y combustibles. Este código proporciona directrices para reducir el riesgo de incendios y explosiones en instalaciones industriales y comerciales donde se manipulan líquidos peligrosos. La normativa cubre aspectos relacionados con el diseño de instalaciones, almacenamiento en tanques, sistemas de tuberías, equipos de protección contra incendios y medidas de seguridad operativa.

B. NFPA 11

La NFPA 11, titulada *Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam*, es un estándar desarrollado por la National Fire Protection Association que detalla los requisitos para el diseño, instalación y mantenimiento de sistemas de espuma contra incendios. Este estándar abarca desde el uso de espumas de baja expansión (espuma ligera) hasta las de expansión media y alta, proporcionando directrices para el control y supresión de incendios que involucren líquidos inflamables y combustibles. Es comúnmente aplicado en áreas donde se almacenan y procesan grandes volúmenes de líquidos inflamables, como plantas de almacenamiento de combustible y refinerías.

C. NFPA 551

La NFPA 551, titulada *Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments*, es una guía desarrollada por la National Fire Protection Association que proporciona criterios y métodos para evaluar los análisis de riesgo de incendio. Esta norma no describe cómo realizar una evaluación de riesgos, sino que ofrece un marco para la revisión crítica y la evaluación de las evaluaciones realizadas. Es utilizada para ayudar a los profesionales a garantizar que sus análisis de riesgo sean adecuados, bien estructurados y proporcionen la información necesaria para la toma de decisiones en el diseño de medidas de seguridad contra incendios.

D. NFPA 122

La NFPA 122, titulada *Standard for Fire Prevention and Control in Metal/Nonmetal Mining and Metal Mineral Processing Facilities*, es una norma que proporciona directrices de seguridad contra incendios para instalaciones mineras de metales y plantas de procesamiento de minerales no metálicos. Esta norma cubre tanto la prevención de incendios como los sistemas de protección específicos para estas instalaciones, incluyendo medidas para proteger a los trabajadores y minimizar el impacto de los incendios en las

operaciones. Es fundamental en la industria minera para garantizar la seguridad de los procesos y la infraestructura.

E. Factory Mutual

Factory Mutual (actualmente conocido como FM Global) es una organización estadounidense de seguros mutuos y servicios de ingeniería especializada en protección contra pérdidas. Se centra en la prevención de riesgos industriales, incluidos incendios, explosiones y otros tipos de pérdidas en plantas industriales, almacenes y edificios comerciales. FM Global proporciona análisis de riesgo, pruebas de productos y estándares de seguridad que son ampliamente utilizados en diversas industrias, especialmente en procesos químicos y de extracción de minerales, como la extracción por solventes en la industria del cobre.

5. Metodología de Evaluación

De acuerdo a lo sugerido por la guía NFPA 551, y el Handbook of Fire Protection Engineering de la SFPE, se han considerado las siguientes etapas para el desarrollo de la evaluación de los riesgos de incendio y/o explosión:

- Establecer los alcances y objetivos de estudio de riesgos.
- Identificar los peligros asociados a un incendio y/o explosión.
- Evaluar la probabilidad de un incendio.
- Evaluar la severidad de un incendio.
- Determinar el nivel de riesgo de incendio. Expresarlo en una matriz de riesgo inicial.
- Determinar las necesidades de protección contra incendio que permitan reducir el riesgo.

La realización del presente estudio de riesgo se basa en el siguiente esquema:

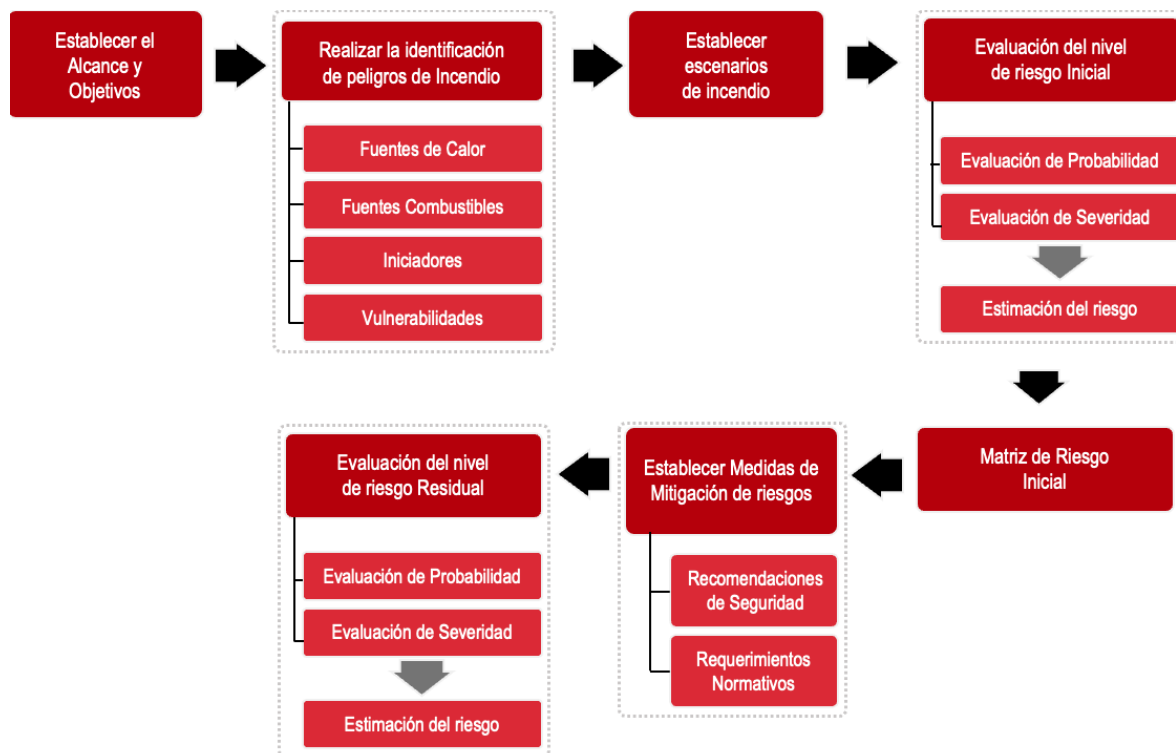


Figura 4. Esquema de evaluación según metodología NFPA

5.1 Evaluación de peligros

En esta etapa se realiza la identificación de peligros que se considerarán para la identificación de los escenarios de incendio. Parte de esta etapa consiste en realizar la identificación de los siguientes peligros:

- a) **Fuentes de calor:** Es cualquier elemento o proceso que tiene el potencial de iniciar un incendio al proporcionar la energía térmica necesaria para encender un material combustible. motores sobrecalentados, y superficies calientes que puedes ser normales del propio proceso, entre otros.
- b) **Fuentes combustibles:** Son materiales que pueden arder al entrar en contacto con una fuente de calor. Estos materiales proporcionan el combustible necesario para que el fuego se inicie y se propague. Las fuentes combustibles pueden incluir sólidos como madera, papel, textiles, plásticos, y metales; así como líquidos inflamables como gasolina, alcoholes y solventes; y gases inflamables como propano, butano y gas natural.
- c) **Iniciadores:** Es el evento o elemento específico que da comienzo al incendio. El iniciador es el "detonante" que, al interactuar con la fuente de calor y el material combustible, desencadena el fuego.
- d) **Vulnerabilidades:** La vulnerabilidad en el contexto de peligros de incendio se refiere a la susceptibilidad de un lugar, estructura, persona o sistema a sufrir daños significativos. Esta vulnerabilidad depende de varios factores, como las características del entorno, las capacidades de respuesta y las condiciones sociales y humanas. Factores como la falta de preparación, el entrenamiento insuficiente del personal, la escasez de recursos para combatir incendios, la presencia de personas en áreas de alto riesgo, y la falta de conocimiento sobre medidas de prevención pueden aumentar considerablemente los efectos devastadores de un incendio.

La metodología para la identificación de peligros en este estudio se basará en la revisión documentaria, que incluirá la identificación de los peligros inherentes al proceso de extracción por solventes (SX) y el análisis de la data histórica de incidentes previos. La revisión de la documentación técnica, como las descripciones del proceso y los informes de incidentes anteriores, permitirá identificar los riesgos más comunes asociados a la manipulación de materiales inflamables, reacciones químicas y fallas en los sistemas de seguridad. Además, se considerarán los datos históricos de accidentes y eventos de incendio en plantas similares, lo que proporcionará una visión más amplia sobre la probabilidad y las consecuencias de los peligros presentes en el proceso SX. Esta información será esencial para evaluar de manera cualitativa los riesgos y para apoyar las recomendaciones de mejora en las estrategias de protección.

5.2 Evaluación de escenarios de incendio

La identificación de escenarios de incendio es el proceso de analizar y prever posibles situaciones en las que un incendio podría ocurrir, basándose en la identificación de peligros identificados. Estos peligros incluyen fuentes combustibles (materiales que pueden arder), fuentes de calor (elementos o procesos que pueden iniciar la combustión) y vulnerabilidades (factores que aumentan la susceptibilidad de un lugar o sistema a sufrir daños en caso de incendio). Al identificar y evaluar estos elementos, se pueden crear escenarios detallados que permiten evaluarlas en zonas específicas dentro del alcance.

5.2.1 Escenarios tipo clúster

La agrupación de escenarios en clústeres se refiere a la organización de diversos escenarios de incendio en grupos o categorías similares basadas en características comunes. Esto se realiza debido a que existen muchos escenarios los cuales se repiten. En estos clústeres se forman teniendo en cuenta factores como:

- **Tipo de fuente de calor:** Escenarios donde los incendios son iniciados por fuentes de calor similares, como equipos eléctricos, llamas abiertas, o fricción.

- **Equipos de procesos:** Son escenarios con la misma consecuencia que se repite en equipo que no necesariamente comparten un espacio en común. Por ejemplo: tanques de combustibles en distintas ubicaciones dentro de un predio.
- **Área de procesos:** Son escenarios con la misma consecuencia que se repite dentro de un área en específico
- **Tipo de fuente combustible:** Escenarios donde los incendios involucran materiales combustibles similares, como maderas, plásticos, o líquidos inflamables.
- **Vulnerabilidades específicas:** Escenarios que presentan vulnerabilidades comunes, como falta de sistemas de detección, diseño de edificio que facilita la propagación del fuego, o carencia de medidas de seguridad

Agrupar los escenarios en clústeres permite identificar patrones y tendencias comunes en los riesgos de incendio. Esto facilita el desarrollo de la clasificación del peligro, el establecimiento de las medidas de control más eficientes y específicas para cada tipo de riesgo identificado, mejorando así la capacidad de manejo y reducción de riesgos en distintas áreas o procesos.

5.3 Evaluación de la probabilidad

La probabilidad de incendio se refiere a la medida de la posibilidad de que ocurra un incendio en un área específica durante un período de tiempo determinado. Esta probabilidad se determina mediante la evaluación de una serie de factores, que pueden incluir condiciones climáticas, tipo de vegetación, nivel de humedad, historia de incendios pasados y actividades humanas. Esta información es crucial para la planificación de la prevención y respuesta a incendios, así como para la asignación de recursos para combatir incendios y proteger las comunidades.

