

**Universidad de Matanzas
Sede “Camilo Cienfuegos”
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química**



TRABAJO DE DIPLOMA

Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico

TITULO: Determinación de la probabilidad del efecto dominó de accidentes de incendio en el almacenamiento de hidrocarburos usando técnicas integradas de inteligencia artificial.

Autor: Orelvis González Gómez

Tutor: MSc. Ing. Julio Ariel Dueñas Santana

Consultante: Dr.C. Ing. Jesús Delfín Luis Orozco

Matanzas, Cuba 2021

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Orelvis González Gómez, declaro que soy el único autor de este Trabajo de Diploma y lo pongo a la disposición de la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas, para hacer uso del mismo con el objetivo y finalidad que se estime conveniente, siempre que se respeten mis derechos como autor.



Orelvis González Gómez

“If you don’t invest in risk management, it doesn’t matter what business you are in, it’s a risky business”

Gary Cohn

DEDICATORIA

A mis padres

A mi hermano

A mi esposa

A mis suegros

A mi tutor

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Belkis y a mi padre Idalberto por ser ejemplos de inteligencia, constancia y sacrificio, por siempre estar presente en todo momento, por su apoyo y amor incondicional.

A mi hermano Elvis por su confianza y apoyo siempre que lo necesito, por su amor, cariño y por formar parte de vida.

A mi esposa Bibiana por su confianza, presencia incondicional y paciencia, por ser ejemplo de inteligencia, esfuerzo y sacrificio, por siempre apoyarme y darme ánimos. Por su amor y cariño siempre.

A mis suegros Rudbeckia y Adolfo y a mi cuñada Camelia, por estar presente y darme su apoyo siempre que lo necesito, por su siempre confianza y amor.

A mi tutor Julio por ser el motor impulsor de esta tesis, por su confianza, paciencia, sabiduría, profesionalidad, brillantez y maestría en todo momento, por ser ejemplo de inteligencia, perseverancia y sacrificio, por darme la oportunidad de formar parte de su equipo y de entrar en el maravilloso universo de la investigación, por ser maestro y amigo.

A mis compañeros, que formaron parte del equipo trabajo y a los que formaron parte del equipo de estudio en estos años de carrera.

A los demás miembros de mi familia que de una forma u otra me apoyaron y estuvieron presente en esta maravillosa etapa.

A todos los profesores que han formado parte de mi formación como ingeniero químico, en especial a la profesora Ena y a los profesores Julio, Orozco y Luis.

A Lily por su especial ayuda, siempre con cariño en todo momento que fue necesario.

Gracias a todos.

Resumen

En esta investigación, desarrollada en la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas, Cuba. Se determina la probabilidad del efecto dominó, provocado por accidentes de incendio. Para esto se combinan técnicas clásicas de análisis de riesgo con técnicas de inteligencia artificial. Primeramente, se realiza un análisis bibliográfico, quedando como el escenario más probable a detonarse en el almacenamiento de hidrocarburos, el incendio de charco de fuego. Se determinan las características de este escenario con el uso del *software* ALOHA, donde se obtiene el vector de escalado por radiación térmica y se aplican modelos Probit para obtener las probabilidades de escalado entre las unidades del área de estudio. Se desarrollan técnicas clásicas como el análisis histórico de accidentes y árbol de eventos para obtener la frecuencia del escenario de charco de fuego. Posteriormente se aplican cuatro combinaciones de técnicas de inteligencia artificial, entre las que se encuentran: las redes Bayesianas ordinarias y dinámicas, redes Petri probabilísticas y lógica difusa con criterio de expertos. Finalmente se determina, que a partir de un charco de fuego en tanque 17, el tanque 16 es el más probable a fallar y provocar un escenario de incendio, siendo el mismo tanque 16 el más probable a propagar el efecto dominó, además se obtuvo una la probabilidad conjunta del efecto dominó de $1,0055E-04$, valor considerado alto. La combinación de lógica difusa con criterio de expertos - red Petri probabilística - red Bayesiana, es la más completa por concepto de probabilidad de falla y del efecto dominó, mientras la lógica difusa con criterio de expertos y red Bayesiana dinámica es la más recomendable para evaluar la evolución en el tiempo del escenario de incendio y del efecto dominó detonado por el mismo.

Abstract

This research is developed in the Territorial Fuel Marketing Division of Matanzas, Cuba. The main aim of this study is the determination of the domino effect probability due to fire accidents. For this purpose, classical risk analysis techniques are combined with Artificial Intelligence techniques. Firstly, a bibliographic analysis is carried out, addressing the pool fire as the most likely scenario to detonate domino effect in the hydrocarbon storage. Moreover, the characteristics of this scenario are determined using the ALOHA software. Next, the escalation vector by thermal radiation is obtained and Probit models are applied in order to obtain the escalation probabilities among the units of the study area. Furthermore, classical techniques such as the Past Event analysis of accidents and the Event Tree are developed in order to obtain the frequency of the pool fire scenario. Subsequently, four combinations of Artificial Intelligence techniques are applied: ordinary and dynamic Bayesian networks, Probabilistic Petri nets and Fuzzy Logic using expert criteria. Finally, it is determined that from a pool fire in tank 17, tank 16 is the most likely to fail and cause a fire scenario, with tank 16 being the most likely to spread the domino effect, the joint probability of the domino effect is $1,0055E-04$, a value considered high. As main results, the Fuzzy logic with expert criteria - Probabilistic Petri network - Bayesian network, is the most complete combination due to the resulting failure probabilities; while Fuzzy logic with expert criteria and Dynamic Bayesian network is the most recommended one to evaluate the evolution over time of the fire scenario and its domino effect.

Índice

Tabla de contenido

Introducción	1
Capítulo 1: <i>Análisis Bibliográfico</i>	4
1.1- Características de los accidentes de incendio y explosión que se pueden manifestar en el almacenamiento de hidrocarburos	4
1.2- Características y definición del efecto dominó de accidentes de incendio y explosión	8
1.3- Análisis histórico de carácter continuado de accidentes de incendio y explosión	11
1.4- Metodologías y técnicas de análisis de riesgo que se utilizan en la cuantificación de la probabilidad del efecto dominó.....	12
1.4.1- Características de las técnicas clásicas de análisis de riesgo utilizadas en la cuantificación del efecto dominó	12
1.4.2- Características de las técnicas de inteligencia artificial de análisis de riesgo utilizadas en la cuantificación del efecto dominó	16
1.5- Conclusiones parciales	23
Capítulo 2: Materiales y métodos	24
2.1- Etapa 1: Selección de la unidad de proceso	26
2.2- Etapa 2: Simulación de escenarios de incendio.....	26
2.3- Etapa 3: Cuantificación de la frecuencia inicial del escenario	27
2.3.1- Determinación de la probabilidad de ignición	27
2.4- Etapa 4: Determinación de la probabilidad de escalado	28
2.5- Etapa 5: Desarrollo de combinaciones de las técnicas de inteligencia artificial más usadas.....	30
2.5.1- Etapa 5.1: Conformación de la red Petri probabilística y de la red Bayesiana.....	31
2.5.3- Etapa 5.3: Aplicación de la lógica difusa con criterio de expertos, conformación de la red Petri probabilística y de la red Bayesiana	40
2.5.4- Etapa 5.4: Aplicación de la lógica difusa con criterio de expertos, conformación de la red Bayesiana dinámica	40
2.6- Etapa 6: Determinación de las secuencias dominó más probables	42
2.7- Etapa 7: Comprobación de los resultados obtenidos. Validación a partir de los resultados reportados en la literatura especializada	43

Capítulo 3: Análisis de los resultados	45
3.1- Análisis de los resultados del <i>software</i> ALOHA (Etapas 1-2).....	45
3.1.1- Análisis del alcance de la simulación del escenario charco de fuego	49
3.2- Resultados de la cuantificación inicial de cada escenario y de la probabilidad de escalado (Etapas 3-4)	53
3.2.2- Resultados de la probabilidad de escalado del escenario de charco de fuego.....	56
3.3- Resultados y análisis de las cuatro combinaciones de técnicas de AI aplicadas (Etapas 5-6).....	58
3.3.1- Resultados de la combinación de red Petri probabilística con red Bayesiana (Variante 1)	59
3.3.2- Análisis de resultados de la combinación de lógica difusa con criterio de expertos y red Bayesiana (Variante 2)	66
3.3.3- Combinación de la lógica difusa y criterio de expertos con red Petri probabilística y red Bayesiana (Variante 3)	71
3.3.4- Análisis de resultados de la combinación de lógica difusa con criterio de expertos y red Bayesiana dinámica (Variante 4)	75
3.4- Comparación de técnicas de AI aplicadas según los resultados obtenidos (Etapa 7) ...	80
3.5- Conclusiones parciales	84
Conclusiones	86
Recomendaciones	87
Referencias:	88
Anexos.....	102

Introducción

Desde las últimas décadas las construcciones de instalaciones industriales de hidrocarburos inflamables han contado con mayores complejidades en su infraestructura, todo esto con el objetivo de lograr mayores capacidades de producción y almacenamiento, para así poder suplir una demanda cada vez mayor pero necesaria para la producción de derivados y usos como combustible.

Las vulnerabilidades en estas áreas de almacenamiento de hidrocarburos hacen que sean más propensas la ocurrencia del efecto dominó (Ding *et al.*, 2020). Aunque los modelos para la evaluación del efecto dominó son exigentes debido a la complejidad de su evolución y al alto nivel de detalle en los datos requeridos (Alileche *et al.*, 2015; Reniers y Cozzani, 2013), se es necesario e imprescindible lograr predecir y entender el comportamiento de este tipo de accidentes. Uno de los aspectos más importantes del análisis de riesgo, es la identificación de eventos que pueden iniciar un escenario de falla o una secuencia de accidentes (Schüller *et al.*, 2005). El escenario de charco de fuego es uno de los eventos primarios más propensos a ocurrir en estas áreas y además tiene la capacidad de provocar accidentes de efecto dominó (Yang *et al.*, 2020).

En Cuba, se hace aún más necesario llevar a cabo con mayor rigurosidad el análisis de riesgo en industrias como la que se estudia y se analiza en esta investigación, principalmente debido a que es un país bloqueado y el acceso a equipos industriales y tecnologías avanzadas está limitado y con altos costos de adquisición, en caso de detonarse un accidente de efecto dominó, este traería grandes pérdidas económicas, debido principalmente a la destrucción que pudiera provocarse en los equipos e instalaciones de la planta. Por lo que el conocimiento para prevención de fallas, con la aplicación de metodologías como la que se emplea en esta investigación, también cuentan como una barrera más ante este tipo de situaciones.

En esta investigación se lleva a cabo un análisis de riesgo cuantitativo y cualitativo, el cual está basado e integrado por simulación de escenarios de incendio, cálculos frecuenciales y probabilísticos y donde se incluye además del análisis histórico de accidentes y el árbol de eventos como técnicas clásicas de análisis de riesgo, técnicas de inteligencia artificial tales como: la red Bayesiana, la red Petri y el criterio de experto en conjunto con la lógica difusa, las

cuales han mostrado durante los últimos años sus fortalezas para ser aplicadas a este tipo de análisis y dejando claro su superioridad frente a las técnicas clásicas, aunque las combinaciones de ambos tipos las hace aún más certeras.

Esta investigación se lleva a cabo con el uso de datos reales y está basada en información metodológica actualizada y validada por la literatura especializada, con el objetivo de obtener la probabilidad de ocurrencia del efecto dominó capaz de detonarse a partir del escenario de charco de fuego como evento primario en la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas, Cuba, combinando técnicas clásicas y de inteligencia artificial.

Todo esto parte con la intención de disminuir la iniciación de escenarios de incendios y el desarrollo de posibles accidentes de efecto dominó, los cuales son capaces provocar accidentes catastróficos en la industria química, dejando daños irreparables al medio ambiente circundante, además de aprovechar las capacidades tecnológicas y analíticas de *softwares* tales como: ALOHA, MARPLOT, MatLab y HUGIN, mejorando la precisión y aumentando la fiabilidad de los resultados.

Con el desarrollo de la metodología aplicada en esta investigación, se pretende mejorar el manejo y la gestión de riesgo de industrias que manipulan materiales inflamables, ya que estas son más propensas a que ocurran escenarios de incendio que pueden resultar en la detonación de accidentes de efecto dominó. Además de ser esta, una metodología reproducible, con la posibilidad para poder ser aplicada a cualquier industria de este tipo.

Para el desarrollo de esta investigación se formuló como **problema científico**: ¿Cómo determinar la probabilidad de ocurrencia del efecto dominó de accidentes de incendio que mejor refleje la realidad de este fenómeno en el almacenamiento de hidrocarburos?

Para la solución de este problema se plantea como **hipótesis**: Si se combinan técnicas de Inteligencia Artificial (AI) con otras clásicas de análisis de riesgo, se podrá cuantificar la probabilidad de ocurrencia del efecto dominó más real en el almacenamiento de hidrocarburos.

Por lo que el **objetivo general** es: Pronosticar la probabilidad del efecto dominó de accidentes de incendio en el almacenamiento de hidrocarburos que mejor refleje la realidad de este fenómeno.

Y a partir de la definición del objetivo general se plantean los siguientes **objetivos específicos**:

- 1- Pronosticar el alcance de accidentes de incendio, así como el correspondiente al carácter continuado de los mismos.
- 2- Determinar la combinación de técnicas de Inteligencia Artificial (AI) con otras clásicas de análisis de riesgo más real para la cuantificación de la probabilidad del efecto dominó.
- 3- Cuantificar la probabilidad del efecto dominó a partir del modelo híbrido propuesto en un área de almacenamiento de hidrocarburos.

Esta investigación cuenta de tres capítulos: se inicia con un análisis bibliográfico donde se expone todo lo relacionado a incendio y explosión en la industria de hidrocarburos, además de la presentación y análisis de las técnicas clásicas y de inteligencia artificial más usadas en el análisis de riesgo; en el capítulo dos se presenta la metodología y se explica cómo debe ser desarrollada cada una de sus etapas; en capítulo tres se expone y se analiza a profundidad todo lo relacionado a los resultados obtenidos a partir de la metodología propuesta.

Capítulo 1: Análisis Bibliográfico

En el presente capítulo se abordan temas de importancia relacionados con el efecto dominó que son necesarios para el desarrollo de este trabajo. Se detallan: los escenarios de incendio y explosión más probables a detonarse en el almacenamiento de hidrocarburos, definiciones del efecto dominó, casos históricos de accidentes relevantes y metodologías de técnicas clásicas y de inteligencia artificial más usadas en el análisis de probabilidad de ocurrencia del efecto dominó.

1.1- Características de los accidentes de incendio y explosión que se pueden manifestar en el almacenamiento de hidrocarburos

En el almacenamiento de hidrocarburos, existe un elevado peligro potencial de accidentes de incendio y explosión, los cuales son capaces de causar grandes daños a la vida, al ambiente y la economía. Por lo que es de vital importancia su conocimiento y caracterización para un mejor manejo de estos. En este epígrafe se exponen las principales características de los accidentes que se pueden detonar en el almacenamiento de hidrocarburos, así como las condiciones y formas en que se manifiestan los mismos.

Los charcos de fuego son de los accidentes más frecuentes en la industria de procesos, siendo la tasa de quema de la masa de combustible y la altura de la llama las dos características que más se deben tener en cuenta para su análisis. Los incendios de charco de fuego múltiples, que generalmente se denominan como la quema interactiva de dos o más charcos adyacentes, pueden causar aumentos de la velocidad de combustión y altura de la llama en comparación con una sola (Salvagni *et al.*, 2019; Shi *et al.*, 2019; Wan *et al.*, 2019), este fuego fusionado generalmente implica una quema intensa y un comportamiento del fuego más dinámico, con la misma área debido a la convección y a la fuerte radiación térmica (Wang *et al.*, 2015). Mayormente los charcos de fuego ocurren como resultado de una ignición retardada, permitiendo que el combustible líquido liberado se propague y forme un charco de área fija antes de que se incendie y se convierta en un charco de fuego (Loy *et al.*, 2017). Según Khakzad y Reniers (2015), teniendo en cuenta tanques de almacenamiento atmosféricos de petróleo crudo, el escenario de accidente más creíble se identifica como una gran liberación de petróleo

que conduce a un incendio de charco de fuego. Según Budd y Ugwuz (2019) y Yang *et al.* (2020) un incendio de charco de fuego, se define como un incendio turbulento y difusivo que ocurre en un charco horizontal de combustible líquido inflamable, debido a una fuga en el recipiente, pudiendo a ver sido dañado por otros accidentes como una explosión de nube de vapor (VCE).

Según Zhu *et al.* (2017) los accidentes ocurridos en los últimos años en plantas de procesos químicos que han demostrado su capacidad para ocurrir tanto, en la preparación, utilización, almacenamiento, transporte y eliminación de productos químicos peligrosos, son las explosiones de nubes de vapor (VCE). Según Jin y Jang (2020) el número real de estas explosiones es infinito y esto se explica por la aleatoriedad de las variables asociadas con las liberaciones de hidrocarburos y el cambio constante de las nubes durante estas liberaciones.

En la mayoría de los casos los VCE ocurrirán por fugas durante el transporte, almacenamiento de hidrocarburos inflamables, corrosión de tuberías, daños en la construcción de recipientes, mal manejo por parte de los operadores y otros riesgos potenciales, estas ocurren mayormente tras la fuga de un gas o vapor inflamable el cual se dispersará en el aire hasta formar la nube de vapor, aunque la dispersión de la nube por sí sola no causa daño estructural, la existencia de una fuente de ignición inmediatamente después de ser liberada la sustancia podría provocar una bola de fuego de explosión, mientras que es más probable que produzca un VCE cuando se retrasa la ignición, dejando graves daños principalmente por la onda expansiva que esta provoca (Celano y Dolsek, 2020; Wang *et al.*, 2019).

Muchos factores influyen en la evolución y la intensidad de un VCE, incluido el tipo y la cantidad de la sustancia inflamable liberada, el tiempo de ignición retardado (DTI), la posición y el número de fuentes de ignición en el área afectada. La ignición puede tener lugar si la concentración de gases inflamables se encuentra dentro de los límites de inflamabilidad (entre el límite de inflamabilidad inferior y el límite de inflamabilidad superior) y si hay una fuente de ignición presente para suministrar la energía requerida (generalmente de 10 J) (C. Chen, N. Khakzad, *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020; Sharma *et al.*, 2019). Según Birk (2017) las VCE tiene el potencial de generar presiones de choque mucho más altas que las de un BLEVE típico. El anexo 1 muestra según Hailwood *et al.* (2009) la clasificación de VCE dependiendo del lugar donde se origine.

A criterio del autor según el anexo 1, estos dos tipos de VCE, aunque difieren de su forma de desarrollarse, ambas tienen la particularidad de ser extremadamente peligrosas y con un alto nivel de destrucción, aunque las VCE puede generar presiones mayores que las UVCE, causando daños mayores.

La bola de fuego es otro de los grandes peligros que son capaces de afectar grandes áreas por sus peligrosas características.

Según Celano y Dolsek (2020) una bola de fuego (FB) es causada por la combustión lenta y laminar de una nube inflamable y puede causar la muerte por la radiación de calor que esta emite. Según Wang *et al.* (2019) y Wang *et al.* (2020) una característica común de todas las bolas de fuego es que la mayor parte del combustible se quema en unos pocos segundos y a pesar de emitir un tremendo efecto térmico y energía radiante, por su corta existencia tienen muy pocas probabilidades de generar efecto dominó, aunque si provocaría quemaduras en la piel, la retina o incluso daños fatales a personas dentro un cierto rango, así como una seria destrucción a los alrededores, edificios y al medio ambiente. Según Hemmatian *et al.* (2015) el poder emisor de la superficie de las llamas depende del combustible y suele ser significativamente mayor que el de un incendio de charco de fuego, ya que prácticamente toda la superficie de la bola de fuego está cubierta por llamas brillantes. Según Sellami *et al.* (2018) para predecir los efectos de la bola de fuego, es necesario evaluar sus características, como son el diámetro, tiempo de vida, altura y la radiación térmica.

El equipamiento más común para plantas de proceso incluye recipientes a presión que pueden ser de diferentes formas (cilíndrico horizontal, cilíndrico vertical y esférico), las explosiones más frecuentes en tanques presurizados, se relacionan con el fenómeno de explosión de vapor por expansión de líquido en ebullición (BLEVE). El BLEVE es una explosión de un recipiente presurizado que va acompañada de un efecto de fragmentación, que puede poner en peligro a objetivos a grandes distancias, causando a menudo una cadena secuencial de efectos dominó (Djelosevic y Tepic, 2019).

La liberación repentina puede ocurrir debido a fallas de contención inducidas por ataque térmico, accidentes de tránsito, defectos de fabricación y sobrecalentamiento, en los casos en que las tensiones de presión en la pared del tanque excedan el nivel requerido para propagar

una grieta, el recipiente sufrirá TLOC (total pérdida de contención) y finalmente un BLEVE. Este proceso es considerado como una explosión física, lo que significa que un amplio rango de contenidos criogénicos o presurizados como el CO₂ licuado y el agua de caldera también sufrirán este tipo de explosión (Duan *et al.*, 2020). Esto puede suceder incluso si el recipiente está equipado con protección activa o pasiva y con válvulas de alivio de presión, además puede ocurrir casi inmediatamente o después de más de una hora desde el inicio del fuego. Un BLEVE es solo una explosión mecánica, sus efectos son explosiones y fragmentos proyectados y no una bola de fuego, aunque si el material liberado por el BLEVE es inflamable, generalmente se producirá una bola de fuego inmediatamente después de la explosión (Hemmatian *et al.*, 2015).

En los casos de la existencia de un agujero en una tubería presurizada, el fluido se liberará a una velocidad muy alta provocando lo que se conoce como chorro de fuego en caso de que existiera una fuente de ignición. Los chorros de fuego están asociados a flujos de calor muy altos a medida que arrastran una gran cantidad de aire y la combustión es mucho mejor que la de otros tipos de incendios. El efecto térmico sobre un equipo determinado o una tubería será debido a la radiación térmica, si no hay contacto directo con la llama, o asociado tanto a la radiación como a la convección si hay impacto de la llama (Ramírez-Camacho *et al.*, 2015).

Cuando el evento iniciador involucra la liberación de una sustancia peligrosa inflamable, el efecto que conduce al evento dominó puede ser radiación de calor (charco de fuego, chorro de fuego), sobrepresión (explosión) o impacto de fragmento (explosión, BLEVE). Una característica típica de los incendios de hidrocarburos es el rápido aumento de temperatura, dentro de los 5 minutos posteriores al inicio del fuego, la temperatura de las llamas pueden aumentar a 900 °C o más (Spoelstra *et al.*, 2015).

A criterio del autor estos tipos de accidentes expuestos anteriormente, los cuales son los más frecuentes que se pueden apreciar principalmente en zonas de almacenamiento de hidrocarburos, tienen características devastadoras y en caso de detonarse, la mayoría pueden provocar el efecto dominó. Los escenarios que más producen efecto dominó son el charco de fuego y la explosión de una nube de vapor, ya que el BLEVE más la bola de fuego tiene muy poca duración, haciendo que el escalado tenga muy baja probabilidad. Esta investigación se centra en el análisis del efecto dominó a partir de la ocurrencia de charcos de fuego.

1.2- Características y definición del efecto dominó de accidentes de incendio y explosión

El conocimiento del efecto dominó para esta investigación es de gran importancia ya que es la clave para un desarrollo eficaz del mismo, por esto y más, en este epígrafe se exponen algunas definiciones y características del efecto dominó, así como su clasificación, la cantidad debido a incendio y explosión, y los escenarios más probables que pueden conllevar a este fenómeno.

En las áreas de la industria del petróleo la tendencia a provocarse una cascada de accidentes, o un efecto dominó, esta aumentada por la existencia de grandes tanques que almacenan productos químicos inflamables, haciendo a estos recipientes fuentes vulnerables de fuegos y explosiones (Tauseef *et al.*, 2018; J. Zhou *et al.*, 2016), las cuales se caracterizan por emitir altas temperaturas de llama y grandes flujos de calores radiantes a los objetos adyacentes, representando una gran amenaza para las instalaciones cercanas, lo que puede desencadenar aún más el escalado de accidentes, que comúnmente se conoce como el accidente dominó o efecto dominó (Zhao *et al.*, 2020). El efecto dominó convencional se refiere a accidentes en cascada provocados por incendios, ondas expansivas o proyección de fragmentos dentro de los límites de la misma planta. Algunos efectos de escalado grave pueden tener su origen en eventos externos o extenderse fuera de la planta, lo que se denomina accidente dominó externo (Hou *et al.*, 2020).

El anexo 2 muestra según Reniers y Cozzani (2013) la clasificación del efecto dominó atendiendo a la magnitud de escalado del mismo. A criterio del autor, el efecto dominó en todas sus variantes provocaría grandes daños a la planta de procesos y a sus alrededores. Dependiendo de su categoría, alcanzarán mayores distancias, causando mayores daños y fatalidades.