La probabilidad de incendio puede variar significativamente según las actividades y las condiciones del local en cuestión. Las actividades humanas dentro del proceso productivo también tienen un papel importante en la determinación de la probabilidad. Se determinará

el nivel de probabilidad de incendio por el tipo de área agrupados por Clústeres y la estadística de ocurrencia de incendio en el proceso

La probabilidad de ocurrencia de un incendio será evaluada en función a la siguiente escala de probabilidad. Esta escala es la recomendada bajo la metodología de la NFPA 551 para escenarios de incendio y/o explosión compara la ocurrencia, con eventos pasados registrados en la industria.

Tabla 1. Tabla de evaluación de probabilidad según metodología NFPA. Fuente: Adaptado de la NFPA 551 Edición 2022 Table A.5.2.5(a)

CLASIFICACIÓN		DEFINICIÓN
A	Frecuente	Situación que ocurre frecuentemente, experimentada.
B	Probable	Situación que ocurre repetidas veces durante la vida del sistema.
C	Ocasional	Situación poco probable de ocurrencia en los sistemas operativos analizados.
D	Remoto	Situación tan improbable que el peligro se asume no ser experimentado durante la vida del sistema.
E	Improbable	La probabilidad de ocurrencia de la situación analizada no se distingue de cero.

5.4 Evaluación de la severidad

El análisis de la severidad de eventos de incendio será calculado en la mayoría de los casos de forma cualitativa, mediante la utilización de un sistema de escalas que evaluará factores específicos de cada escenario cuya existencia o inexistencia puedan hacer que la severidad del evento sea de menor o mayor relevancia. Basado en ello, según la naturaleza de los escenarios de incendio, se establecen factores tales como la evacuación existente, los sistemas de extinción, y el sistema de detección y alarma. Cada factor será evaluado según niveles para determinar un nivel de criticidad expresado en una matriz de evaluación

de severidad. Una vez definido el nivel de criticidad para cada factor se realizará una clasificación de la severidad según la siguiente tabla:

Tabla 2. Tabla de evaluación de severidad según metodología NFPA. Fuente: Adaptado de la NFPA 551 Edición 2022 Table A.5.2.5(b)

CLASIFICACIÓN		DEFINICIÓN
IV	Catastrófico	El fuego/explosión producirá la muerte o múltiples muertes o lesiones significativas, o el impacto en las operaciones será desastroso, resultando en una parada parcial o total permanente de las operaciones. Las instalaciones cesarán de operar de forma inmediata después del incendio/explosión ocurrida. El fuego/explosión puede causar significativo daño irreversible al ambiente.
III	Crítico	La pérdida tendrá un impacto significativo en las instalaciones, que de repente tendrán que suspenderse las operaciones. Inversiones monetarias significativas serán necesarias para restablecer el funcionamiento de las operaciones. Lesiones sobre el personal, incluso la muerte, pueden ser resultado del evento. El fuego/explosión puede causar significativo daño reversible al ambiente.
II	Marginal	La pérdida tendrá un impacto sobre las facilidades, con probable suspensión de las operaciones por un período corto. Inversiones monetarias de menor escala serán necesarias para restablecer el funcionamiento de las operaciones. El fuego/explosión puede causar un daño ambiental localizado.
I	Insignificante	El impacto de pérdida será tan bajo que no provocará ningún efecto discernible en las facilidades, sus operaciones o el medio ambiente.

5.5 Evaluación del riesgo

El riesgo se define como la combinación de probabilidad y severidad de acuerdo a la siguiente fórmula. Una vez clasificado la severidad y la probabilidad de ocurrencia de un incendio se determina el nivel de riesgo para posteriormente expresarlo en la matriz de riesgo: **Riesgo (R) = Probabilidad (P)×Severidad (S)**.

La evaluación de riesgos se clasifica según el nivel de probabilidad y severidad como se muestra en la siguiente tabla. Los riesgos que figuran en los cuadros de color **VERDE** califican como riesgos bajos (leves), los de color **NARANJA** califican como riesgos moderados y los riesgos en color **ROJO** califican como riesgos Altos.

Tabla 3. Tabla de evaluación de nivel de riesgo según metodología NFPA. Fuente: Adaptado de la NFPA 551 Edición 2022 Table A.5.2.5(b)

CATEGORÍAS DE PROBABILIDAD		CATEGORÍAS DE SEVERIDAD			
		(1)	(2)	(3)	(4)
		INSIGNIFICANTE	MARGINAL	CRÍTICO	CATASTRÓFICO
5	FRECUENTE	IA	IIA	IIIA	IVA
4	PROBABLE	IB	IIB	IIIB	IVB
3	OCASIONAL	IC	IIC	IIIC	IVC
2	REMOTO	ID	IID	IIID	IVD
1	IMPROBABLE	IE	IIE	IIIE	IVE

6. Resultados

6.1 Resultado de evaluación del nivel de riesgo

La evaluación del nivel de riesgo de incendio en un sistema de extracción por solventes es crucial para garantizar la seguridad en instalaciones industriales, pues estos sistemas operan con sustancias químicas o solventes inflamables y cualquier fallo en la prevención o control de incendios puede generar consecuencias graves, tanto para las personas como para los activos de la empresa. Es por esto que los resultados de este trabajo empiezan con la identificación precisa de los riesgos; pues esto permitirá implementar medidas de seguridad adecuadas que reduzcan la probabilidad de incidentes y sus posibles impactos. El segundo componente importante es la correcta evaluación del riesgo de incendio, dado que no solo es esencial para proteger a los empleados y la infraestructura, sino también para cumplir con normativas y regulaciones de seguridad; y así de este modo crear un entorno laboral seguro y la preservación de la integridad de las instalaciones.

6.2 Identificación de peligros inherentes al proceso

Estos que siguen a continuación son los más importantes.

6.2.1 Fuentes de calor

En el proceso de los sedimentadores (*settlers*) dentro de una planta SX (extracción por solventes), las fuentes de calor que podrían contribuir a un incendio o a la generación de condiciones de riesgo son diversas y dependen de factores operativos y ambientales. A continuación, se mencionan las principales fuentes de calor a identificar en el proceso.

Reacciones químicas exotérmicas: Durante las etapas de extracción y reextracción, pueden ocurrir reacciones químicas exotérmicas entre el solvente, los reactivos y los metales, liberando calor. Esto se acentúa si hay presencia de oxidación o reacciones no controladas.

Fricción y movimiento mecánico: Las bombas, agitadores y otros equipos mecánicos pueden generar calor por fricción. Componentes mal mantenidos, como rodamientos desgastados o desalineaciones, pueden producir chispas o calor localizado.

Descargas eléctricas: Equipos eléctricos, como motores, generadores o cables en mal estado, pueden generar calor por sobrecarga, cortocircuitos o arcos eléctricos. Las zonas clasificadas como peligrosas deben cumplir con equipos que cuenten con estándares antichispas.

Superficies calientes: Tuberías o tanques que conducen fluidos calientes, como soluciones lixiviantes, pueden actuar como fuentes de calor. El contacto accidental con solventes inflamables podría iniciar un incendio.

Chispas por impactos metálicos: Las operaciones de mantenimiento que involucran golpes o herramientas metálicas en áreas cercanas a solventes pueden generar chispas.

Radiación térmica ambiental: En climas cálidos o plantas con techos metálicos, el calor ambiental puede acumularse, especialmente en áreas poco ventiladas. Esto puede aumentar la temperatura de los solventes o vapores inflamables hasta alcanzar su *flash point*.

Operaciones de soldadura o corte: Trabajos en caliente, como soldadura o esmerilado, son una fuente directa de chispas y calor. Deben ser estrictamente controlados con permisos de trabajo en caliente.

6.2.2 Contribuyentes

Los peligros relacionados con materiales combustibles son críticos, ya que esta etapa involucra el uso de solventes orgánicos inflamables. Los principales contribuyentes de riesgo identificados en procesos de extracción por solventes se mencionan a continuación:

Solventes orgánicos inflamables: Los solventes utilizados en SX son generalmente hidrocarburos orgánicos (como queroseno o diluyentes específicos) mezclados con reactivos extractantes. Los peligros asociados al uso de estos solventes son:

- Su punto de inflamación bajo: muchos solventes tienen puntos de inflamación entre 40 y 65°C, lo que los hace inflamables en condiciones de operación normales; la generación de vapor en líquidos inflamables depende de factores como la temperatura, la presión y las propiedades químicas del líquido. Estos líquidos, definidos como aquellos con un punto de inflamación menor a 37.8°C (100°F), emiten vapores que, al mezclarse con aire dentro de su rango de inflamabilidad, pueden formar mezclas explosivas. Este rango se encuentra entre los límites explosivos inferior (LEL) y superior (UEL), que representan las concentraciones mínima y máxima de vapor en el aire capaces de soportar la combustión (Oklahoma State University Environmental Health and Safety).
- El vapor generado aumenta con la temperatura, ya que más moléculas adquieren suficiente energía para superar las fuerzas intermoleculares y pasar al estado gaseoso. Este proceso está influido por la presión de vapor del líquido, que varía entre sustancias (University of Maryland Environmental Safety, Sustainability and Risk). En aplicaciones prácticas, como laboratorios o plantas industriales, se deben tomar medidas para evitar acumulaciones peligrosas de vapores. Estas incluyen trabajar bajo ventilación adecuada, almacenar líquidos inflamables en recipientes certificados y mantenerlos alejados de fuentes de ignición. Los vapores inflamables, al ser generalmente más densos que el aire, tienden a acumularse cerca del suelo y pueden desplazarse hasta alcanzar una fuente de ignición distante (Oklahoma State University Environmental Health and Safety).
- Los depósitos de residuos orgánicos y escorias impregnadas tales como trapos, absorbentes, o residuos impregnados con solventes pueden acumularse en áreas de trabajo. Estos representan el peligro de autoignición debido a oxidación lenta en residuos confinados. Facilitan la propagación de incendios en caso de una ignición inicial.

6.3 Identificación de escenarios de incendio

En el proceso de extracción por solventes (SX) descrito, existen varios puntos críticos donde podrían ocurrir incendios, aunque no todos sean igualmente probables. Los incendios en estos sistemas podrían ser provocados por varios factores como reacciones químicas, calor, interacción de sustancias inflamables o fallos operacionales. A continuación, se muestran las áreas donde podrían surgir estos escenarios, en base en las operaciones que suceden en un proceso de extracción por solventes:

6.3.1 Escenario de incendio en mezcladores-decantadores de extracción

El orgánico utilizado en la extracción por solvente es generalmente un solvente inflamable, y en las etapas de extracción como E1 y E2, el orgánico se mezcla con las soluciones acuosas, creando emulsiones. Si las condiciones no son controladas adecuadamente, como la temperatura o la presencia de fuentes de ignición, podrían generarse vapor inflamable o incluso mezclas inflamables que podrían encenderse.

6.3.2 Escenario de incendio en tanque orgánico cargado

El orgánico cargado, que es una mezcla de solventes, circula a través de tuberías y tanques. Si hay fugas o derrames, el líquido inflamable podría entrar en contacto con una fuente de calor (como un equipo eléctrico defectuoso o sobrecalentado) o con una chispa.