Los incendios son eventos primarios importantes en los efectos dominó, y casi la mitad de los efectos dominó son causados por incendios. Un incendio en un tanque de almacenamiento de hidrocarburos, dañará a tanques de almacenamiento cercanos principalmente a través de la radiación térmica (Ding *et al.*, 2019).

Varios autores han investigado y analizado a través de análisis históricos de accidentes, el efecto dominó, la presencia de eventos primarios y la frecuencia de participación de los mismos.

Según Hemmatian *et al.* (2015) a partir de encuesta histórica sobre 330 accidentes con efecto dominó, encontró que la explosión fue el evento principal en el 53% de los casos y el incendio en el 47%. Según C. Chen, N. Khakzad, *et al.* (2020) en una investigación de 224 accidentes de dominó que ocurrieron en industrias de procesos, indicó que la explosión es la causa más frecuente de efectos dominó con un 57%, siendo las VCE responsable del 84% de los efectos dominó inducidos por explosiones. Según Leite y Centeno (2017) en una revisión de la literatura de 242 accidentes en tanques de almacenamiento, ocurridos en instalaciones industriales, durante cuarenta años, mostró que los incendios y explosiones representan el 85% de los accidentes, siendo el fuego uno de los más preocupantes en tanques de almacenamiento de combustibles líquidos. Según Mashhadimoslem *et al.* (2020) entre las causas fundamentales de accidentes importantes, el 57% son incendios, el 33% explosiones y el 10% nubes de vapor, siendo los tipos de incendios más comunes: el charco de fuego (66%), el incendio repentino (29%) y el chorro de fuego (5%).

Los tipos de explosiones más frecuentes en detonar eventos de dominó son las VCE y por los incendios, el charco de fuego con un 80%, siendo el escenario más frecuente en desencadenar eventos de golpe (C. Chen, G. Reniers, *et al.*, 2020).

Los charcos de fuego son los responsables de desencadenar el 44% de todos los escenarios accidentales físicos, aumentando el riesgo del efecto dominó por la absorción directa de la llama y la radiación constante del fuego (Jujuly *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2020).

Según Necci *et al.* (2015) a partir de un estudio de accidentes, concluyó que el 27% de los casos estudiados, presentan la siguiente secuencia identificada por el análisis del árbol de eventos: desde Pérdida de Contención del Material (LOC), a chorro de fuego, a explosión. Un 11% fue desde LOC, a explosión de nube de vapor, a chorro de fuego, que en algunos casos evolucionó en una explosión o en un BLEVE. Los incendios fueron el detonante del escalado en el 43% de los accidentes considerados, siendo el charco de fuego el escenario con mayor frecuencia que resultó en un escalado.

A criterio del autor las explosiones, específicamente las VCE son las que presentan un mayor porcentaje en cuanto a probabilidad de provocar un efecto dominó y los incendios de charco de

fuego son los escenarios de incendio que más se presentan como evento primario de un efecto dominó. Sin embargo, la ocurrencia de incendios es más frecuente que la de explosiones.

La alta complejidad y las interdependencias de la infraestructura de zonas de almacenamiento de químicos industriales, hacen que sean cada vez más vulnerables a los efectos dominó (Ding *et al.*, 2020), los cuales tienden a resaltar vulnerabilidades no resueltas en la sociedad humana (Mizrahi, 2020) y ampliar el escalado de un accidente y la gravedad de sus consecuencias (Ramírez-Camacho *et al.*, 2015).

Los vectores de escalado son los efectos físico responsables de propagar el efecto dominó, entre estos: la radiación térmica, la onda expansiva e impacto de fragmentos sobre otras instalaciones son los más peligrosos (He y Weng, 2020). El efecto dominó es un evento relativamente complejo. En las últimas dos décadas, estos eventos han atraído una atención creciente en la literatura científica, existiendo diversos criterios y definiciones para estos (Swuste *et al.*, 2019). En el anexo 3 se muestran algunos conceptos y definiciones del efecto dominó propuestos por diferentes autores.

A criterio del autor, todas las definiciones mostradas en el anexo 3, abarcan algunas más que otras lo que es en sí el efecto dominó, el cual sigue siendo un tema de investigación actual, con el claro objetivo de comprenderlo mejor, a través del desarrollo de técnicas de análisis de riesgo o combinaciones de estas para un análisis más preciso en cuanto a su desarrollo y formación, logrando así un mejor control de riesgo en las industrias de procesos para así disminuir la ocurrencia de este tipo de accidentes extremadamente peligrosos. El efecto dominó es una secuencia de accidentes, los cuales tendrán manifestaciones mayores en el espacio y el tiempo, debido a un aumento del grado de destrucción que estos logran alcanzar por la combinación de varios escenarios de accidentes, características de las sustancias involucradas y condiciones ambientales propicias para su manifestación.

Se han propuesto varios enfoques diferentes para el análisis del efecto dominó, la mayoría de ellos tienen en cuenta la probabilidad de daños o en la estimación de su frecuencia, para accidentes de primer nivel donde ocurren eventos primarios y secundarios. Estos enfoques utilizan simplificaciones, como son los efectos sinérgicos los cuales generalmente no se consideran (Khakzad y Reniers, 2015; Zhou y Reniers, 2018a).

1.3- Análisis histórico de carácter continuado de accidentes de incendio y explosión

En este epígrafe se analizarán cuatro accidentes de gran magnitud ocurridos en décadas pasadas. A través de su análisis histórico se mostrarán sus principales características, las condiciones en que ocurrieron, causas, consecuencias, secuencia de accidentes y otros aspectos a destacar de los mismos, con el objetivo de analizar las secuencias ocurridas y demostrar la importancia del análisis histórico de accidentes para llevar a cabo la aplicación de técnicas de análisis de riesgo.

El análisis histórico de accidentes es una herramienta indispensable para comprender y analizar escenarios dominó, ya que brindan la posibilidad de obtener características específicas, como son: los eventos que desencadenan con mayor frecuencia una secuencia de dominó, las secuencias de escalado más frecuentes y las sustancias peligrosas más propensas a estar involucradas en estos accidentes. Además, son la única fuente de datos experimentales disponible en este campo, las cuales se pueden obtener de la literatura científica, de informes técnicos y bases de datos específicas (Necci *et al.*, 2015).

En el anexo 4, se muestra una tabla comparativa de accidentes reconocidos por causar grandes daños ambientales y pérdidas humanas. Estos accidentes ocurrieron en: el depósito de Buncefield ubicado en Reino Unido, la terminal de combustible ubicada en la zona industrial de Sitapura en la India, en Naples, Italia y en la corporación “*Caribbean Petroleum*” CAPECO, en la terminal de la planta cerca de San Juan, Puerto Rico. Se analizarán y se definirán los aspectos más importantes de los mismos.

A criterio del autor, los accidentes mostrados en el anexo 4, son representativas muestras de los grandes desastres que pueden ser desencadenados principalmente en plantas de almacenamiento de hidrocarburos inflamables, además, que los controles automatizados también pueden fallar, por lo que siempre se debe de tener en cuenta que un buen sistema de protección y la adopción de medidas de seguridad pudieran mantener controladas situaciones de este tipo. Se evidencia que la formación de nubes de vapor en almacenamientos de hidrocarburos es uno de los fenómenos más propensos a ocurrir, con alta probabilidad de ignición y devastadoras consecuencias para el medio circundante, así como su gran área de abarcamiento. La falta de automatización de controles de procesos por parte de las empresas

y la negligencia de los operarios es sin duda uno de los factores claves para la ocurrencia de este tipo de eventos.

1.4- Metodologías y técnicas de análisis de riesgo que se utilizan en la cuantificación de la probabilidad del efecto dominó

Uno de los principales objetivos del análisis de riesgo, es la obtención de datos y valores que ayuden a resolver y entender las disímiles situaciones peligrosas que se presentan en las diferentes plantas de procesos químicos, para esto se utilizan técnicas que a través del uso de metodologías, modelación y simulación de los escenarios peligrosos, ayudan a lograr dicho objetivo. Estas técnicas por sus formas de trabajo, aplicaciones y compatibilidades se dividen en dos grandes grupos: técnicas clásicas y las técnicas de inteligencia artificial, las cuales se analizarán y caracterizarán en los subepígrafes posteriores.

Entre las metodologías clásicas que se analizarán, se encuentran: el Análisis Funcional de Operatividad (HAZOP) o técnicas derivadas, el Análisis de Árbol de Eventos (ETA), Análisis de Árbol de Fallas (FTA), Análisis de Efectos de Modo de Falla (FMEA), la corbata de moño y el método Probit y por el lado las técnicas de inteligencia artificial: las redes Bayesianas (BN), las redes Petri, la simulación de Monte Carlo y la simulación de escenarios (Adedipe *et al.*, 2020; Zinke *et al.*, 2020). Según Sanchez *et al.* (2018) estos métodos requieren una información detallada como son: los datos históricos de accidentes anteriores, los cuáles no siempre están disponible.

1.4.1- Características de las técnicas clásicas de análisis de riesgo utilizadas en la cuantificación del efecto dominó

En este subepígrafe se mencionarán las principales características, así como algunas de las metodologías más usadas de las técnicas clásicas de análisis de riesgo para la cuantificación de la probabilidad del efecto dominó, además las ventajas y desventajas de estas.

Para evaluar la seguridad y confiabilidad de un sistema se utilizan diferentes métodos de Análisis Probabilístico de Riesgos (PRA). El Análisis de Árbol de Fallas (FTA) es uno de los enfoques de PRA más utilizados para estimar la seguridad y confiabilidad de un sistema. En los árboles de fallas, las conexiones lógicas entre las fallas y sus causas se representan gráficamente, estos se basan en gran medida en la identificación de eventos, rutas de falla y

conjuntos de cortes mínimos, lo cual es difícil de hacer para operaciones con un alto grado de dimensión y/o incertidumbre (Kabir y Papadopoulos, 2018; Zywiec *et al.*, 2020).

El FTA es capaz de proporcionar un análisis cuantitativo utilizando la teoría de la confiabilidad, el álgebra de *Boole* y la teoría de la probabilidad, pero es insuficiente para lidiar con comportamientos dinámicos como relaciones secuenciales y dependencias entre eventos, para esto se utiliza el árbol dinámico de fallas, el cual puede servir como una herramienta capaz de incorporar la dependencia del tiempo de las fallas de los componentes (Gascard y Simeu-Abazi, 2018; Khan *et al.*, 2015). Los árboles de fallas se pueden utilizar para calcular la probabilidad de falla de la protección contra incendios, por lo tanto, se emplean naturalmente para representar relaciones causales que conducen a la falla de las barreras de seguridad del escalado de incendios (Hu *et al.*, 2017; Zhou y Reniers, 2020). En un árbol de fallas, la falla del sistema es el evento principal, los eventos que resultan de la ocurrencia de otros eventos se denominan eventos intermedios, y los eventos que no se pueden dividir en otros eventos se denominan eventos básicos (Xiang y Zhou, 2021).

Según Fakhravar *et al.* (2017) el análisis de árbol de fallas (FTA) y el árbol de ataque (AT) son métodos convencionales en el análisis de riesgos de seguridad que investiga los riesgos relacionados con los eventos de seguridad tanto cualitativos como cuantitativos. El AT es una excelente herramienta para la lluvia de ideas, la evaluación de amenazas y se puede aplicar para analizar el riesgo que generan algunas cadenas de acciones o combinaciones de ellas.

Otra herramienta muy útil son los árboles de evento (ET), que se utilizan para modelar posibles secuencias de eventos desde un evento iniciador hasta las consecuencias asociadas, siendo un evento iniciador un evento que puede crear perturbaciones en una planta y tiene el potencial de provocar daños en el núcleo en función de los éxitos o fallos de los sistemas de mitigación pertinentes de la planta (Misuri *et al.*, 2021; Purba *et al.*, 2020).

Alileche *et al.* (2016) propone una metodología donde la evolución de cada evento iniciador se representa utilizando la técnica del árbol de eventos para determinar los resultados finales del escenario y sus frecuencias de ocurrencia. Otro uso de los ET según Necci *et al.* (2015) fue en el análisis de un total de 84 accidentes relacionados con el fuego de reactores, donde los ET

se obtuvieron a partir de los datos disponibles con la finalidad de identificar la probabilidad de escenarios dominó de primer y segundo nivel de escalado.