6.3.3 Escenario de incendio en la fase de re-extracción (S1)

Durante la re-extracción, el orgánico lavado se mezcla con electrolito gastado, y si este electrolito tiene una composición química reactiva o si las condiciones operativas generan temperaturas elevadas, podrían producirse reacciones exotérmicas. Además, si el orgánico pobre o los residuos de la fase de re-extracción se acumulan en ciertos puntos, podrían generarse focos de inflamación.

6.3.4 Escenario de incendio en el área de lavado (W1)

En el proceso de lavado, el orgánico limpio circula en presencia de agua desalinizada y otras soluciones. Si existe una acumulación de orgánico inflamable o algún residuo de

material particulado que se pueda prender, puede haber un potencial de incendio. Aunque la mezcla en la fase de lavado no es tan propensa al fuego, las fugas de orgánico pueden ser un factor de riesgo si no se gestionan correctamente.

6.3.5 Escenario de incendio en el área de electrodeposición

Si bien el proceso de electrodeposición se realiza con electrolitos, un fallo en el sistema de filtrado o en los equipos eléctricos puede generar chispas o sobrecarga térmica. Estos podrían provocar incendios si entran en contacto con los líquidos inflamables cercanos, como los solventes orgánicos de la fase de re-extracción o incluso los materiales particulados generados durante el proceso.

6.3.6 Escenario de incendio en tuberías y bombas

Las tuberías que transportan el orgánico cargado o las soluciones acuosas podrían sufrir fugas o rupturas, lo que generaría derrames de materiales inflamables. Los equipos de bombeo que trabajan con líquidos a altas presiones o temperaturas también son susceptibles a fallos mecánicos o eléctricos, lo que podría desencadenar un incendio si hay fugas de los productos inflamables.

6.3.7 Escenario de incendio en área de almacenamiento y recirculación de orgánico

Los tanques de almacenamiento de orgánico cargado o estéril (orgánico pobre) representan una zona de riesgo potencial. Si el orgánico se acumula y se expone a altas temperaturas o fuentes de ignición, el riesgo de incendio aumenta. Además, si no se realiza un adecuado mantenimiento de válvulas y sellos, podrían ocurrir fugas.

6.3.8 Escenario de incendio en el sistema de control y electricidad

Los sistemas eléctricos y de control son esenciales en todo el proceso. Un fallo eléctrico, como un cortocircuito o sobrecalentamiento de componentes, puede generar una chispa que al combinarse con vapores inflamables generaría un incendio.

6.4 Evaluación de probabilidad

La probabilidad de ocurrencia de un incendio en las operaciones de extracción por solventes (SX) está influenciada por múltiples factores que interactúan en los distintos equipos y áreas. Para evaluar esta probabilidad, es crucial considerar:

6.4.1 Datos históricos

La revisión de incidentes pasados en plantas SX, tanto internos como de la industria, permite identificar patrones en la ocurrencia de incendios. Factores como equipos involucrados, tipo de fallos y condiciones de operación son clave para establecer probabilidades basadas en experiencia previa.

La causa más común de estos siniestros fueron las fuentes de ignición por electricidad estática, fugas del material inflamables, falla en uniones o secciones de tubería. Es por ello que, se recomiendan realizar la conexión a tierra de los sistemas y uso de tuberías con revestimientos para reducir estos eventos. Chubb (2004). Sumado a ello, cabe destacar que parte de las causas que hicieron que estos incendios sean mucho más severos, fueron las deficiencias en los métodos de respuesta de incendios, la falta de un sistema de drenaje eficiente y un mal diseño conceptual de estos que impidieron que los sistemas de respuestas sean eficientes.

6.4.2 Fuentes de calor

Las fuentes de calor en una planta SX incluyen:

- Fallos eléctricos (motores, paneles, conexiones defectuosas).
- Fricción en equipos rotativos (bombas, agitadores).
- Procesos químicos exotérmicos en las fases de extracción y re-extracción.
- Exposición a calor externo (radiación solar en zonas abiertas o temperaturas ambientales extremas).

6.4.3 Factor humano

Las operaciones también están influenciadas por acciones humanas, como:

- Errores operativos en el manejo de equipos o ajustes de parámetros.
- Falla en el mantenimiento preventivo o correctivo.
- Procedimientos inadecuados en la gestión de derrames, fugas o residuos.
- Respuesta insuficiente ante condiciones anómalas que puedan generar fuentes de ignición.

En el análisis de probabilidad, se combinan estos factores para clasificar escenarios en términos de su frecuencia esperada y su relación con las condiciones específicas de cada equipo y área de operación; que servirá de base para diseñar estrategias de mitigación efectivas. El diseño del proceso, incluyendo la ubicación, estructura y disposición de los equipos, es un factor clave en la probabilidad de generación de incendios. Este aspecto no solo afecta la posibilidad de que ocurra un evento, sino también su propagación y la capacidad de responder a emergencias.

6.4.4 Proximidad entre equipos y materiales inflamables:

Si los equipos críticos (mezcladores, tanques de almacenamiento, tuberías) están demasiado cerca unos de otros o de fuentes de calor, se aumenta el riesgo de transferencia de calor y propagación de incendios. La falta de barreras físicas adecuadas entre áreas con materiales inflamables y fuentes de ignición puede elevar significativamente la probabilidad.

6.4.5 Acceso y ventilación

Un diseño que dificulte el acceso al equipo en caso de emergencia puede retrasar las respuestas y agravar incidentes menores. Sistemas de ventilación inadecuados podrían permitir la acumulación de vapores inflamables en espacios cerrados, generando una atmósfera explosiva.

6.4.6 Ubicación de los tanques de almacenamiento:

Si los tanques de orgánico (cargado o pobre) están mal ubicados, pueden actuar como fuentes críticas de combustible en caso de un incendio. Colocar tanques cerca de áreas operativas altamente activas o expuestas al calor eleva el riesgo.

6.4.7 Sistema de contención de derrames

Un diseño que no incluya sistemas eficientes de contención para derrames de solventes o líquidos inflamables podría facilitar que estos alcancen fuentes de ignición o zonas críticas.

6.4.8 Valoración de probabilidad

Con base en la clasificación presentada en la Tabla 1, se puede argumentar que la probabilidad de generación de un incendio en el proceso SX es de tipo remoto (clasificación D) por varias razones.

En primer lugar, las instalaciones de extracción por solvente están diseñadas con altos estándares de seguridad que incluyen controles operativos, sistemas de detección de fugas y procedimientos estrictos de mantenimiento preventivo. Estos controles reducen significativamente las posibilidades de que una fuente de ignición esté presente junto con la liberación de materiales inflamables. Además, el diseño de los decantadores y tanques minimiza la acumulación de vapores inflamables mediante ventilación adecuada, reduciendo así la posibilidad de formar mezclas explosivas.

En segundo lugar, aunque las fuentes de calor identificadas, como equipos eléctricos o fricción, están presentes, estas se encuentran gestionadas mediante sistemas de protección activa y pasiva. Los equipos eléctricos en áreas clasificadas están certificados como a prueba de explosiones, y los procedimientos de operación minimizan el riesgo de fricción que pudiera generar chispas. Además, las barreras estructurales, como las picket fences dentro de los decantadores, y los sistemas de monitoreo continuo de temperaturas refuerzan aún más la reducción del riesgo de que se origine un incendio.

Por último, los procedimientos operativos estándar (SOPs) y la capacitación constante del personal aseguran que las actividades humanas no introduzcan riesgos adicionales significativos. Aunque el error humano es un factor ineludible, la implementación de redundancias, como alarmas de detección temprana y simulacros regulares, actúa como mitigador del riesgo. En consecuencia, la combinación de un diseño robusto, controles técnicos efectivos y procedimientos operativos hacen que la probabilidad de un incendio en el proceso SX sea considerada como remota, en línea con la definición proporcionada en la (Tabla 1. Tabla de evaluación de probabilidad según metodología NFPA).

6.5 Evaluación de la severidad

El proceso de extracción por solventes (SX) presenta riesgos inherentes debido a la manipulación de solventes orgánicos inflamables y la presencia de equipos rotativos y eléctricos que pueden actuar como fuentes de ignición. Si bien las condiciones operativas están diseñadas para minimizar riesgos, las características del proceso, como la formación de emulsiones y el manejo de mezclas químicas, pueden generar escenarios que comprometan la seguridad. La severidad de un incidente potencial dependerá de factores como el tipo de evento, las áreas involucradas y la eficacia de las medidas de control implementadas.

Un escenario grave podría ocurrir en caso de fuga o derrame de solventes, particularmente en áreas con equipos calientes o conexiones eléctricas expuestas. Los solventes altamente volátiles pueden generar atmósferas inflamables si no se manejan adecuadamente las condiciones de ventilación. Adicionalmente, la cercanía de los tanques de almacenamiento y las áreas de mezcla podría facilitar la propagación de un incendio a lo largo del circuito de orgánicos, afectando tanto los equipos como las estructuras circundantes.

La severidad también podría verse influenciada por el diseño y disposición de los equipos. Si los sistemas de contención, las barreras físicas o los sistemas de detección y supresión de incendios no son adecuados, un incidente menor podría escalar rápidamente.

Asimismo, las condiciones operativas y el factor humano, como errores en la manipulación o fallos en el mantenimiento, pueden incrementar la magnitud de un evento.

Por último, el impacto ambiental y económico de un evento severo no debe subestimarse. Un incendio en una planta SX no solo afecta la continuidad operativa, sino que también puede liberar sustancias químicas nocivas al ambiente, comprometiendo la seguridad de los trabajadores y las comunidades cercanas. La evaluación general de severidad en este tipo de procesos destaca la importancia de mantener estándares estrictos de seguridad, inspección regular de equipos y capacitación continua del personal para mitigar riesgos.

6.5.1 Desarrollo de un incendio

Etapas de ignición

Un incendio tipo charco o *pool fire* en un decantador (settler) puede iniciarse por la presencia de una fuente de calor suficiente para encender los vapores inflamables del solvente orgánico utilizado en la planta SX. Estos vapores, que se generan debido a la baja presión de vapor del orgánico y su exposición al aire, son altamente inflamables en condiciones normales de operación. Fuentes de ignición comunes incluyen chispas eléctricas, equipos defectuosos, superficies calientes o incluso fricción mecánica. En esta etapa, el fuego comienza de manera localizada, formando una llama inicial sobre la superficie del orgánico en contacto con el aire.

Propagación Inicial del fuego

Una vez iniciado, el incendio comienza a extenderse rápidamente por la superficie del orgánico debido a su alta inflamabilidad y al amplio contacto con el aire. Dado que los *settlers* están diseñados con superficies amplias para facilitar la separación de fases, el fuego se propaga casi uniformemente a través del charco de solvente. La combustión libera grandes cantidades de calor, lo que incrementa la evaporación del orgánico, generando más vapores inflamables y acelerando la expansión del incendio. En esta etapa, las

barreras internas (*picket fences*) dentro del decantador pueden actuar como barreras parciales que segmentan el incendio, pero no detienen su avance completo

Etapas de Intensificación

A medida que el incendio se intensifica, el calor generado comienza a afectar tanto la estructura metálica del decantador como el equipo circundante. El calor radiante eleva la temperatura de los componentes internos, lo que puede dañar los sistemas de agitación o deformar elementos estructurales. La liberación continua de vapores inflamables puede provocar explosiones secundarias si el fuego alcanza concentraciones confinadas de estos vapores, como las acumuladas debajo de cubiertas o en zonas mal ventiladas. En esta etapa, la falta de una intervención inmediata podría permitir que el fuego comprometa los sistemas de control y monitoreo, dificultando aún más las acciones de contención.

Propagación a sistemas vecinos

Si no se controla, el fuego puede extenderse más allá del decantador hacia otras áreas del circuito SX, como tanques de almacenamiento de orgánico, bombas y tuberías. Esto ocurre por el efecto del calor radiante, el derrame del orgánico en combustión hacia áreas cercanas o la ignición de vapores transportados por el viento. En casos extremos, la propagación del fuego podría alcanzar las áreas de lixiviación o re-extracción, comprometiendo aún más la seguridad y operatividad de la planta. Además, la combustión genera productos tóxicos como monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles, representando un riesgo adicional para el personal.

Extinción o colapso total

En ausencia de sistemas de extinción efectivos, como espuma de baja expansión, el incendio puede continuar hasta que el combustible se consuma por completo, lo que podría tomar horas dependiendo del volumen de orgánico involucrado. La intervención de equipos de emergencia sería crucial para evitar un colapso total del decantador y un daño catastrófico a la planta. Si se aplican sistemas de espuma, su acción rápida podría sofocar

las llamas al interrumpir el suministro de oxígeno y enfriar el área, evitando una propagación mayor. Sin embargo, la efectividad de la respuesta dependerá de la velocidad de aplicación y de las características del diseño del sistema contra incendios.

6.5.2 Capacidad de extinción de los sistemas contra incendios

En el contexto del proceso de extracción por solventes (SX), los sistemas de protección contra incendios activos son esenciales para la detección, control y extinción de incendios en sus etapas iniciales. Estos sistemas incluyen detectores de humo, calor y llamas, que permiten una respuesta inmediata al identificar un posible incidente. Los rociadores automáticos son una solución comúnmente implementada, diseñados para activar el suministro de agua o espuma en áreas críticas como tanques de almacenamiento, mezcladores-decantadores y sistemas de tuberías donde el riesgo es mayor. Además, los sistemas de supresión por espuma son particularmente útiles en estas instalaciones debido a la naturaleza inflamable de los solventes orgánicos, ya que la espuma forma una barrera que reduce el contacto entre el combustible y el oxígeno, ayudando a controlar el fuego rápidamente.

Los sistemas de espuma de baja expansión se utilizan ampliamente como una medida de extinción en plantas SX, particularmente en los decantadores. Este tipo de espuma está diseñada para sofocar incendios en líquidos inflamables al formar una capa protectora sobre la superficie del solvente en el decantador. La espuma actúa principalmente mediante dos mecanismos: enfriamiento y sofocación. Al cubrir la superficie del líquido inflamable, bloquea el contacto con el oxígeno y reduce la liberación de vapores inflamables, impidiendo la propagación del fuego. Además, al ser aplicada, la espuma enfría tanto la superficie del líquido como las estructuras circundantes, disminuyendo la temperatura por debajo del punto de inflamación.

En los decantadores, el diseño interno presenta desafíos específicos para la efectividad de los sistemas de espuma, en particular debido a las barreras internas. Estas estructuras están diseñadas para facilitar la separación de fases orgánica y acuosa, pero pueden

dificultar la distribución uniforme de la espuma dentro del decantador. Como se puede ver en la Figura 5, en la zona posterior del decantador existen barreras cuyo fin es separar finalmente y enviar los productos separados hacia la otra etapa. Al interrumpir el flujo, las *picket fences* pueden limitar el alcance de la espuma hacia ciertas áreas, creando zonas no cubiertas que podrían seguir siendo susceptibles a incendios. Por ello, es crucial que el sistema de espuma esté correctamente dimensionado y que los puntos de aplicación estén estratégicamente posicionados para garantizar una cobertura completa, incluso en áreas de difícil acceso. También, el separador de fases, cuyo propósito es separar la fase orgánica de la solución acuosa no permitiría que el fuego se expanda

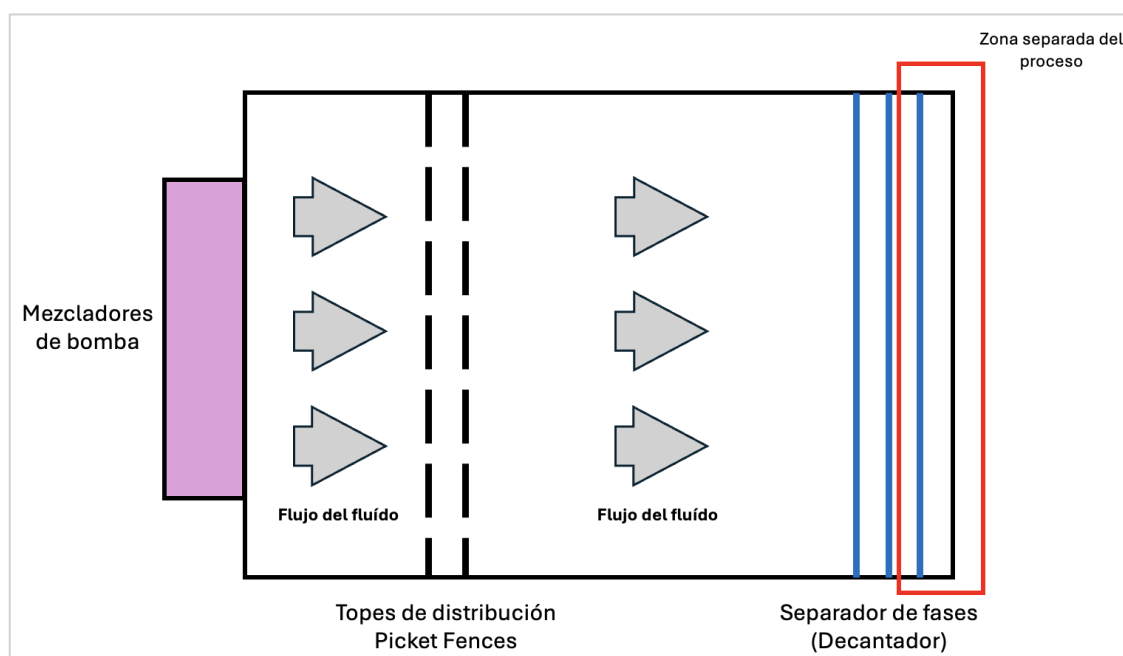


Figura 5. Esquema de separación de fases y secciones de un decantador

Además, la espuma debe tener propiedades específicas que le permitan mantener su estructura y adherencia sobre solventes orgánicos, cuya baja densidad puede generar dificultades para su estabilización. Este aspecto es especialmente importante en ambientes donde las condiciones de operación, como la agitación dentro del decantador, pueden comprometer la efectividad de la espuma si no está formulada adecuadamente.

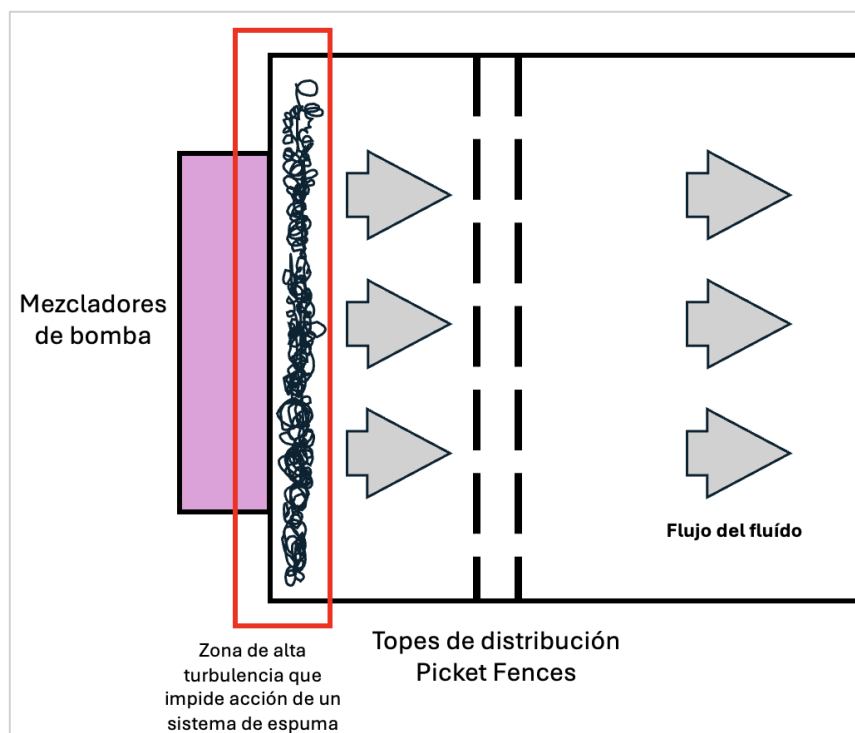


Figura 6. Esquema de generación de turbulencia

Los sistemas portátiles también juegan un papel importante en la protección activa contra incendios. Extintores de espuma, polvo químico seco o dióxido de carbono están estratégicamente ubicados en las áreas operativas para ser utilizados en emergencias localizadas. En las plantas SX modernas, estos sistemas se complementan con equipos automáticos de extinción diseñados para contener incendios en los tableros eléctricos, donde las fallas son una fuente potencial de ignición. La combinación de estos sistemas activos con protocolos de respuesta rápida garantiza que los riesgos de propagación se mantengan bajo control, proporcionando tiempo suficiente para implementar acciones de emergencia y reducir el impacto del evento.

6.5.3 Impacto a la cadena operativa

Un incendio en una planta de extracción por solventes (SX) puede generar un impacto severo en toda la cadena operativa, afectando no solo al proceso directo de SX, sino también a las etapas previas y posteriores. Esto incluye la lixiviación, donde se genera la solución rica en lixiviado (PLS), y la etapa de electro-obtención (EW), en la que el cobre es

finalmente recuperado. Cada una de estas fases depende de manera crítica del correcto funcionamiento del circuito SX, por lo que cualquier interrupción puede tener repercusiones considerables en la producción total de la planta.

La lixiviación, al ser el primer paso en la extracción de cobre, genera la solución PLS que alimenta el circuito SX. Un incendio en SX puede provocar acumulación de solución PLS en las pozas de almacenamiento, debido a la imposibilidad de transferir el líquido al siguiente proceso. Este estancamiento puede llevar a la sobresaturación de impurezas y precipitación de sólidos en las pozas, afectando la calidad de la solución. Además, la acumulación podría forzar la suspensión de las actividades de lixiviación, interrumpiendo la disolución del mineral y reduciendo la eficiencia operativa global.