Los métodos más comunes utilizados en aplicaciones prácticas de evaluación cuantitativa de riesgos son el análisis de árbol de eventos (ETA) y análisis de árbol de fallas (FTA). Estos métodos han demostrado ser versátiles y útiles para modelar escenarios de accidentes, cubriendo tanto el modelado causal como el modelado de secuencia de eventos. Son relativamente fáciles de aprender y proporcionan no solo una base para la cuantificación, sino también una ilustración gráfica de las secuencias de accidentes y las relaciones causales, respectivamente. Sin embargo, ambos métodos esencialmente solo pueden modelar sistemas o secuencias estáticos (Nývlt *et al.*, 2015).

Uno de los mejores enfoques gráficos para modelar un escenario de accidentes, comenzando con las causas y terminando con las consecuencias del escenario de accidentes, es la Corbata de Moño (BT). El modelo BT se desarrolla conectando los modelos de árbol de fallas ubicado en el lado izquierdo para representar eventos básicos que conducen a un evento superior (ubicado en el centro de BT) y un árbol de eventos en el lado derecho para investigar las posibles consecuencias resultantes del evento superior, considerando la falla operativa de las barreras de seguridad. El BT proporciona una representación clara de las relaciones lógicas entre eventos básicos e intermedios que conducen a un evento superior y cómo la falla de las barreras de seguridad puede escalar el evento superior a consecuencias del accidente (Khan *et al.*, 2015; Zarei *et al.*, 2016).

La BT tiene la desventaja de ser estático y no poder adaptarse a la dinámica de los accidentes, aunque una de las fortalezas es el razonamiento deductivo para predecir las probabilidades de ocurrencia del escenario y sus consecuencias (Zarei *et al.*, 2016).

Otro de los métodos, es el Análisis de Efectos y Modo de Falla (FMEA) el cual se consideró oficialmente como una herramienta de evaluación de riesgos en la década de 1960 por la NASA. Los FMEA se utiliza para el análisis de peligros y para determinar los peores escenarios de accidentes. Posee un método de análisis cualitativo y cuantitativo utilizado para la evaluación de posibles modos de falla y su efecto (s) en un sistema. El desarrollo exitoso de un FMEA requiere que el analista incluya todos los modos de falla significativos para cada elemento o

parte contribuyente en el sistema. El FMEA es conocido como un buen punto de partida para construir un árbol de fallas (Boral *et al.*, 2019; Vileiniskis y Remenyte-Prescott, 2017).

Una metodología que, aunque por su relativa facilidad para ser aplicada al análisis de riesgo, no deja de ser eficaz para aportar datos valiosos para una investigación, es el Análisis de Operabilidad de Peligros (HAZOP).

HAZOP es un método importante para identificar peligros que pueden afectar la seguridad y operatividad de un sistema. Este método asume las desviaciones del proceso de las operaciones planificadas basándose en el uso de palabras guía. HAZID (Identificación de Peligros) identifica los peligros basándose en un diseño conceptual, a diferencia de HAZOP, el propósito de HAZOP es eliminar o minimizar los peligros potenciales en detalle; HAZOP debe manejar los peligros no resueltos en HAZID. Ambos métodos tienen similitudes; HAZOP es un método analítico para identificar los peligros individuales y dinámicos para procesos operaciones. En el HAZOP de base difusa, se presumen las posibles desviaciones de las operaciones del proceso y las palabras guía se seleccionan apropiadamente para representar las variables del proceso relacionadas con el accidente (Ahn y Chang, 2016). Según Aziz *et al.* (2018) HAZOP podría ser el método de identificación de peligros basado en escenarios más utilizado. Sin embargo, el HAZOP tradicional tiene sus limitaciones con respecto a las definiciones textuales, que pueden no estar estandarizadas para fines computacionales.

Existen varios métodos para estimar la probabilidad de daño a una unidad objetivo, entre los cuales las funciones Probit son muy populares debido a su flexibilidad, aplicabilidad y simplicidad a una amplia gama de equipos (resistencia al daño) y vectores de escalado (duración e intensidad) (Zeng *et al.*, 2019; ZhiYuan *et al.*, 2016; Zhou y Reniers, 2018a).

Mukhim *et al.* (2017) a partir de datos obtenidos del análisis de accidentes pasados, presentó una metodología basada en el método Probit para estimar la probabilidad de escalado de accidentes en las industrias de procesos químicos debido al efecto dominó. Según Wu *et al.* (2020) el tiempo entre el inicio del calentamiento de un tanque objetivo y la falla del tanque, que puede tener una duración de minutos u horas se denomina “Tiempo de Falla” (TTF) y se puede relacionar con la probabilidad de escalado a partir de un modelo Probit específico. Además según C. Chen, G. Reniers, *et al.* (2020) el análisis Probit es un método bien conocido para

evaluar la relación dosis-efecto de las respuestas humanas a sustancias tóxicas, radiación térmica y sobrepresión.

Aunque la evaluación cuantitativa de riesgos (QRA) se utiliza con mayor frecuencia en las industrias de procesos para cuantificar los riesgos de accidentes graves, la QRA para efectos dominó sigue siendo un gran desafío debido a las complejidades e incertidumbres asociadas con el escalado de accidentes (C. Chen, G. Reniers, *et al.*, 2020).

A criterio del autor la mayoría de estas técnicas tienen en común su fácil manejo para ser aplicadas a situaciones de riesgo, lo que representa una gran ventaja, aunque por la sencillez de sus estructuras, tienen la desventaja de no adaptarse a la dinámica de los accidentes, limitando su aplicabilidad y haciendo necesario suplir esto con técnicas de inteligencia artificial.

1.4.2- Características de las técnicas de inteligencia artificial de análisis de riesgo utilizadas en la cuantificación del efecto dominó

El uso de técnicas de inteligencia artificial (AI) aplicadas al análisis de riesgo, representa una gran ventaja gracias a su aplicabilidad y al acomodo de estas a diferentes tipos de situaciones, dando soluciones válidas y precisas para el manejo de las mismas; en este subepígrafe se mencionarán las principales técnicas de AI de análisis de riesgos, sus características, tipos, usos, metodologías usadas para la cuantificación del efecto dominó a través de las mismas y algunas de sus ventajas y desventajas de uso.

Con los avances tecnológicos, representar el comportamiento inteligente similar al humano es un área de investigación activa, hoy en día con el uso de la AI pueden modelarse algunas modalidades mentales (Danial *et al.*, 2018).

Las redes Petri (PN) son una herramienta o lenguaje gráfico y matemático propuesta por Carl Adam Petri en el año 1962, para el modelado y análisis de sistemas de eventos discretos (Nývlt *et al.*, 2015), a partir de entonces, se han utilizado ampliamente para modelar y analizar sistemas en diferentes campos científicos. Las PN están compuesta por lugares, transiciones y arcos, es una herramienta prometedora para modelar sistemas concurrentes, asincrónicos, distribuidos, paralelos no deterministas y/o estocásticos (Kamil *et al.*, 2019; Zhou y Reniers, 2020). Las PN estándar, también llamadas redes de transición de lugar, no involucran cualquier

concepto de tiempo y solo se puede utilizar para comprender propiedades cualitativas de un sistema. Sin embargo, las PN temporizadas se utilizan para modelar y analizar los aspectos cuantitativos, teniendo en cuenta las interacciones o los efectos desencadenantes entre las amenazas y las vulnerabilidades, algunos investigadores han empleado términos probabilísticos en la evaluación de riesgos basados en cadenas de eventos (Lee *et al.*, 2020).

Kamil *et al.* (2019) utilizó las PN como una herramienta de análisis de probabilidad avanzada para analizar la probabilidad del efecto dominó en función de la duración del accidente charco de fuego y mencionó la herramienta comercial GRIF, la cual ayuda a desarrollar un modelo basado en PN para predecir el escenario de accidente con efecto dominó.

Zhou y Reniers (2017) propusieron como una nueva metodología las PN Probabilísticas (PPN) basándose en las PN básicas, para modelar y estimar la probabilidad del efecto dominó de un VCE, considerando a las VCE como único accidente, sabiendo que el efecto de sobrepresión de estas puede conllevar a fallas de otros equipos cercanos y provocar accidentes secundarios. Zhou y Reniers (2018b) introducen una metodología basada en la PN Híbrida Coloreada Cronometrada (TCHPN) para evaluar diferentes acciones de respuesta a emergencias en función de su eficiencia para prevenir o retrasar la propagación del efecto dominó.

La amplia gama de aplicaciones de PN se debe a sus características de modelado únicas, incluida la concurrencia, la gestión de conflictos, la sincronización y el uso compartido de recursos. Sin embargo, a pesar de que han mostrado excelentes capacidades de modelado para el análisis de riesgos y seguridad, no se utilizan tan ampliamente como los métodos de diagrama lógico (FTA, ETA o BN) debido a su representación gráfica no explícita (Taleb-Berrouane *et al.*, 2020).

Otra de las herramientas que demuestran su poder para el análisis de riesgo industrial y que son ampliamente utilizada en el área de la inteligencia artificial para representar conocimiento incierto y la dependencia en sistemas probabilísticos, son las redes Bayesianas (BN) (Khan *et al.*, 2015). Las BN son un método popular para el modelado y análisis de riesgos de sistemas grandes y complejos, estas hacen uso del teorema de Bayes para actualizar la probabilidad previa de eventos dada una nueva información, llamada evidencia, siendo esta la principal

ventaja de la BN sobre técnicas lineales como: AT y FT (Amin *et al.*, 2019; Fakhravar *et al.*, 2017; Zarei *et al.*, 2016).

Una red Bayesiana es un gráfico acíclico dirigido, compuesto por nodos y arcos que representan las variables y dependencias condicionales, respectivamente. Todos los nodos se modelan utilizando tablas de probabilidad discretas (Beuzen *et al.*, 2018; Rostamabadi *et al.*, 2019; Zywiec *et al.*, 2020). Los nodos con arcos dirigidos desde ellos se denominan padres, mientras que los que tienen arcos dirigidos hacia ellos se denominan hijos. Los nodos sin padres también se denominan nodos raíz, mientras que los nodos sin hijos se conocen como nodos hoja (Khakzad *et al.*, 2017; Lee y Song, 2016).

La tabla 1.1 muestra algunas de las ventajas y desventajas de usar las redes Bayesianas de forma general en el análisis de riesgo. A criterio del autor según la tabla 1.1, las BN son una herramienta de evaluación de riesgo que proporciona grandes ventajas con respecto a otras técnicas utilizadas para este fin, ya que estas presentan una gran flexibilidad, adaptabilidad y confiabilidad, mostrando resultados más precisos y confiables.

En el anexo 5 se muestran algunas aplicaciones de las BN en el análisis de riesgo y en la cuantificación del efecto dominó. A criterio del autor según el anexo 5, las BN tienen un amplio campo de aplicaciones, tanto para el modelado, estimación, determinación y cálculo de incertidumbres de variables objetivos, además de la gran capacidad para resolver problemas relacionados con el riesgo y la seguridad industrial.

Otra modalidad de las BN, son las Redes de Creencias Bayesianas (BBN), estas son una poderosa herramienta para el modelado probabilístico y la evaluación dinámica de riesgos, utilizando un gráfico acíclico dirigido. Este método proporciona una forma útil de tratar problemas complejos debido a su capacidad para combinar métodos probabilísticos robustos con gráficos. Existen varios paquetes de *softwares* disponibles para desarrollar modelos BBN basados en datos, tales como: *AgenaRisk*, *Hugin*, *Netica*, *GeNIe* y otros que utilizan varios algoritmos como: *Naïve Bayes*, *Greedy ThickThinning*, *Bayesian Search*, entre otros (Ahmadi *et al.*, 2020; Qazi *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2019).

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas de las redes Bayesianas sobre otras técnicas de análisis de riesgo reportadas en la literatura especializada

Fuentes	Ventajas	Desventajas
<i>Zywiec et al. (2020)</i>	No es necesario comprender bien los mecanismos complejos que conducen a fallas de nivel superior antes de construir la red. Pueden modelar múltiples modos y/o causas de falla de una manera no determinista.	Su capacidad para modelar variables latentes ya que está limitada por el tamaño y la complejidad de la red.
<i>Zinke et al. (2020)</i>	Son capaces de procesar conocimientos intrínsecamente inseguros y su estructura constructiva normalmente sigue la lógica intuitiva de las evaluaciones de riesgo cualitativas. Son más flexibles en comparación con métodos alternativos como FT.	Sus requisitos matemáticos y la adquisición de datos de entrada, especialmente en los datos para probabilidades condicionales.
<i>Guo et al. (2019)</i>	Utilizan los datos precursores de accidentes registrados durante el ciclo de vida de una planta química para realizar la adaptación de probabilidad. Considera fallas dependientes.	
<i>Xin et al. (2016)</i>	Implementan conceptos dinámicos para la evaluación dinámica de riesgo y estudios de confiabilidad.	
<i>Marcot y Penman (2018)</i>	Proporcionan un marco estadístico sólido cuando hay pocos datos disponibles.	
<i>Lee et al. (2020)</i>	Consideran la relación de causa y efecto entre variables, calculando la probabilidad condicional de cada variable.	
<i>Ding et al. (2020); Eldosouky et al. (2021)</i>	Permiten la asignación de probabilidades condicionales para cada componente y su componente del siguiente nivel, lo que permite tener en cuenta el efecto de algunos componentes en el componente del siguiente nivel.	