Dentro del circuito SX, un incendio puede dañar equipos clave como los mezcladores-decantadores, tanques de orgánico y sistemas de tuberías. La pérdida de estos equipos puede generar una interrupción inmediata del flujo de extracción, dado que no habría transferencia efectiva de cobre desde la solución PLS al orgánico. Además, el daño a las líneas de transferencia podría provocar fugas de solventes inflamables, exacerbando el impacto del evento y retrasando las reparaciones.

Si este material ajeno al proceso no se eliminan, estos terminarán ingresando al tanque de almacenamiento de orgánico y luego a las celdas de electro-obtención. En términos económicos, la presencia de materia orgánica dispersa perjudica la calidad del cobre producido, ya que interfiere en el proceso de electro depósito y contamina el producto final. Tjernlund, D. M. (1999).

En el proceso de *electrowinning* (EW), la solución electrolítica proveniente de SX es crucial para la producción de cátodos de cobre de alta pureza. Un incendio en las instalaciones de SX podría interrumpir el suministro de esta solución, lo que dejaría fuera de operación las celdas de electro-obtención. Esto no solo paraliza la producción de cobre, sino que también puede ocasionar problemas adicionales, como la necesidad de descargar

las celdas para evitar la acumulación descontrolada de cobre en los ánodos y cátodos. (Rydberg et al., 2004).

El daño físico a la infraestructura, como estructuras de soporte, cableado eléctrico y sistemas de control, puede prolongar la interrupción operativa. Además, el riesgo para el personal durante y después del evento genera la necesidad de protocolos de evacuación y revisiones de seguridad exhaustivas antes de reanudar las operaciones (National Fire Protection Association [NFPA], 2022).

Las paradas en las operaciones industriales pueden generar un impacto económico considerable, ya que el tiempo de inactividad, los costos de reparación y la pérdida de producción contribuyen a un gran perjuicio financiero. En general, los costos relacionados con la interrupción de las actividades representan una proporción significativa de las pérdidas totales, dependiendo de la magnitud del evento. (Dale R., 2009).

Un incendio puede liberar vapores tóxicos al ambiente, especialmente si involucra solventes orgánicos. Además, el agua y la espuma utilizadas en la extinción pueden arrastrar materiales peligrosos hacia el suelo o cuerpos de agua cercanos, generando un impacto ambiental adicional (Environmental Protection Agency [EPA], 2019).

La paralización de las operaciones en SX también afecta la logística de entrada y salida. La falta de producción puede ocasionar retrasos en la entrega de cátodos a la etapa final de producción, mientras que el almacenamiento prolongado de PLS o concentrados puede dificultar la gestión de inventarios.

Un incendio de gran escala puede afectar la reputación de una empresa, especialmente si causa daños ambientales o pone en riesgo a la comunidad cercana. Esto podría resultar en sanciones regulatorias, la pérdida de contratos, problemas judiciales o un aumento en las primas de seguro. (Atherton, 2008).

La integración de planes robustos de contingencia, sistemas de extinción adecuados y mantenimientos preventivos puede mitigar significativamente estos impactos. Una

evaluación de riesgos integral permite identificar puntos críticos y priorizar mejoras en los sistemas de protección (ISO, 2020).

6.5.4 Carga térmica y afectación de equipos

La carga térmica en un incendio se refiere a la cantidad de energía calorífica liberada durante un siniestro. Este concepto es esencial en la ingeniería de protección contra incendios, ya que permite evaluar la magnitud del incendio y su impacto potencial sobre las estructuras y equipos presentes en el área afectada. Una comprensión precisa de la carga térmica es crucial para diseñar sistemas de protección adecuados y garantizar la seguridad tanto de las personas como de las instalaciones. A través de diversos parámetros y entradas, se puede calcular la cantidad de calor generada y cómo esta influye en el entorno durante el incendio.

Para la simulación se usó un software de simulación de incendios llamado ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres), el cual es un software de simulación desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), diseñado para modelar la dispersión de sustancias químicas peligrosas en el aire durante emergencias como fugas, derrames o incendios. Su propósito es proporcionar a los equipos de respuesta información rápida y precisa sobre el alcance potencial de zonas peligrosas, incluyendo concentraciones tóxicas, riesgos de explosión y áreas de alta temperatura. Aunque es una herramienta valiosa para la planificación y la gestión de emergencias, presenta limitaciones como la necesidad de datos precisos para obtener resultados confiables y su enfoque simplificado que no considera fenómenos complejos como la topografía detallada o interacciones químicas avanzadas.

Las entradas (*inputs*) que influyen en el cálculo de la carga térmica de un incendio incluyen variables como el tipo de material involucrado, la cantidad de combustible disponible, la ventilación en el área, y las características del sistema de detección y extinción. La Figura 7 proporciona una representación de estos factores clave, que deben

ser considerados para determinar la intensidad y duración del calor generado. Entre los factores más importantes se encuentran la densidad de los combustibles, su calor específico, y las condiciones atmosféricas, que afectan la propagación del incendio. Estos inputs son fundamentales para obtener una estimación precisa de la carga térmica y para diseñar las medidas adecuadas de protección.

<u>INPUT</u>	
Datos de Entrada	
* Sobre la localidad:	
○	Nombre
○	Coordenadas de ubicación
○	Diferencia horaria respecto a GMT
* Sobre la sustancia/producto:	
○	Nombre químico o comercial (Debe seleccionarse desde la base de datos).
○	Masa total vertida.
○	<i>El software carga automáticamente las propiedades físico químicas del producto seleccionado</i>
* Sobre el charco:	
○	Superficie o diámetro equivalente.
○	Temperatura.
* Sobre el ambiente:	
○	Temperatura.
○	Humedad relativa.
○	Velocidad del viento.
○	Dirección del viento
* Sobre el receptor:	
○	Distancia al centro del incendio.

Figura 6. Inputs de evaluación

La carga térmica generada en un incendio depende de la cantidad de combustible disponible y su capacidad para liberar energía en forma de calor. Este análisis es crucial para evaluar el impacto potencial del incendio sobre las estructuras y los equipos sensibles. Una carga térmica elevada puede comprometer la integridad de los materiales, desencadenando fallas en equipos de protección, sistemas eléctricos o incluso provocando daños estructurales irreversibles. La correcta identificación de los componentes que generan una mayor carga térmica permite a los ingenieros realizar un análisis de riesgos, priorizando las áreas más vulnerables y estableciendo estrategias de mitigación efectivas.

Además, este análisis ayuda a optimizar la respuesta ante incendios y a seleccionar los mejores sistemas de control y extinción.

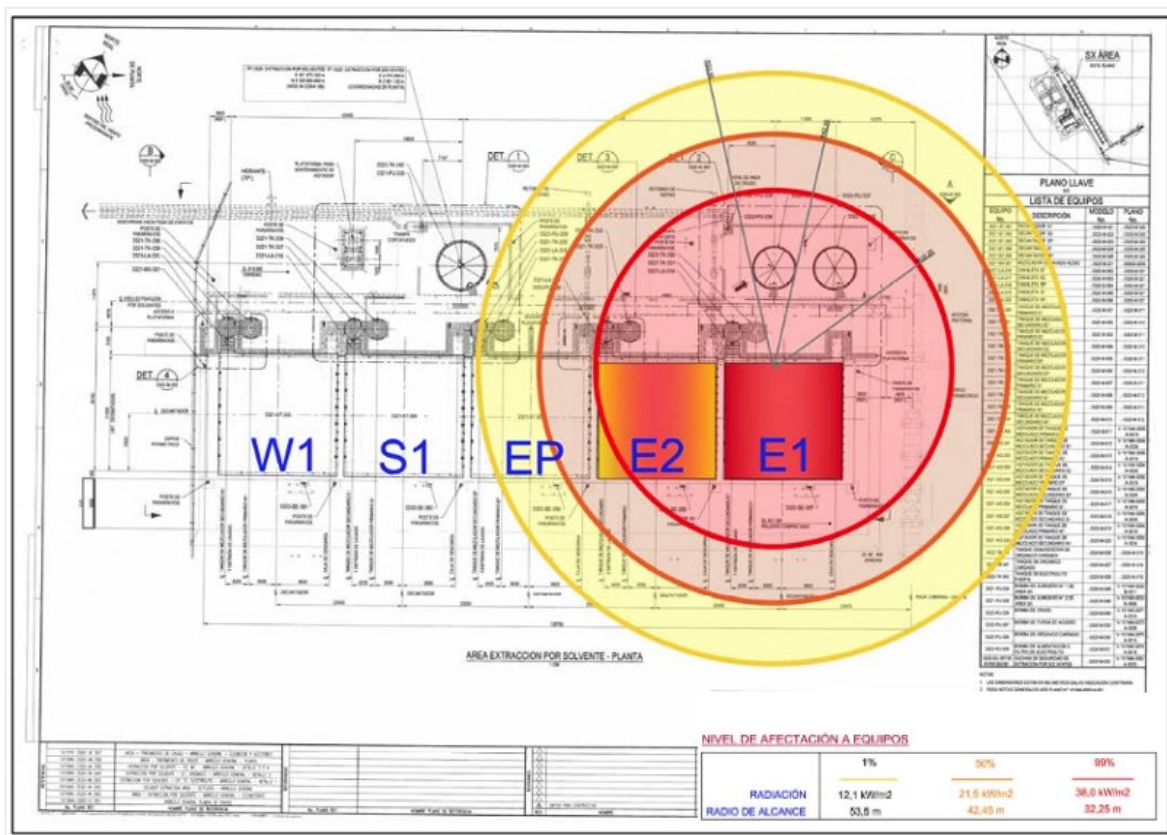


Figura 7. Resultados de alcance de afectación de equipos por simulación

En los análisis de radiación térmica generada por incendios, generalmente se trazan tres radios que corresponden a diferentes niveles de intensidad térmica. Estos radios están asociados a valores específicos de flujo térmico (medidos en kW/m²) que representan el impacto de la radiación en personas, equipos y materiales. De manera general, se interpretan así:

Radio de daño letal (alta intensidad)

Este corresponde al flujo térmico más alto, típicamente superior a 12,5 kW/m². A este nivel, la exposición puede causar daños graves o mortales a personas en pocos segundos y provocar la ignición de materiales combustibles sólidos cercanos, como madera o plásticos. Este radio delimita el área de máxima peligrosidad en términos de impacto directo por radiación. Los equipos cercanos como E1 y E2, sufrirán estrés térmico el cual podría

comprometer la rigidez estructura y podría colapsar la estructura y, por lo tanto, la contención del líquido inflamable. Como se puede ver en la figura 7, se tiene que la radiación de esta intensidad también alcanza los tanques recolectores por lo que puede hacer que estos también sufran por el estrés térmico.

Radio de daño significativo (intensidad media)

Este se asocia a flujos térmicos entre 4 y 12,5 kW/m². En esta zona, las personas pueden sufrir quemaduras graves tras exposiciones prolongadas y los materiales combustibles pueden degradarse significativamente, aunque es menos probable que se enciendan de inmediato. Este radio suele ser crítico para evaluar el daño a equipos sensibles y estructuras. Solamente una pequeña franja como se puede en la figura 7 está expuesta. Sin embargo, es importante mencionar que, desde esta distancia, los sistemas de respuesta automáticos ya pueden operar y responder. Definir esta zona permite ubicar hasta que distancia los sistemas pueden ser instalados para aumentar la eficacia de dichos sistemas.