La Red Bayesiana Dinámica (DBN) es otra extensión de la BN ordinaria, que en comparación con su antepasado ordinario, facilita el modelado explícito de la evolución temporal de un conjunto de variables aleatorias en una línea de tiempo (Khakzad, 2015; Maldonado *et al.*, 2019; Tran *et al.*, 2020; Zeng *et al.*, 2019). Las DBN no solo heredan las ventajas de las BN estáticas, sino que también revelan gráficamente los procesos de evolución temporal y espacial de las incertidumbres (J. Chen, Zhong, An, Zhu y Xu, 2018). Según Yang *et al.* (2020), con el uso de las DBN y el método Probit se puede evaluar la secuencia de propagación del efecto dominó.

Dueñas, Orozco, Furka, *et al.* (2021) propusieron un nuevo enfoque Fuzzy – Bayesiano que permite cuantificar las probabilidades de falla considerando simulaciones de escenarios, condiciones meteorológicas, efectos sinérgicos, determinación del tiempo hasta la falla, cuantificación de probabilidades de escalado, falla por disminución de resistencia mecánica, lógica difusa con criterios de expertos y red Bayesiana.

Para abordar la incertidumbre y la imprecisión relacionada con la incertidumbre basada en el conocimiento, la lógica difusa ha sido una herramienta útil, esta fue propuesta por Zadeh en 1965 y se conoce como “computación con palabras”(Markowski y Siuta, 2017). Según Zhang y Weng (2020) con un enfoque desarrollado de lógica difusa se puede estimar la probabilidad de falla por corrosión de los gasoductos, una de las propiedades a tener en cuenta para evitar el inicio de accidentes primarios del efecto dominó a partir de gaseoductos.

Luliis *et al.* (2018) utilizó el *software Simulink®*, para construir un sistema de lógica difusa, el *software Simulink®* es un entorno de diagrama de bloques para simulación multidominio, está integrado con MATLAB® y simula un sistema de inferencia difusa con el uso de un editor gráfico.

La lógica difusa de tipo 2, que es una versión extendida o generalización de la lógica difusa de tipo 1. Es capaz de proporcionar un nivel significativo de modelado de imprecisión, además ofrecer capacidades para manejar las incertidumbres relacionadas con la lingüística, teniendo en cuenta la falta de fiabilidad y la vaguedad de la información (Mittal *et al.*, 2020).

Cadini y Gioletta (2016) propusieron explorar el enfoque Bayesiano de Monte Carlo (BMC) para la estimación de integrales definidas y desarrollar un algoritmo nuevo y eficiente para estimar probabilidades de fallas pequeñas, el BMC ha demostrado en ser capaz de ofrecer mejores rendimientos que el MC convencional, aunque cita también que los enfoques basados en

simulación de Monte Carlo son costosos en términos de tiempo de ejecución y requisitos de memoria.

En el anexo 6 se muestran algunas aplicaciones de la simulación de Monte Carlo en el análisis de riesgo y cuantificación del efecto dominó. A criterio de autor según el anexo 6, la simulación de Monte Carlo tiene variadas aplicaciones y entre estas la de simular efectos dominó, aunque tiene la desventaja de ser costoso en cuanto a recursos del sistema y el tiempo para su ejecución.

La simulación de escenarios de accidentes en una herramienta valiosa y necesaria para la evaluación de riesgo industrial, debido a que nos brinda una variedad de información que no es capaz de lograrse con otros tipos de métodos; todo esto se logra a través de diferentes *softwares*.

Se han desarrollado disimiles paquetes de *softwares* para el modelado de BN, como son: *Microsoft MSBNx*, *Netica*, *Hugin*, *WinBUGS*, *BayesiaLab*, *OpenBayes*, *AgenaRisk* y *Bayesfusion* (Adedipe *et al.*, 2020). Otro de estos *softwares* es el *Risk Spectrum* ®, el cual emplea árboles de fallas y árboles de eventos para evaluar probabilidades de secuencia (Queral *et al.*, 2021).

C. Chen, G. Reniers, *et al.* (2020) usó para el análisis del efecto dominó el *software* DOMIFFFECT, el cual se utilizó para estimar los posibles peligros asociados a la pérdida de contención por explosiones, evaluar la probabilidad de diferentes escenarios del efecto dominó y estimar las posibles consecuencias.

Estudios tales como: la teoría de juegos, la simulación de Monte Carlo y el árbol de evento, no toman en cuenta la evolución temporal del efecto dominó y en cuanto a los valores de los vectores de escalado pueden obtenerse mediante el *software* ALOHA. La radiación de calor causada por el charco de fuego y la velocidad de combustión de cada tanque también pueden calcularse utilizando el *software* ALOHA (Ding *et al.*, 2020; Kamil *et al.*, 2019; Khakzad y Reniers, 2015; Rajeev *et al.*, 2019).

Según Khan *et al.* (2015) con la metodología denominada *FREEDOM* para estimar la frecuencia de accidentes dominó, se puede evaluar sistemas altamente complejos y no lineales, pero esta solo puede manejar pocos parámetros inciertos.

Según Atkinson *et al.* (2014) a través del método *Vapor Cloud Assessment* (VCA) se puede calcular la velocidad a la que aumenta el volumen de una nube de vapor durante un incidente de sobrellenado, el tiempo en el que la nube de vapor se expandirá y además se puede obtener la concentración de hidrocarburos en la nube.

Según Chen *et al.* (2019) se debe de tener en cuenta que métodos basados en Monte Carlo, la red Bayesiana y el método del árbol de eventos, para efectos dominó pueden ser demasiado complejos o llevar mucho tiempo y no ser adecuados para la gestión de la seguridad en los sitios industriales químicos de gran cantidad de instalaciones.

Los métodos adecuados y eficientes para hacer frente a los escenarios de dominó siguen siendo un problema en investigación. Esto se debe a las dificultades tanto en la evaluación técnica como en la gestión organizativa del escalado y propagación de accidentes con respecto al tiempo y el espacio, a la frecuencia extremadamente baja de dichos accidentes y a la creciente complejidad de las instalaciones industriales (Cozzani y Reniers, 2015). Incluso las herramientas avanzadas más recientes basadas en procedimientos de evaluación de riesgos cuantitativos, simulaciones de Monte Carlo, métricas gráficas y redes Bayesianas no incluyen una evaluación sistemática del desempeño de la barrera de seguridad en la prevención del escalado (Landucci *et al.*, 2017).

Kabir y Papadopoulos (2019) presentaron una revisión integral de las aplicaciones de las redes Bayesianas y las redes de Petri en las evaluaciones de seguridad, confiabilidad y riesgo de sistemas. Donde destaca la utilidad potencial de los enfoques basados en BN y PN de forma independiente o en asociación con otros enfoques para abordar muchas de las limitaciones de los enfoques clásicos existentes y las fortalezas y debilidades relativas en diferentes escenarios de aplicación práctica, señalando que el uso de métodos basados en las PN en aplicaciones de seguridad, confiabilidad y evaluación de riesgos aún es limitado.

Dueñas, Orozco, Lantigua, *et al.* (2021) desarrolló dos redes Petri probabilísticas (PPN) con el fin de cuantificar la probabilidad de ocurrencia de los escenarios de charco de fuego y VCE,

teniendo en cuenta los posibles efectos globales entre ellos, haciendo hincapié específicamente en el escenario de charco de fuego. Además, desarrolló una red Bayesiana para cuantificar las probabilidades referidas a cada nivel del escenario dominó, con la utilización del *software* Hugin © por su capacidad para modelar con precisión estas redes.

A criterio del autor las técnicas aplicadas de AI al análisis de riesgo tienen la característica común de lanzar resultados con alto nivel de exactitud y por lo tanto con cierta confiabilidad para tomar decisiones frente a los potenciales peligros que se enfrentan hoy en día en la industria de procesos, aunque cada una tienen sus desventajas. Por lo que las combinaciones acertadas de estas técnicas de inteligencia artificial con otras clásicas de análisis de riesgos permitirán representar probabilísticamente el fenómeno del efecto dominó.

1.5- Conclusiones parciales

1. Los accidentes con mayores probabilidades de detonarse en un sitio de almacenamiento de hidrocarburos son: el charco de fuego, la explosión de una nube de vapor (VCE), el BLEVE más bola de fuego y el chorro de fuego.
2. El efecto dominó tiene múltiples variables y combinaciones de accidentes que le pueden dar inicio a estos, reconociendo a el charco de fuego como el principal evento primario y a la VCE como el segundo evento detonador.
3. El análisis histórico de accidentes que involucran efecto dominó demuestra que estos accidentes han ocurrido hasta un nivel terciario de escalado y constituyen una base de datos para la validación de posibles nuevas herramientas.
4. Existe una necesidad de combinar las técnicas clásicas de análisis de riesgos como el Árbol de Eventos con otras novedosas de inteligencia artificial como las redes Bayesianas, Petri y la matemática difusa para representar de la forma más acertada posible el fenómeno del efecto dominó.

Capítulo 2: Materiales y métodos

En el presente capítulo se expone la metodología propuesta para cumplir con el objetivo general de esta investigación. Primeramente se presenta el área de estudio así como las características de las unidades de procesos y se explica el proceso de simulación del escenario de charco de fuego a partir del *software* ALOHA para cada unidad del área seleccionada, luego se explica cómo proceder para la cuantificación de la frecuencia inicial del escenario utilizando el árbol de eventos y como obtener el valor de la probabilidad de escalado del efecto dominó a partir del *software* MatLab partiendo de los valores Probit, posteriormente se dan a conocer y se explican las combinaciones propuestas de las técnicas de inteligencia artificial que se aplicarán para obtener la probabilidad y la secuencia del efecto dominó más probable. Por último, se propone el proceso de comprobación y validación de los resultados obtenidos a partir de la literatura especializada.

La metodología propuesta consta de siete etapas fundamentales, las cuales se mencionan a continuación:

- Etapa 1 Selección de la unidad de proceso.
- Etapa 2 Simulación de escenarios de incendio.
- Etapa 3 Cuantificación de la frecuencia inicial del escenario
- Etapa 4 Determinación de la probabilidad de escalado.
- Etapa 5 Desarrollo de combinaciones de las técnicas de inteligencia artificial más usadas.
- Etapa 6 Determinación de las secuencias dominó más probables.
- Etapa 7 Comprobación de los resultados obtenidos. Validación a partir de los resultados reportados en la literatura especializada.