Radio de daño menor o tolerable (baja intensidad)

Este incluye flujos térmicos inferiores a 4 kW/m², que generalmente no causan lesiones graves a personas ni daños inmediatos a estructuras, pero pueden ser incómodos y causar efectos a largo plazo si la exposición es continua. Es el límite exterior del impacto térmico y se utiliza para evaluar riesgos más leves, como molestias o daños no críticos.

Estos valores son generales y pueden variar según las normativas o estándares específicos aplicados, como NFPA o ISO, y las condiciones específicas del escenario modelado.

En conclusión, la evaluación de la carga térmica es un componente esencial para el diseño de sistemas de protección contra incendios. En la Figura 8, se muestran el detallado de inputs. Al entender los inputs que afectan la cantidad de calor liberado, así como el análisis de su impacto potencial sobre los equipos e infraestructuras, se pueden

implementar medidas adecuadas para reducir los riesgos. El análisis detallado de la carga térmica no solo contribuye a mejorar la seguridad de las instalaciones, sino que también optimiza los recursos destinados a la prevención, mitigación y control de incendios. Con un enfoque integral y una correcta gestión de estos parámetros, es posible proteger eficazmente tanto a las personas como a los bienes materiales en caso de incendio.

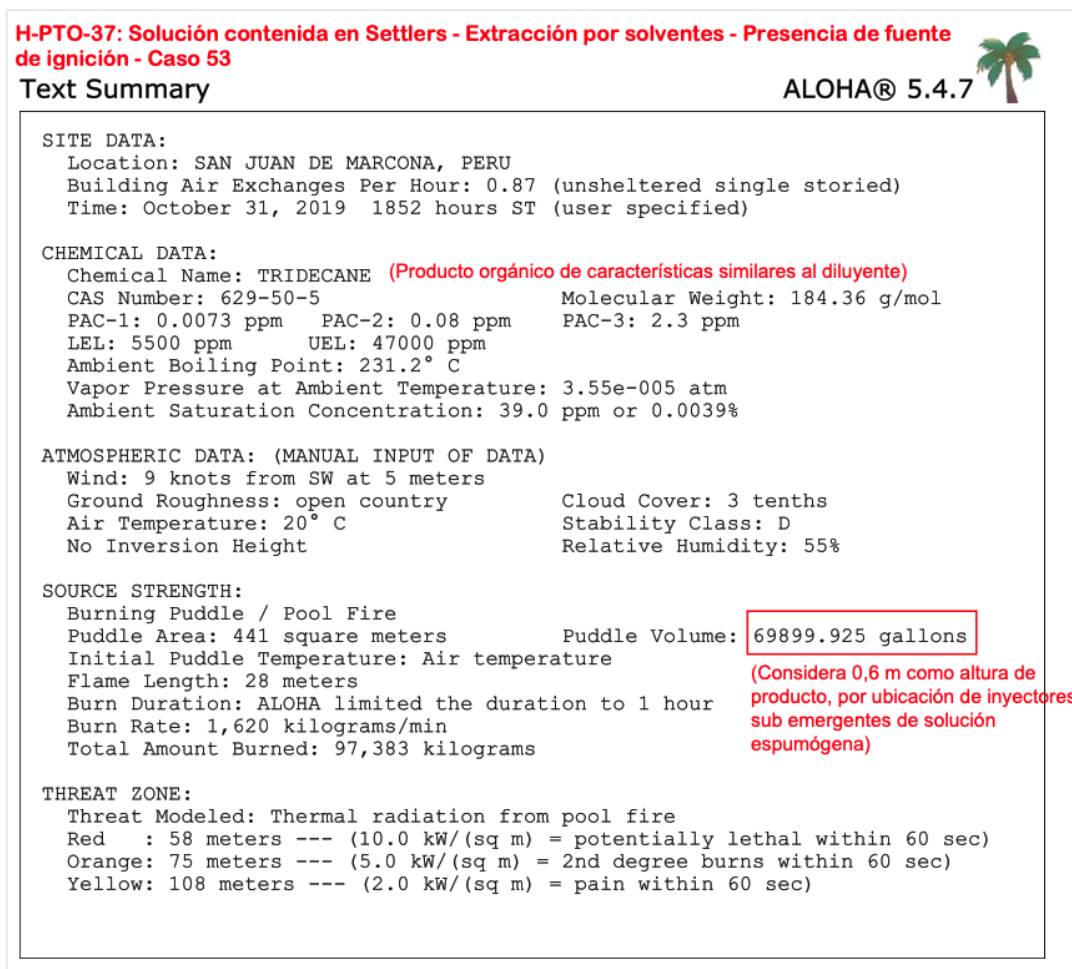


Figura 8. Resultados de la evaluación por simulación ALOHA versión 5.4.7

6.5.5 Valoración de severidad

La severidad de un incendio está determinada por varios factores que incluyen la cantidad de combustible disponible, la velocidad de propagación del fuego y la intensidad térmica generada durante el evento. Cuando se presenta una carga térmica elevada, el impacto sobre las estructuras y equipos se intensifica, haciendo que la temperatura alcance niveles que pueden causar fallos estructurales o la degradación de materiales. La

capacidad del fuego para consumir rápidamente grandes cantidades de combustible, combinada con condiciones de ventilación que favorecen su propagación, incrementa la severidad del incendio, lo que puede generar un daño extenso y complicado de controlar. Estos factores, cuando se combinan, hacen que el incendio sea mucho más difícil de mitigar y aumentar la probabilidad de consecuencias devastadoras.

En situaciones extremas, donde la carga térmica es tan alta que compromete la integridad de las instalaciones, se considera que el incendio alcanza un nivel crítico. En este contexto, el incendio no solo representa un riesgo inmediato para las personas, sino que también amenaza con causar daños irreparables a la infraestructura, equipos y sistemas de seguridad de la planta. Los incendios de alta severidad pueden generar un efecto dominó, afectando múltiples áreas de la instalación simultáneamente, lo que pone en peligro la operación general y la seguridad. La rápida intervención y la implementación de sistemas de protección adecuados son cruciales en estos escenarios para evitar que la situación se convierta en una crisis aún mayor.

6.6 Resultados finales de la evaluación de riesgo

El resultado de la evaluación de riesgos muestra que, en el proceso de extracción por solventes, la probabilidad de que ocurra un incendio es ocasional, lo que indica que los eventos peligrosos pueden suceder en intervalos poco frecuentes, pero no son completamente improbables. Esto se debe a factores como la presencia de solventes inflamables, el manejo de grandes volúmenes de sustancias químicas y las condiciones operativas específicas del proceso, que crean un ambiente en el que pueden producirse fallas en los sistemas de seguridad, aunque no de forma constante. La probabilidad de que un incidente ocurra no es constante, pero la acumulación de riesgos en áreas específicas aumenta la posibilidad de un evento de incendios en el futuro.

Por otro lado, la severidad del incendio en este proceso es crítica debido a la alta carga térmica que un incendio podría generar. En caso de un incendio, la energía térmica liberada podría comprometer de forma irreversible la integridad de las instalaciones y los equipos,

además de poner en riesgo la seguridad de las personas en el área. Dado que la severidad es crítica y la probabilidad es ocasional, el análisis concluye que el riesgo total es alto. Este nivel de riesgo resalta la necesidad de implementar medidas de seguridad avanzadas, como sistemas de detección temprana, control de temperatura, y sistemas automáticos de extinción, para mitigar los posibles efectos catastróficos de un incendio en el proceso SX. La valoración según la evaluación de probabilidad y severidad y la Tabla 3, se presenta en la tabla 4; de la que se establece la condición de MODERADO.

Tabla 4. Resultado de la evaluación

VALORACIÓN DE PROBABILIDAD	(P)	VALORACIÓN DE SEVERIDAD	(S)	NIVEL DE RIESGO	(R)
Remoto	2	Crítico	3	MODERADO	6

7. Discusión de resultados

En el análisis de riesgo realizado para el proceso de extracción por solventes (SX), se identificaron diversos peligros inherentes al proceso, basados en la descripción detallada del sistema. Los principales riesgos asociados incluyen la fuga de solventes inflamables, la generación de calor excesivo debido a reacciones químicas no controladas, y el posible contacto de los reactivos con fuentes de ignición. Estos peligros fueron evaluados considerando tanto la probabilidad de que ocurran como la severidad de sus consecuencias. La evaluación de estos factores es esencial para determinar las medidas preventivas y correctivas necesarias para mitigar el riesgo de incendio y otras eventualidades dentro del proceso.

La asignación de los valores de probabilidad y severidad se realizó tomando en cuenta una serie de variables clave. En primer lugar, se evaluó la frecuencia de los eventos que podrían generar una liberación de solventes inflamables o la acumulación de calor en puntos críticos del proceso. La probabilidad de que estos eventos se materialicen se clasificó como alta en áreas con alta concentración de solventes, como los extractores, y en lugares donde el contacto de materiales inflamables con fuentes de calor es frecuente. La severidad, por otro lado, fue evaluada en función de los efectos potenciales en la integridad de los equipos, la seguridad del personal y la protección ambiental. El alto nivel de severidad asignado se debe a la alta carga térmica que se puede generar en estos escenarios, lo cual podría llevar a daños estructurales graves, incluso la destrucción de la planta.

En el análisis del proceso SX, se identificaron varios peligros que podrían generar una situación de incendio de alta gravedad. Estos incluyen la posibilidad de que solventes inflamables como el queroseno entren en contacto con equipos calientes o fuentes de ignición. Además, la manipulación y transporte de grandes volúmenes de ácido sulfúrico, junto con la presencia de otros compuestos químicos activos, representa un peligro adicional. La acumulación de calor en áreas de concentración de estos materiales puede

generar un incendio explosivo si no se cuenta con sistemas de control adecuados. Estos peligros fueron considerados de alta probabilidad y severidad, ya que el proceso SX involucra grandes volúmenes de líquidos inflamables y la presencia de condiciones que favorecen la propagación del fuego.

La severidad del incendio fue evaluada especialmente en relación con la alta carga térmica que este puede generar. En situaciones donde el incendio se origina en áreas críticas, la liberación de energía térmica podría comprometer la integridad de las estructuras y equipos clave. La carga térmica, que depende de la cantidad de combustible disponible y la velocidad de propagación del fuego, puede alcanzar niveles extremadamente altos, afectando de manera directa los sistemas de protección contra incendios y comprometiendo la seguridad general. La alta carga térmica de un incendio en este tipo de procesos puede provocar la pérdida total de equipos, afectar el sistema de ventilación, e incluso generar daños irreversibles en las instalaciones de almacenamiento de productos químicos, lo que incrementa significativamente los costos de recuperación y la duración de la interrupción operativa.

En conclusión, los resultados del análisis de riesgo indican que la probabilidad de un incendio en el proceso de extracción por solventes es alta debido a los peligros inherentes al uso de materiales inflamables y a las condiciones operativas del proceso. La severidad de un posible incendio se ve amplificada por la alta carga térmica generada en el evento, lo que puede causar daños severos a la infraestructura y representar un peligro significativo para la seguridad del personal. Estos hallazgos resaltan la importancia de implementar sistemas de protección más robustos, como sistemas automáticos de extinción y monitoreo continuo de los puntos críticos, para mitigar los riesgos y asegurar la operación segura del proceso SX. La correcta asignación de valores de probabilidad y severidad en el análisis de riesgo es fundamental para priorizar los esfuerzos de prevención y protección en áreas vulnerables dentro del proceso.

En base a lo mencionado en la discusión de resultado, se establecen recomendaciones de protección que consideran aspectos de riesgo evaluados en el estudio:

7.1 Implementación de Sistemas de extinción con espuma

Un sistema de extinción con espuma de baja expansión debe estar instalado en los decantadores, con boquillas estratégicamente ubicadas para garantizar una cobertura uniforme, incluso en áreas de difícil acceso debido a las barreras internas. La espuma debe ser capaz de formar una capa estable sobre la superficie del orgánico, sofocando rápidamente las llamas y reduciendo la liberación de vapores inflamables. Esquema de lo mencionado se puede observar en la Figura 9 y la Figura 10. Los sistemas de espuma son esenciales para el control y la extinción de incendios, especialmente en escenarios donde hay presencia de líquidos inflamables o riesgos específicos. Estos sistemas se pueden clasificar según su tecnología en:

Sistemas de espuma de baja expansión: Producen una mayor cantidad de espuma con menor proporción de expansión. Son ideales para cubrir superficies extensas y sofocar incendios en áreas donde se requiere una cobertura densa y uniforme.

Rociadores de espuma: Combinan la acción de rociadores convencionales con la capacidad de aplicar espuma. Son efectivos para proteger áreas con riesgos de incendio específicos, como techos de tanques o salas de máquinas.

Sistemas de espuma de aire comprimido (CAFS): Utilizan aire comprimido para generar espuma con mayor adherencia y poder de penetración. Son altamente versátiles y se emplean tanto para extinguir como para prevenir la propagación de incendios. Estos sistemas deben seleccionarse y ubicarse estratégicamente según el tipo de riesgo, el tamaño del área a proteger y la naturaleza de los materiales combustibles presentes, asegurando un enfoque integral para el control y mitigación de incendios.

7.2 Demanda de agua

La demanda de agua de un sistema de protección contra incendios debe ser calculada considerando la capacidad de cubrir simultáneamente todos los sistemas de supresión, incluyendo aquellos que utilizan espuma y los que no. Esto implica garantizar un suministro adecuado para sistemas de espuma, como los utilizados en áreas con líquidos inflamables, que requieren volúmenes de agua específicos mezclados con agentes espumantes, así como para sistemas tradicionales de agua, como los rociadores automáticos o monitores. Este enfoque asegura que, en caso de un incendio, se disponga de los recursos hídricos necesarios para enfrentar múltiples escenarios de emergencia y brindar una protección integral en toda la instalación.

7.3 Monitoreo continuo de gases inflamables

Instalar sensores de detección de gases inflamables en los decantadores y sus alrededores es esencial. Estos sensores deben estar integrados a un sistema de alarmas para alertar al personal en caso de acumulación de vapores por encima de los límites de inflamabilidad, lo que permitiría activar sistemas de contención antes de que ocurra una ignición.

7.4 Diseño de barreras Ignífugas

Las barreras internas, podrían ser modificadas para incorporar materiales ignífugos que reduzcan el riesgo de propagación del fuego dentro del decantador. Además, las estructuras circundantes deben estar diseñadas para contener posibles derrames y evitar que los líquidos en combustión se propaguen hacia otras áreas.

7.5 Diseño de sistemas de drenaje de emergencia

Los sistemas de drenaje de emergencia son esenciales para manejar de manera segura los derrames de líquidos inflamables, químicos peligrosos y agua utilizada en la extinción de incendios. Su diseño debe considerar la capacidad necesaria para captar y contener estos fluidos, evitando desbordamientos que puedan poner en riesgo a las personas, las

instalaciones o el medio ambiente. Además, deben incorporar separadores de hidrocarburos o tanques de retención para aislar líquidos peligrosos, facilitando su recuperación y reduciendo su impacto ambiental. Esquema de lo mencionado se puede observar en la Figura 11.

Estos sistemas deben construirse con materiales resistentes a los productos manejados en la instalación, incluir pendientes adecuadas para un drenaje eficiente y contar con rejillas y accesos que permitan inspecciones periódicas y limpieza. Es fundamental dirigir el flujo hacia áreas seguras, como fosos de contención, y prever estaciones de tratamiento para cumplir con las normativas de descarga de efluentes. La ubicación estratégica de estos drenajes es clave, priorizando zonas críticas como tanques de almacenamiento o áreas de proceso.

Un diseño bien ejecutado no solo mitiga los riesgos de incendios secundarios, sino que también asegura la funcionalidad operativa en situaciones de emergencia. Al considerar tanto la gestión de los líquidos como la prevención de daños, se protege al personal, se minimizan los riesgos ambientales y se cumple con estándares de seguridad industrial.

7.6 Optimización de la ventilación

Garantizar un diseño adecuado de ventilación en las áreas de SX es crucial para evitar la acumulación de vapores inflamables. Sistemas de extracción localizados deben estar operativos y bien mantenidos para reducir la concentración de vapores cerca de los decantadores.

7.7 Aislamiento de fuentes de calor

Todas las fuentes de calor cercanas a los decantadores, como motores, bombas y cables eléctricos, deben estar adecuadamente aisladas. Además, se debe prohibir estrictamente el uso de herramientas que generen chispas en estas áreas, implementando procedimientos de trabajo seguro.

7.8 Capacitación del personal

El personal operativo debe recibir entrenamiento continuo en prácticas de seguridad específicas para la extracción por solventes, incluyendo simulacros de respuesta a incendios. Esto incluye familiarización con los equipos de extinción, sistemas de alarma y procedimientos de evacuación.

7.9 Diseño de zonas seguras

El diseño del área de SX debe incluir zonas de seguridad claramente definidas para separar físicamente los decantadores de otras áreas críticas como tanques de almacenamiento o estaciones de re-extracción. Además, las rutas de evacuación deben estar señalizadas y libres de obstáculos.

7.10 Inspección y mantenimiento regular

Los sistemas contra incendios, equipos eléctricos y barreras estructurales deben someterse a inspecciones periódicas para garantizar su funcionalidad. Esto incluye pruebas de integridad de los sistemas de espuma, limpieza de sensores de gases y revisión de las estructuras de contención.

7.11 Equipos de respuesta a emergencias

Un equipo de respuesta especializado debe estar disponible en la planta, equipado con trajes ignífugos, respiradores autónomos y herramientas específicas para combatir incendios en áreas químicas. Este equipo debe coordinarse con el sistema de seguridad automatizado para realizar intervenciones seguras y eficaces en caso de emergencia. El personal debe recibir las siguientes herramientas para mejorar la eficiencia en la respuesta.

Capacitación especializada: El personal debe recibir formación regular en el manejo de emergencias relacionadas con incendios en *settlers*. Esto incluye el uso adecuado de equipos de protección personal (EPP), manejo de sistemas de extinción (como espuma, rociadores y extintores), y protocolos de evacuación. Es fundamental impartir

conocimientos específicos sobre los riesgos asociados con los materiales combustibles presentes y las características particulares del setter.

Equipos y herramientas adecuados: Asegurar la disponibilidad de equipos de protección como trajes resistentes al fuego, cascos con visores, guantes y botas de seguridad. Incorporar equipos de detección temprana, como sensores de humo y calor, y sistemas automáticos de supresión. Además, los equipos manuales, como mangueras, boquillas y extintores, deben estar en perfecto estado y ser revisados periódicamente.

Simulacros y entrenamiento práctico: Realizar simulacros regulares para evaluar la capacidad de respuesta del equipo, identificar posibles fallos en los procedimientos y garantizar la coordinación efectiva entre los miembros. Los simulacros deben incluir escenarios realistas que contemplen diferentes tipos de emergencias, como fugas, incendios mayores o fallos de sistemas críticos.

Gestión y comunicación de emergencias: Establecer un sistema de comunicación claro y confiable para alertar rápidamente a los equipos de respuesta y coordinar acciones. Designar roles específicos dentro del equipo para garantizar una ejecución eficiente de las tareas, desde el control del incendio hasta la evacuación de personal. También es importante contar con un plan de actualización constante de los protocolos y evaluaciones post-emergencia para mejorar continuamente los procedimientos.

Plan de contingencias: Desarrollar un plan integral de contingencias que contemple todas las etapas de la emergencia: prevención, respuesta, control y recuperación. Este plan debe incluir medidas específicas para mitigar riesgos y proteger tanto al personal como las instalaciones. El plan debe ser revisado periódicamente para asegurar su efectividad y adaptarse a nuevas amenazas o condiciones operativas.

Plan de respuesta específico: Diseñar un plan de respuesta detallado para incendios en *setters* que considere los riesgos propios de la operación, los materiales involucrados y las particularidades del equipo disponible. Este plan debe incluir procedimientos claros y

específicos para cada tipo de emergencia, como incendios localizados o incendios mayores, y garantizar su integración con los sistemas de comunicación y gestión existentes.

8. Conclusiones

Las siguientes son las conclusiones que se dedujeron de este trabajo.

Se concluye que la combinación de sistemas protección pasiva, personal capacitado y equipos de respuesta activa adecuada reduce significativamente el nivel de riesgo de incendio en plantas SX de niveles catastróficos a niveles críticos-marginales lo cual tiene influencia directa sobre la severidad, el cual está determinado por la supresión y respuesta ante eventos de incendios. Los criterios de diseño enfocados a la seguridad de los procesos tienen un impacto directo en la probabilidad y una correcta implementación generará que exista una menor probabilidad de la generación de la incidencia a pesar de ser un proceso crítico de media-alta probabilidad. Por lo tanto, el nivel de riesgo aplicado bajo la metodología NFPA indica que el nivel de riesgo es MODERADO.

La evaluación realizada evidencia que las estrategias de seguridad implementadas en la planta SX alineadas con normativas internacionales como la NFPA y FM reducen el impacto de un incendio, esto al evaluarse como medidas de respuesta automática suprimirían los incendios mediante métodos de inundación de las cámaras y tuberías mediante sistemas de espuma de media y alta expansión mientras que el diseño de sistemas de drenaje permitiría retirar el material inflamable hacia zonas seguras.

El análisis de riesgo presentado en este trabajo aporta al campo de la Seguridad de Procesos al demostrar la importancia de los sistemas de protección contra incendios en la gestión de riesgos en plantas SX el cual tiene influencia en el factor de impacto. Este estudio sirve como referencia para investigaciones futuras y como punto de partida para el diseño de procesos más seguros.

Este estudio proporciona a la universidad un aporte significativo mediante datos y análisis sobre la efectividad de los sistemas de protección contra incendios en el campo de

la seguridad de procesos, ámbito de la ingeniería que está cobrando relevancia los últimos años. Los resultados obtenidos fortalecen el conocimiento sobre la mitigación de riesgos y la seguridad en operaciones industriales.