La figura 2.1 muestra el esquema de la metodología propuesta para una mejor comprensión de las etapas a seguir:

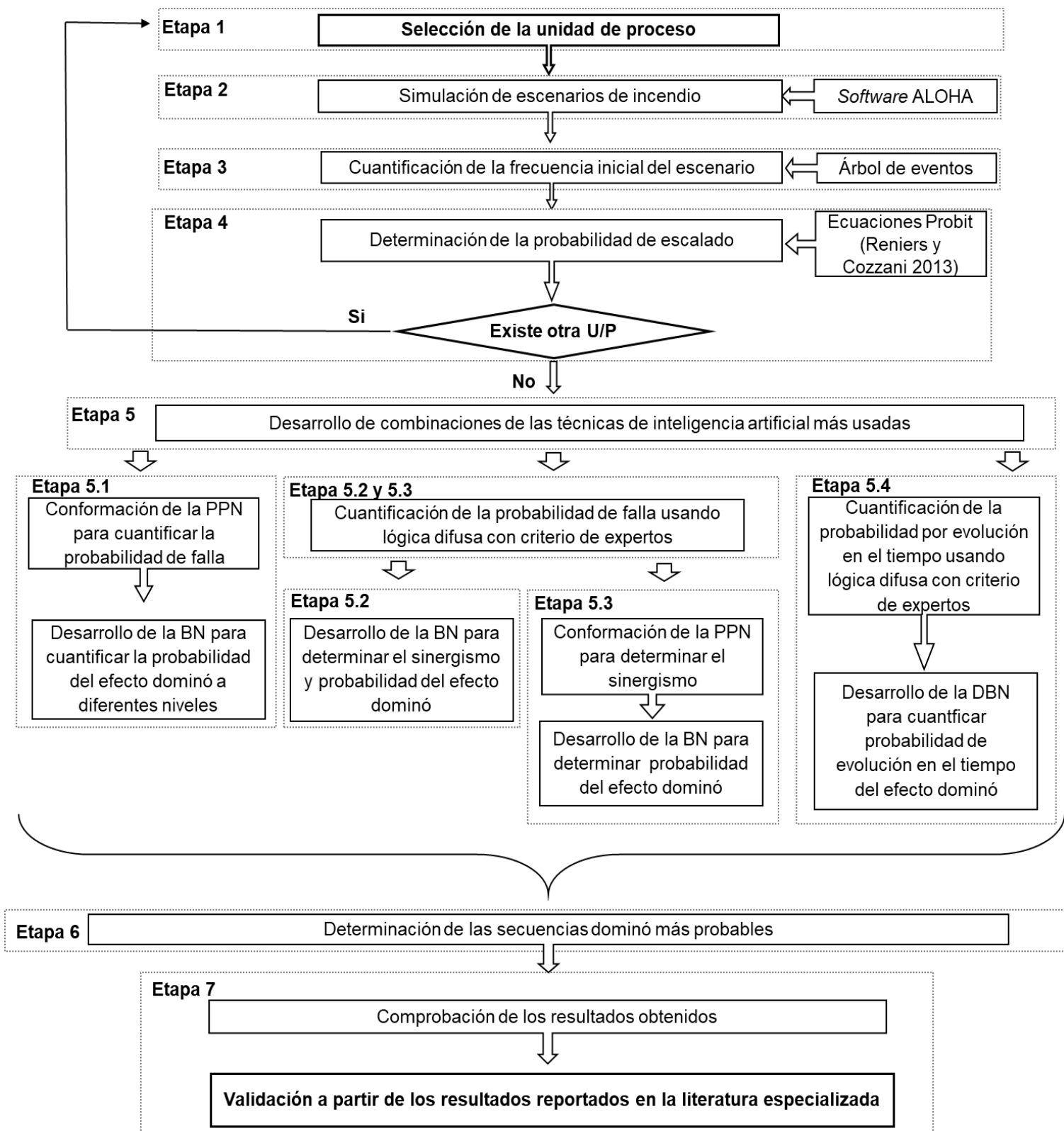


Figura 2.1: Esquema algorítmico de la metodología aplicada

2.1- Etapa 1: Selección de la unidad de proceso

La División Territorial de Comercialización de Combustibles (CUPET) ubicada la zona industrial de Versalles en el municipio de Matanzas, Cuba, dedicada al almacenamiento y trasiego de hidrocarburos inflamables fue el área escogida para el análisis, desarrollo y aplicación de la metodología propuesta; basándose en la alta probabilidad para generar accidentes relacionados con fuego y explosión, esto debido principalmente a las sustancias almacenadas en dicha unidad, las cuales tienen un de alto nivel de inflamabilidad, haciendo probable la existencia de accidentes dominó. En el anexo 7 se muestra una caracterización tecnológica de las unidades escogidas dentro de un área de dicha empresa, entre los datos mostrados, las características mecánicas de cada unidad de proceso, así como la sustancia que almacena son indispensables para la simulación en el *software* ALOHA del escenario charco de fuego.

2.2- Etapa 2: Simulación de escenarios de incendio

Esta etapa se lleva a cabo con la ayuda del *software* ALOHA, teniendo en cuenta que es un *software* reconocido y recomendado para este tipo de estudio por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio ambiente (CITMA) en Cuba. Para el uso de este *software* se debe conocer previamente ciertas limitaciones, las cuales no interfieren en el desarrollo de esta investigación.

A partir del este *software* se simularán escenarios de charco de fuego como evento primario en 17 tanques de almacenamiento de hidrocarburos a presión atmosférica. Para la ubicación de cada unidad se necesita especificar las coordenadas correspondientes, para esto se usará el mapa de *GoogleEarth* y el *software* MARPLOT (2017) se utilizará para exportar posteriormente las zonas de amenaza obtenidas de ALOHA, que según Dueñas, Orozco, Furka, *et al.* (2021) y Dueñas, Orozco, Lantigua, *et al.* (2021) funciona utilizando el Nivel de preocupación (LOC) de acuerdo con el escenario, que en este caso para la radiación térmica, ALOHA establece el siguiente LOC que se muestra en la tabla 2.1:

Tabla 2.1. LOC para la radiación térmica provocada por el charco de fuego

Zona de amenaza	Radiación térmica	Consecuencias en 60 s
	10,0 kW/m ²	Potencialmente letal
	5,0 kW/m ²	Quemaduras de segundo grado
	2,0 kW/m ²	Dolor

El principal objetivo de la simulación será obtener el vector de escalado de intensidad de la radiación térmica que afectaría a una unidad objetivo debido a la ocurrencia de un accidente de charco de fuego en una unidad primaria (evento primario), para esto se deberá de introducir determinados datos en el *software* ALOHA, los cuales se muestran en el anexo 8. A partir de estos datos se podrá obtener el vector del escalado y se podrá cuantificar la intensidad de la radiación térmica emitida por el incendio de charco de fuego desde la unidad primaria hacia unidades secundarias (otros tanques), introduciendo además como dato las distancias entre cada unidad propuesta. El valor de intensidad de la radiación térmica será mayor o menor en dependencia del volumen de la unidad y la distancia a la cual se encuentra la unidad secundaria.

La intensidad de la radiación térmica se calcula utilizando el modelo TNO para las sustancias inflamables involucradas, en ubicaciones diferentes (Rajeev *et al.*, 2019).

2.3- Etapa 3: Cuantificación de la frecuencia inicial del escenario

En esta etapa el árbol de eventos es aplicado para obtener la frecuencia inicial del escenario charco de fuego, para esto es necesario apoyarse en un análisis histórico de accidentes. Para la creación del árbol de eventos (ver anexo 9) se siguió la metodología aplicada por Bevi (2009) y Wells (1997) mostrada en el anexo 10.

Según Alileche *et al.* (2016) y Purba *et al.* (2020) un árbol de evento se utiliza para modelar secuencias de eventos potenciales desde un evento iniciador hasta las consecuencias asociadas, además de la cuantificación de la frecuencia de daños. Posteriormente de ocurrir el evento inicial se puede determinar la probabilidad del escenario de charco de fuego en cada rama. La frecuencia obtenida en esta etapa servirá de dato en etapas posteriores de la metodología mostrada en la figura 2.1.

2.3.1- Determinación de la probabilidad de ignición

La probabilidad de ignición es un factor importante en lo que se refiere a accidentes relacionados a incendio en cualquier industria donde exista sustancias inflamables o materiales combustibles, por lo que es de suma importancia estimarla y conocerla. En este subepígrafe se explica la metodología para su obtención, la cual depende principalmente de la sustancia derramada, así como del flujo liberado y las características del medio circundante. Según Bevi

(2009), primeramente se necesita categorizar los materiales de acuerdo a su inflamabilidad (ver anexo 11).

La tabla 2.2 muestra según Changlong *et al.* (2012) las ecuaciones: 2.1 para el cálculo de la probabilidad de ignición, 2.2 calcula la probabilidad de ignición debido al flujo de material derramado y la 2.3 calcula la probabilidad de ignición en función de la fuente y características de los alrededores.

Tabla 2.2. Ecuaciones para el cálculo de la probabilidad de ignición

Probabilidad de ignición	Según Changlong <i>et al.</i> (2012)	Nº ecuación
	$P_p = \text{máximo}(P_{MP}, P_Q, P_{IS}) \cdot K_{IC}$	2.1
	$\log P_{ign} = \log P_{ign.lower} + \frac{(\log Q - \log Q_{lower}) \cdot (\log P_{ign.upper} - \log P_{ign.lower})}{\log Q_{upper} - \log Q_{lower}}$	2.2
	$P_{IS} = 1 - (1 - s^2) \cdot e^{-(0,015 \cdot s)t}$	2.3

En el anexo 12 se muestra cada variable y su significado de acuerdo a cada ecuación. En el caso de la probabilidad de ignición debido al flujo se determina el valor dividiendo en segmentos de intervalos de acuerdo a los flujos máxicos. Debido a un fallo eléctrico se toma un valor de 0,8; mientras que para un incendio se toma un valor de 1. El factor decidido propuesto por los controles de ignición es de 0,25 para un control típicamente bueno en el área.

2.4- Etapa 4: Determinación de la probabilidad de escalado

Con los resultados obtenidos de intensidad de la radiación térmica en la etapa 2, se puede determinar la probabilidad de escalado del efecto dominó. Según Reniers y Cozzani (2013) la determinación de la probabilidad de escalado a partir del vector de escalado emitido por el accidente primario, es crucial para la evaluación cuantitativa del efecto dominó. En este caso, para la radiación térmica, la función Probit se basa en la estimación del tiempo de falla (tff) del tanque. El tff se evaluó en función del volumen del tanque y de la intensidad de la radiación a la que está expuesto cada tanque.

Según Reniers y Cozzani (2013) a partir de la ecuación 2.4 se obtiene el valor Probit como consecuencia de la radiación térmica para tanques en condiciones atmosféricas:

$$Y = 9,25 - 1,847 \cdot \ln\left(\frac{ttf}{60}\right) \quad (2.4)$$

Por la ecuación 2.5 se obtiene el tiempo de falla.

$$\ln(tt f) = -1,13 \cdot (I) - 2,667 \cdot 10^{-5} \cdot V + 9,877 \quad (2.5)$$

Donde:

Y: valor Probit de escalado para el escenario primario

I: intensidad de la radiación térmica (kW/m²)

V: volumen de la unidad secundaria (m³)

ttf: tiempo de falla de la unidad secundaria

A partir de los valores Probit y con el uso del *software* MatLab (2013), se obtienen los valores de probabilidad de escalado para el escenario de charco de fuego como accidentes primarios. De acuerdo a la ecuación 2.6 se puede calcular la probabilidad de escalado para el escenario de charco de fuego.

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y-5} \exp\left(-\frac{V^2}{2}\right) dV \quad (2.6)$$

Donde:

P: probabilidad de escalado

V: volumen de unidad secundaria

Y: valor Probit

2.5- Etapa 5: Desarrollo de combinaciones de las técnicas de inteligencia artificial más usadas

En esta etapa se desarrollan las cuatro combinaciones de las técnicas de inteligencia artificial propuestas en el marco de esta investigación, las cuales fueron mencionadas e investigadas en el capítulo 1. La tabla 2.3 muestra la manera en que serán combinadas estas técnicas y su objetivo en esta investigación.

Tabla 2.3. Combinaciones de las técnicas de inteligencia artificial a desarrollar y sus aplicaciones

Técnicas combinadas	Aplicaciones
Red Petri probabilística (PPN) combinada con red Bayesiana (BN)	PPN: Cuantificar probabilidad de falla BN: Determinar el sinergismo y probabilidad del efecto dominó a diferentes niveles
Lógica difusa (FL) combinada con red Bayesiana (BN)	FL: Cuantificar probabilidad de falla BN: Determinar el sinergismo y la probabilidad del efecto dominó
Lógica difusa (FL) combinada con red Petri probabilística (PPN) y con red Bayesiana (BN)	FL: Cuantificar probabilidad de falla PPN: Determinar el sinergismo BN: Determinar la probabilidad del efecto dominó
Lógica difusa (FL) combinada con red Bayesiana dinámica (DBN)	FL: Cuantificar probabilidad de evolución en el tiempo del escenario de incendio DBN: Cuantificar probabilidad de evolución en el tiempo del efecto dominó

La tabla 2.3 resume las combinaciones de las técnicas de inteligencia artificial que se usaran para cuantificar la probabilidad de ocurrencia del efecto dominó en el área de almacenamiento de hidrocarburos seleccionada. Además, resaltar que la red Bayesiana está presente en todas las combinaciones, debido a que será la encargada de cuantificar la probabilidad final del efecto dominó en cada combinación, las cuales funcionan como modelos híbridos y favorecen a disminuir las limitaciones que pudieran tener estas técnicas si se aplicaran por si solas, además de aumentar su precisión en los resultados y sus fortalezas para lidiar con la incertidumbre.

2.5.1- Etapa 5.1: Conformación de la red Petri probabilística y de la red Bayesiana

Con la combinación de estas dos técnicas de inteligencia artificial se pretende obtener la probabilidad de ocurrencia del efecto dominó como resultado final de la etapa. Tanto la red Petri probabilística como la red Bayesiana son ampliamente usadas en el área de análisis de riesgo industrial, por lo que de alguna manera garantizan la obtención de resultados válidos, aportando mejoras frente a otras técnicas clásicas de análisis de riesgo.