A partir del análisis de riesgo, se proponen mejoras como la implementación de tecnologías probadas en extinción de sistemas contra incendio y la optimización de protocolos de las medidas de respuesta. Estas medidas se mencionan a detalle en el apartado de las recomendaciones.

9. Bibliografía

- Atherton J. & Gill F. (2008) Incidents that Define Process Safety. Wiley.
- Biswas, A. K., & Davenport, W. G. (2013). Extractive Metallurgy of Copper. Elsevier.
- Brown, T. L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., & Murphy, C. (2018). Chemistry: The Central Science (14th ed.). Pearson.
- Chow, W. K. (2015). Introduction to Fire Dynamics. John Wiley & Sons.
- Coulson, J. M., & Richardson, J. F. (2002). Chemical engineering volume 1: Fluid flow, heat transfer, and mass transfer (6th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Cowl, D. A., & Louvar, J. F. (2011). Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications (3rd ed.). Pearson.
- Crundwell, F. K., Moats, M. S., Ramanujam, V., & Schwartz, M. (2011). Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals. Springer.
- Davenport, W. G., King, M., Schlesinger, M., & Biswas, A. K. (2002). Extractive Metallurgy of Copper. Elsevier.
- Drysdale, D. D. (1999). An introduction to fire dynamics (2nd ed.). Wiley.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2019). Impact of fire events on chemical plants. EPA Technical Reports.
- FM Global. (2023). Fire hazards in solvent extraction plants. FM Global. Data Sheets FMDS0712.
- Gómez, R., & Torres, J. (2021). Firefighting Foam Systems in Industrial Safety. Springer.

- Gupta, C. K., & Mukherjee, T. K. (1990). Hydrometallurgy in extraction processes (Vol. 2). CRC Press.
- Habashi, F. (1993). Principles of Extractive Metallurgy: Hydrometallurgy, Volume 2. CRC Press.
- Heskestad, G. (2019). Fire behavior and combustion processes. In Fire Protection Handbook (20th ed., pp. 1-25). National Fire Protection Association.
- Hoffman, L. (2017). Combustion principles for fire safety. Wiley.
- ISO. (2020). Risk management principles for industrial plants. ISO Standards, ISO 31000.
- Krause, C. (2001). Fire and combustion: A chemical perspective. Prentice Hall.
- Hamann, C. H., Hamnett, A., & Vielstich, W. (2007). Electrochemistry (2^a ed.). Wiley-VCH.
- MacHunter, A. (2013). Factors influencing effectiveness of firewall designs for metalliferous solvent extraction plants. Institute of Fire Engineers Australia. <https://www.hatch.com/About-Us/Publications/Technical-Papers/2013/01/Factors-Influencing-Effectiveness-of-Firewall-Designs-for-Metalliferous-Solvent-Extraction-Plants>.
- Marsh, G., & Evans, D. (2005). Fire safety engineering: Design of structures. Taylor & Francis.
- McIntyre, D. R. & Ford E. (2009). Recent developments in the analysis of fires, explosions, and production disruption incidents in chemical plants and oil refineries. Process Safety Progress, 28(3), 250-258. <https://doi.org/10.1002/prs.10327>.
- NFPA. (2019). Fire dynamics and fire protection systems. National Fire Protection Association.
- NFPA. (2019). Guide for fire and explosion investigations. National Fire Protection Association.

- NFPA. (2020). Flammable and combustible liquids code handbook. National Fire Protection Association.
- NFPA. (2021). NFPA 551: Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments. National Fire Protection Association.
- NFPA. (2022). NFPA 11: Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam. National Fire Protection Association.
- NFPA. (2023). NFPA 30: Flammable and Combustible Liquids Code. National Fire Protection Association.
- NFPA. (2023). NFPA 122: Standard for Fire Prevention and Control in Metal/Nonmetal Mining and Metal Mineral Processing Facilities. National Fire Protection Association.
- NFPA. (2023). Navigating NFPA 36: A comprehensive guide to solvent extraction plant safety standards. NFPA.
- National Fire Protection Association. (2020). *Fire protection handbook* (21st ed.). National Fire Protection Association.
- Perry, R. H., & Green, D. W. (2007). *Perry's chemical engineers' handbook* (8th ed.). McGraw-Hill.
- Pradhan, S., & Mishra, S. (2020). A review on extraction and separation studies of copper with various commercial extractants. *Minerals Engineering*, 150, 106219. <https://doi.org/10.1051/metal/2015005>.
- Prasad, M. S., Kenyén, V. P., & Assar, D. N. (1992). Development of SX-EW Process for Copper Recovery—An Overview. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 8(1-4), 95–118. <https://doi.org/10.1080/08827509208952680>.
- Rydberg, J., Musikas, C., Choppin, G. R., & Liljenzin, J. O. (2004). *Solvent extraction principles and practice* (2nd ed.). CRC Press.
- Schlesinger, M., King, M., Sole, K. C., & Davenport, W. G. (2011). *Extractive metallurgy of copper* (5th ed.). Elsevier.
- Silbey, R. J., Alberty, R. A., & Bawendi, M. G. (2004). *Physical chemistry* (4th ed.). Wiley.

- Sanaie, S. M., Vafaeenezhad, S., Pourarya, A. (2015). An introduction to copper electrowinning: For mineral processing, materials science, chemistry and electrical engineers. LAP LAMBERT.
- Tjernlund, D. M. (1999). A study of the fire and explosion hazards associated with the electrowinning of copper in Arizona surface mine plants. Investigative Report. Engineering Support Branch.
- Tuve, R. L. (1976). Principles of Fire Protection Chemistry. National Fire Protection Association.
- Williams, D. (2020). Fundamentals of combustion and fire protection engineering. Springer.
- Wills, B. A. (2006). Mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery (7^a ed.). Elsevier.
- Zalosh, R. G. (2003). Industrial fire protection engineering. Wiley.

10. ANEXOS

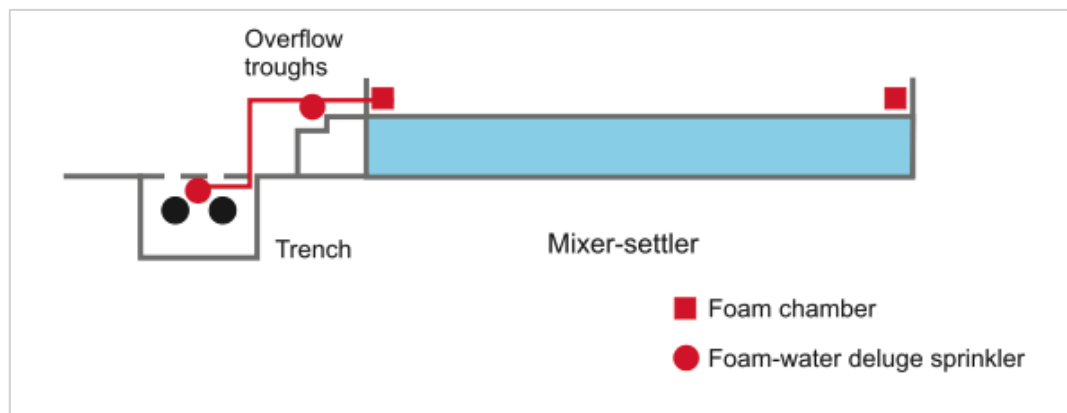


**Figura 9. Esquema de posicionamiento de descarga de espuma en decantadores abiertos –
FM DATA SHEET 0712**

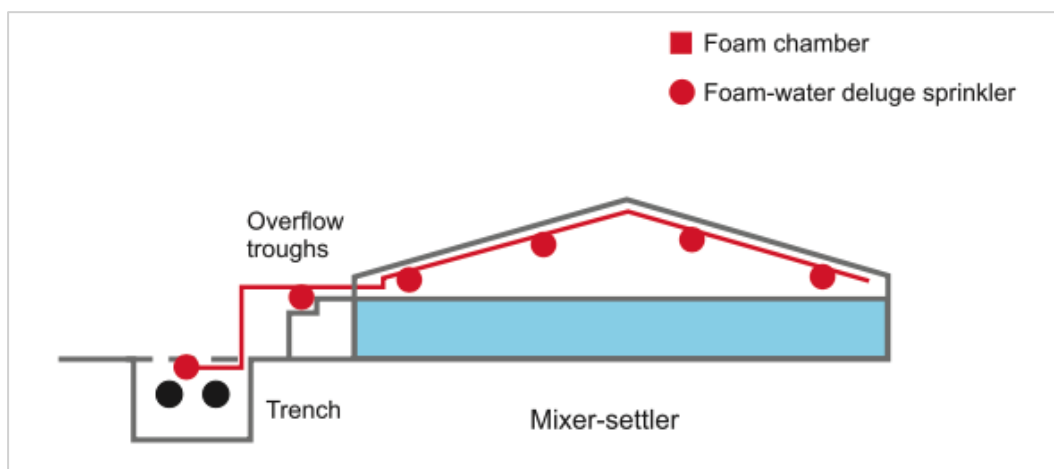


**Figura 10. Esquema de posicionamiento de descarga de espuma en decantadores
cerrados - FM DATA SHEET 0712**

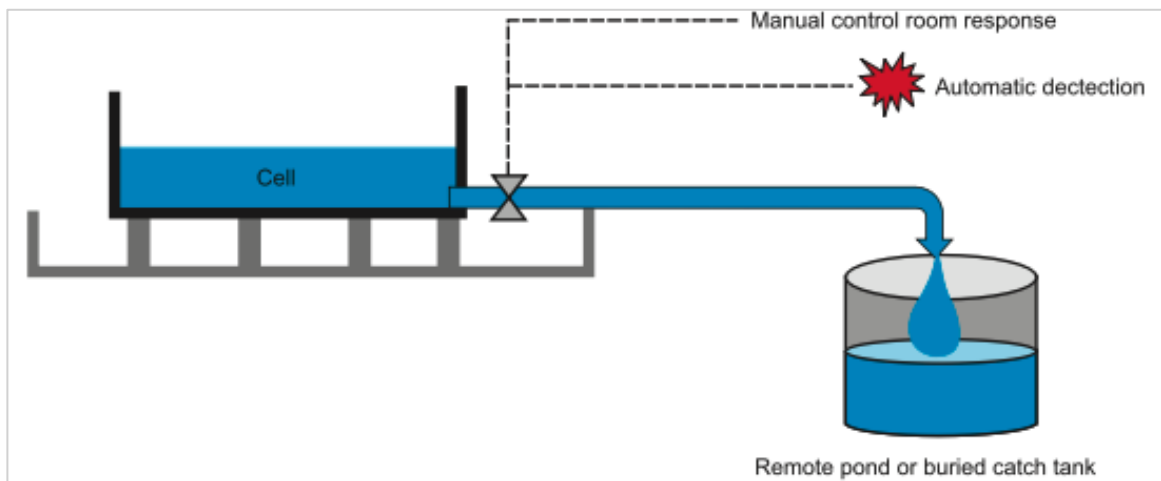


Figura 11. Sistema de drenaje de emergencia hacia tanques colectores - FM DATA SHEET

0712