Según Dueñas, Orozco, Lantigua, *et al.* (2021) la red Bayesiana puede cuantificar la probabilidad del efecto dominó a diferentes niveles, mientras que la red de Petri probabilística permite la inclusión de dos probabilidades diferentes relacionadas con las probabilidades de falla o daño y la probabilidad de escalado, el anexo 13 muestra los pasos a seguir para cumplir con el objetivo de esta etapa. Las etapas desde la 1 hasta la 4 son conceptualmente iguales a la de la figura 2.1 de la metodología general de esta investigación.

En el algoritmo mostrado en el anexo 13 se reafirma la necesidad de simular, cuantificar la frecuencia y determinar la probabilidad de escalado del escenario de charco de fuego antes de la aplicación y desarrollo de las técnicas de inteligencia artificial. Además, muestra que cada etapa cumple con un objetivo claro y necesario para poder continuar a etapas posteriores.

- Conformación de la PPN para cuantificar la probabilidad de falla

Existe una variedad de tipos de redes Petri, las cuales son usadas algunas más que otras para el modelado y análisis de riesgo industrial, aportando soluciones concretas con posibilidades de ser usadas para la prevención de accidentes, los cuales pueden llegar hacer devastadores para el ambiente, la economía y la vida humana. En este subepígrafe se expone la conformación de una red Petri probabilística para la cuantificación de la probabilidad de falla debido a la ocurrencia del escenario charco de fuego en el área seleccionada.

Según Dueñas, Orozco, Lantigua, *et al.* (2021) el principal objetivo del desarrollo de una red de Petri es cuantificar la probabilidad de cada escenario, teniendo en cuenta los efectos globales de los accidentes. Una de las principales ventajas de la red Petri es que la probabilidad de un lugar se puede actualizar cuando las probabilidades de sus lugares anteriores han cambiado. Además, según Zhou y Reniers (2020) estas tienen una estructura flexible para modelar y analizar la prevención de falla por el escalado de incendios.

Para la creación de una PN es necesario especificar la unidad principal, la cual se conectará a otros lugares con la ayuda de arcos y transiciones (Kamil *et al.*, 2019).

Una PN es un grafo bipartito orientado, lo que significa que hay dos tipos de nodos, llamados lugares y transiciones conectados por arcos orientados, generalmente los lugares se representan con círculos y pueden representar un evento o una actividad y las transiciones se representan con rectángulos, barras o cuadrados según el tipo de transición, los arcos son entradas y funciones de salidas y se representan con líneas dirigidas. Un nodo no puede conectarse directamente con un nodo del mismo tipo, por lo que los arcos conectan lugares con transiciones y transiciones con lugares. Para controlar la ejecución de las transiciones existen los *tokens*, los cuales se alojan en lugares y se indican como puntos o un número, por lo que la ejecución depende del número y distribución de *tokens* en la red Petri. Una transición puede ejecutarse si está habilitada, lo cual ocurre si cada uno de sus lugares de entrada tiene al menos tantos *tokens* como arcos del lugar de la transición. Si el *token* de un lugar representa un valor de probabilidad se puede modelar la dependencia de probabilidades (Nývlt *et al.*, 2015; Zhou y Reniers, 2017).

Una red de Petri Probabilística (PPN) está compuesta por una tupla de siete variables PPN= (P, T, I, O, M, V, U), en el anexo 14 se muestra según Zhou y Reniers (2017) la tupla con más detalles.

Donde sean α_1 y α_2 las probabilidades de ocurrencia de los eventos e_1 y e_2 respectivamente y μ_1 representa la probabilidad de que el evento e_1 lleve al evento e_2 . Las probabilidades en los lugares p_1 y p_2 son α_1 y α_2 respectivamente y la probabilidad de t_1 es μ_1 . Por lo tanto, después de que t_1 se ejecuta, se coloca un *token* en p_2 y la probabilidad adjunta α_2 se puede obtener de acuerdo con la ecuación 2.7:

$$\alpha_2 = \alpha_1 \cdot \mu_1 \quad (2.7)$$

Según Zhou y Reniers (2017) si la probabilidad de un lugar se conoce se asigna un *token* al lugar correspondiente, que estará asociado con el valor de probabilidad entre 0 y 1. El anexo 15 muestra los tres tipos de modelo en que se pueden dividir las relaciones complejas entre las causas y efectos.

Según Zhou y Reniers (2017) por las ecuaciones 2.8, 2.9 y 2.10 mostradas en la tabla 2.4 pueden ser calculadas las probabilidades de salida de estos tres tipos de modelos.

Tabla 2.4. Ecuaciones para el cálculo de las probabilidades de salida para cada modelo

		Ecuación del modelo	Nº de ecuación
Tipos de modelo	1	$\alpha_g = \prod_{i=1}^k \alpha_{ji} \cdot \mu_j$	2.8
	2	$\alpha_{g1} = \alpha_{g2} = \dots \alpha_{gk} = \alpha_j \cdot \mu_j$	2.9
	3	$\alpha_g = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - \alpha_{ji} \cdot \mu_{ji})$	2.10

Para un mejor entendimiento de la metodología para la creación de la PPN, el anexo 16 muestra un esquema de los pasos a seguir para su aplicación. En esta etapa la aplicación de la PPN debe de cumplir con el objetivo de determinar la probabilidad de falla relacionada al escenario de charco de fuego en el área de estudio propuesta, además de que sus resultados contribuirán a la conformación de la red Bayesiana.

- Desarrollo de la BN para determinar el sinergismo y cuantificar la probabilidad del efecto dominó a diferentes niveles

Las redes Bayesianas actualmente han sido una de las técnicas de inteligencia artificial más usadas en las últimas décadas, contribuyendo a diferentes sectores, entre estos mejorar el manejo del riesgo y la seguridad de cualquier industria, en esta investigación específicamente las que manejan y almacenan grandes cantidades de hidrocarburos inflamables.

Para esto se dará a conocer los pasos a seguir para la creación de la red Bayesiana con el objetivo de cuantificar la probabilidad del efecto dominó a los diferentes niveles de escalado del mismo y determinar el sinergismo para el análisis de las interacciones desde punto de vista probabilístico del accidente charco de fuego. Para la creación de la red Bayesiana se dispone del *software* Hugin para su modelado y como fuente de datos se cuenta con las probabilidades finales obtenidas a partir de la aplicación de la PPN previamente expuesta.

El *software* Hugin es una herramienta de propósito general para la construcción, mantenimiento y despliegue de redes Bayesianas y diagramas de influencia. Es una de las herramientas más importantes y populares para el modelo gráfico probabilístico. Está altamente optimizada para inferencia en BN, admite la especificación manual de tablas de probabilidad condicional (CPT) y su generación a partir de expresiones matemáticas, además incluye la construcción manual de modelos y proporciona al usuario una interfaz fácil de usar para el avanzado motor de decisiones de Hugin. Por estas razones, este *software* proporciona un apoyo crucial en la evolución de la ciencia y la tecnología dentro del campo de los modelos gráficos probabilísticos (Madsen *et al.*, 2005; Weidl *et al.*, 2014).

Las redes Bayesianas proporcionan un análisis bidireccional para encontrar resultados de las causas y las causas de los resultados. En las aplicaciones del mundo real existen tres dimensiones de incertidumbre: vaguedad, ambigüedad y aleatoriedad, las BN convencionales solo abordan la incertidumbre en forma de aleatoriedad (Rostamabadi *et al.*, 2019). A pesar de esto han ganado popularidad debido a su capacidad para combinar diferentes fuentes de información para proporcionar una evaluación general de seguridad y confiabilidad, además de proporcionar métodos de razonamiento bajo incertidumbre (Kabir y Papadopoulos, 2018).

Para la confección de la red Bayesiana se siguió la metodología propuesta por Reniers y Cozzani (2013) la cual cuenta con un total de seis etapas principales, en la etapa 1 se asigna un nodo a cada unidad de proceso del área de estudio, estos son susceptibles al accidente o capaces de intensificarlo. En la etapa 2 se determinan las unidades principales donde es probable que comience el accidente dominó, este paso es equivalente a la etapa 1 de la figura 2.1. Para la etapa 3 se debe de obtener el vector de escalado (radiación térmica), este paso es equivalente a la etapa 2 de la figura 2.1, posteriormente en la fase 4.1 de la etapa 4, se identifican los posibles objetivos secundarios comparando el valor del vector de escalado con el valor umbral (15 kW/m^2 de radiación térmica para tanques atmosféricos). En la fase 4.2, se seleccionan los modelos probabilísticos de daño y se calculan los valores Probit, este paso es equivalente a la etapa 4 de la figura 2.1. En la fase 4.3 se calcula la probabilidad de escalado de las unidades secundarias potenciales dado el evento primario y en la fase 4.4 las unidades con mayor probabilidad de escalado se eligen como la unidad o unidades secundarias. En este entonces se debe dirigir un arco causal de la unidad primaria a la secundaria, mostrando que la

ocurrencia del evento secundario está condicionada por la ocurrencia del evento primario. Para la etapa 5, en las unidades secundarias se especifican los escenarios y las probabilidades de ocurrencia de accidentes. Por último, en la etapa 6, se sustituyen las unidades secundarias por las unidades primarias y se repiten los pasos del 3 al 5 para determinar las unidades terciarias potenciales y así sucesivamente. En el anexo 17 son mostradas estas etapas en forma de diagrama según Reniers y Cozzani (2013).

Una de las principales ventajas de las redes Bayesianas es su base matemática en la regla de Bayes según muestra la ecuación 2.11

$$P\left(\frac{A}{B}\right) = P(A) \cdot P\left(\frac{B}{A}\right) \quad (2.11)$$

Esto significa que la probabilidad condicional de A dado B, $P(A/B)$, es equivalente al producto de la probabilidad de A, $P(A)$, con el factor de Bayes o la relación de probabilidades, que se define como la probabilidad de B dado el evento A, $P(B/A)$, dividida por la probabilidad de B, $P(B)$. Estas características permiten la cuantificación de la probabilidad del efecto dominó en diferentes niveles de escalado (Dueñas, Orozco, Furka, *et al.*, 2021).

Según Reniers y Cozzani (2013), conociendo el patrón de propagación de un efecto dominó, se puede estimar su probabilidad de ocurrencia a diferentes niveles. Generalmente, la probabilidad del efecto dominó se calcula como la multiplicación de la probabilidad del evento primario y la probabilidad de escalado. Para que el efecto dominó se considere en el primer nivel, es necesario que el accidente en la unidad primaria se propague al menos a una de las unidades secundarias cercanas y de manera similar ocurre para los niveles siguientes.

La tabla 2.5 muestra las ecuaciones para calcular la probabilidad del efecto dominó para los dos primeros niveles.

Tabla 2.5. Ecuaciones para el cálculo de la probabilidad del efecto dominó a distintos niveles

Nivel del efecto dominó	Ecuaciones	N° de ecuación
Primer nivel	$P_{FL} = P(X_1) \cdot P(X_3 X_1)$	2.12
Segundo nivel	$P_{SL} = P(X_1) \cdot P(X_3 X_1) \cdot P(X_2 \cup X_4 X_1 \cdot X_3)$	2.13
Dónde: X_1 , X_3 y X_2 , X_4 son las unidades primaria, secundaria y terciaria respectivamente		

A través de nodos auxiliares (L_i) se representa la probabilidad de propagación del efecto dominó a un nivel determinado de escalado y los nodos (DL_i) indicarán la probabilidad del efecto dominó a ese nivel determinado. En los anexos 18 y 19 se muestra cómo deben ser usados estos nodos.

Para la confección de las tablas de probabilidad de los nodos auxiliares L_i , se debe de tener en cuenta que debe de existir al menos una unidad primaria a partir de la cual se propague el accidente a otra unidad secundaria y con respecto a los nodos DL_i estos se construyen a partir del criterio de ocurrencia del accidente en una unidad (primaria, secundaria u otras). Esto implica que para que ocurra el efecto dominó de primer nivel, no solo se necesita un evento primario sino también el evento secundario.

Para el cálculo de la probabilidad conjunta del efecto dominó (P_{DE}) hasta el último nivel de escalado (n) se procede a partir de la ecuación 2.14

$$P_{DE} = \sum_{i=1}^n DL_i \quad (2.14)$$

2.5.2- Etapa 5.2: Aplicación de la lógica difusa con criterio de expertos

En esta etapa fueron imprescindibles para el desarrollo de la cuantificación de la probabilidad de falla usando lógica difusa con criterio de expertos los artículos: Dueñas, Orozco, Furka, *et al.* (2021); Kabir y Papadopoulos (2018); Zarei *et al.* (2019).

La lógica difusa en los últimos años, ha surgido como una herramienta útil para modelar procesos que son demasiado complejos para las técnicas cualitativas convencionales o cuando la información disponible del proceso es cualitativa, inexacta o incierta (Markowski y Siuta, 2017).

- Cuantificación de la probabilidad de falla usando lógica difusa con criterio de expertos

El uso del criterio de experto y la aplicación del conjunto de teoría difusa para la cuantificación de la probabilidad de falla, deben de seguir cuatro pasos fundamentales: uso de criterio de expertos a través de términos lingüísticos, posibilidad difusa para la transformación de esos términos a números difusos, seguido por la defuzificación, proceso encargado de producir resultados cuantificables y por último la probabilidad difusa.

El criterio de expertos y el conjunto de teoría difusa (FST) se aplican para estimar las probabilidades de falla de los eventos raíz, las barreras de seguridad y las consecuencias de estos eventos, para esto es necesario conocer las probabilidades de los eventos raíz de antemano. El criterio de expertos es esencialmente una metodología de consenso científico, a menudo utilizada para calcular las probabilidades de eventos vagos. Este método es una solución para tratar incertidumbre, la falta de datos suficientes y además proporciona información útil para evaluar riesgos. Para tratar circunstancias que son vagas o mal definidas se emplea una variable lingüística, cuyos valores son palabras u oraciones en lenguaje natural o artificial. Los términos lingüísticos tienen la forma de números difusos trapezoidales. En el anexo 20 y 21 se muestran 9 términos lingüísticos para estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento y 5 términos lingüísticos para estimar la gravedad del evento respectivamente, además en el anexo 22 se muestra la escala de conversión para estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento.

El criterio de expertos en forma de expresiones lingüísticas debe ser primero transformado a números difusos para luego agregarlos a números difusos conocidos como posibilidad difusa (FP). Para esto se emplea la ecuación 2.15 conocida como grupo de opinión lineal:

$$M_i = \sum_{j=1}^m W_j \cdot A_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.15)$$

Donde:

M_i : posibilidad de falla difusa, que presenta el agregado valor difuso del evento i

W_j : puntuación de ponderación del experto j

A_{ij} : valor lingüístico obtenido del experto j sobre el evento i

m : número total de eventos

n : número total de expertos

Los factores de ponderación de los expertos se calculan de acuerdo al anexo 23. Si un experto se considera mejor que otros, se le asigna un mayor puntaje. Los puntajes de los expertos se

obtienen estimando el puntaje del peso y los factores de ponderación de los expertos a través de las ecuaciones 2.16 y 2.17 respectivamente.

$$WS_i = PP_i + ET_i + EL_i + A_i \quad (2.16)$$

$$WF_i = \frac{PE_i}{\left(\sum_{i=1}^n PE_i \right)} \quad (2.17)$$

Donde:

WS: puntaje del peso

WF: factor de ponderación

PP: puesto profesional

ET: tiempo de experiencia

EL: nivel educativo

A: edad del experto

En lógica difusa la defuzificación es el proceso de producir resultados cuantificables. Las funciones difusas triangulares o trapezoidales son las más utilizadas para representar variables lingüísticas. La ecuación 2.18 muestra cómo se define una función difusa trapezoidal.

$$X^* = \frac{\int \mu_i(x) x dx}{\int \mu_i(x)} \quad (2.18)$$

Donde:

X^* : salida i defuzificada

$\mu_i(x)$: función de pertenencia agregada

(x) : variable de salida

La ecuación 2.19 describe la función de pertenencia $\mu_{\hat{A}}(x)$ como:

$$\mu_{\hat{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ \frac{a_4-x}{a_4-a_3}, & a_3 \leq x \leq a_4 \\ 0, & x > a_4 \end{cases} \quad (2.19)$$

A partir de las ecuaciones 2.18 y 2.19 se procede a la defuzificación del número difuso trapezoidal $\hat{A} = (a_1, a_2, a_3, a_4)$, basado en el método del centro del área mostrado en el anexo 24, puede ser calculado como indica la ecuación 2.20:

$$X^* = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} x dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} dx} = \frac{1}{3} \oplus \frac{(a_4 + a_3)^2 - a_4 \cdot a_3 - (a_1 + a_2)^2 + a_1 \cdot a_2}{(a_4 + a_3 - a_1 - a_2)} \quad (2.20)$$

El último paso es convertir la posibilidad difusa (FP) en probabilidad difusa (FPr). Para esto se utiliza la función de la ecuación 2.21:

$$FP_r = \begin{cases} \frac{1}{10^K} & si \quad FP_s \neq 0 \\ 0 & si \quad FP_s = 0 \end{cases} \quad K = \left[\left(\frac{1-FP_s}{FP_s} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \times 2,301 \quad (2.21)$$

Donde:

K: constante

FPs: posibilidad difusa

FPr: probabilidad difusa para cada evento

Posteriormente, las probabilidades difusas obtenidas se asignarán como probabilidades de falla de los eventos del modelo de BN a desarrollar.

- Desarrollo de la BN para determinar el sinergismo y cuantificar la probabilidad del efecto dominó

En esta segunda parte de la presente etapa, se aplicará la misma metodología explicada en el subepígrafe 2.5.1, donde se explica el desarrollo de la red Bayesiana, aunque en este caso la BN enlaza los nodos entre sí, con el objetivo de determinar el sinergismo y cuantificar la probabilidad del efecto dominó a diferentes niveles con los nodos auxiliares DL_i .

2.5.3- Etapa 5.3: Aplicación de la lógica difusa con criterio de expertos, conformación de la red Petri probabilística y de la red Bayesiana

En este subepígrafe se combinan tres técnicas, cada una con un objetivo diferente. Primeramente, la lógica difusa con criterio de expertos para la cuantificación de la probabilidad de falla, la conformación de la PPN para determinar el sinergismo a partir de las probabilidades de falla que consideran los efectos sinérgicos de los escenarios de charco de fuego y desarrollar un análisis de las interacciones entre las unidades de proceso desde el punto de vista probabilístico del accidente charco de fuego, para esto se debe de seguir los mismos pasos explicados en el subepígrafe 2.5.1, específicamente la etapa 5 del anexo 13. El desarrollo de la red Bayesiana para determinar la probabilidad del efecto dominó y la lógica difusa, fueron explicados en el subepígrafe 2.5.2, por lo tanto, se debe de seguir la misma metodología mostrada en el mismo.

2.5.4- Etapa 5.4: Aplicación de la lógica difusa con criterio de expertos, conformación de la red Bayesiana dinámica

En esta etapa la lógica difusa es aplicada para obtener los valores de probabilidad pertenecientes a una misma unidad de proceso, debido a la evolución en el tiempo del escenario de charco de fuego en esa unidad, para eso se tienen en cuenta tres factores fundamentales: tiempo del accidente entre el tiempo de falla mínimo (TACC/TTF), probabilidad de escalado mayor provocada por radiación térmica (PERAD) y acciones de mitigación (MIT). Esos tres factores serán introducidos en el *software* MatLab, donde se obtendrá el valor de probabilidad

debido a la evolución en el tiempo del escenario de charco de fuego para una misma unidad de proceso.

Para el primer factor (TACC/TTF), si se obtiene un valor superior a dos, este se considera uno y si da menor a dos se debe de introducir en la ecuación 2.22 para obtener el valor de F.

$$F = \begin{cases} 1; W > 2 \\ -0.0129 + 0.6718 \cdot W - 1.1487 \cdot W^2 - 2.3351 \cdot W^3 + 9.0746 \cdot W^4 - 8.5519 \cdot W^5 + 3.2134 \cdot W^6 - 0.4239 \cdot W^7; W \leq 2 \end{cases} \quad (2.22)$$

El segundo factor (PERAD), es la probabilidad de escalado mayor que genera una unidad de proceso respecto al resto a las que está enlazada en ese tiempo (sea t_0 , t_1 , t_2 o t_3) de acuerdo a la estructura de la red Bayesiana dinámica (DBN). Estos dos primeros factores se deben de introducir en por ciento. Para el tercer factor (MIT) se tomó un valor de 50 para todos los casos, este valor está en función de la seguridad de la planta, fue dado después de una inspección a la misma.

Después de la programación y desarrollo de lógica difusa en MatLab, se procede a ejecutar la DBN con la ayuda del *software* HUGIN (2019), para así obtener los valores de probabilidad de la evolución en el tiempo del escenario de charco de fuego considerando todas las posibles interacciones entre las unidades del área.

El efecto dominó pueden considerarse un proceso dependiente del tiempo. Por lo que no solo importa la identificación de las unidades involucradas, sino también su vinculación temporal en la cadena de accidentes. En el caso de incendios inducidos por accidentes dominó generalmente pueden durar mucho más en comparación con las explosiones, por lo que es posible prever la evolución temporal del efecto dominó y predecir la secuencia más probable de accidentes o de las unidades involucradas en el efecto dominó. El motor de razonamiento y aprendizaje de la DBN permite tener en cuenta durante un potencial efecto dominó las dependencias del tiempo y las interacciones complejas entre las unidades de una planta de proceso, además de facilitar los análisis tanto de pronóstico como de diagnóstico (Khakzad, 2015).

La DBN revela gráficamente los procesos de evolución temporal y espacial de las incertidumbres. Dividiendo una línea de tiempo en varios intervalos de tiempo, la DBN permite

a un nodo en el i -ésimo segmento de tiempo ser condicionalmente dependiente no solo de sus padres del mismo segmento de tiempo, sino también de sus propios estados en previos segmentos de tiempo, los arcos que unen los nodos de segmentos de tiempo consecutivos se denominan arcos temporales. La introducción de la evolución temporal de los vectores de escalado en el análisis de riesgo del efecto dominó, conduce a resultados probabilísticos más precisos (Chen *et al.*, 2018; Khakzad, 2015; Xin *et al.*, 2016).

Según Cozzani y Reniers (2021) la distribución de la probabilidad conjunta de una DBN puede calcularse de la misma manera que en una BN convencional, según la ecuación 2.23.

$$P(U) = \prod_{i=1}^n P(X_i | \pi(X_i)) \quad (2.23)$$

Donde $U = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ y $\pi(X_i)$ son el conjunto de nodos padres X_i

Con la aplicación de una DBN, los aspectos dinámicos y las incertidumbres temporales que surgen de la secuencia de fallas o cambios temporales pueden ser considerados (Cozzani y Reniers, 2021; Tran *et al.*, 2020).

2.6- Etapa 6: Determinación de las secuencias dominó más probables

Para la determinación de las secuencias de dominó más probables se decidió combinar la aplicación de técnicas clásicas (simulación de escenarios, modelos Probit, análisis histórico de accidentes y árbol de eventos) de análisis de riesgo y técnicas de inteligencia artificial (red Bayesiana ordinaria y dinámica, red Petri y criterio de expertos con lógica difusa), estas fueron aplicadas a un área de almacenamiento de hidrocarburos, debido a que estas son las más propensas a generar, entre otros, los escenarios de charco de fuego, accidentes a evaluar en la presente investigación y que pueden provocar mediante el vector de radiación térmica un escalado hacia unidades secundarias cercanas y de esta manera provocar un efecto dominó. Las técnicas anteriormente mencionadas, son entre todas, las más populares por su gran uso en el análisis de riesgo y sus eficientes resultados obtenidos en sus aplicaciones, sin embargo, estas presentan algunas desventajas si fueran aplicadas de manera individual, aunque sus combinaciones más que suplir deficiencias entre estas se necesitan entre si ya que son dependientes unas de las otras para una obtención de datos más precisos en su posterior aplicación.

Las frecuencias de los escenarios de charco de fuego son obtenidas por la aplicación del árbol de evento, estas frecuencias están basadas en un análisis histórico de accidentes aplicado en el área y son usadas junto con los vectores de escalado y las probabilidades de escalado obtenidas de los *softwares* ALOHA y MatLab respectivamente para identificar las unidades de proceso con mayor potencial de provocar un accidente de efecto dominó por el escalado del escenario de charco de fuego. Con esos datos recolectados, las técnicas de inteligencia artificial explicadas y citadas anteriormente pueden ser aplicadas basándose en los criterios de probabilidad, frecuencia y escalado del accidente de charco de fuego entre las unidades de procesos, para determinar así las secuencias de detonación más probables de provocar y evolucionar el accidente del efecto dominó en el área de hidrocarburos propuesta a partir de las combinaciones de estas técnicas. Estas combinaciones deben de llevar a la obtención de un mismo objetivo, donde después de que sean aplicadas, se determinará cuál de estas combinaciones es la más favorable para determinar las secuencias dominó más probables, además de la obtención de la probabilidad por la evolución en el tiempo del efecto dominó, resultado solo obtenido por la cuarta y última combinación aplicada.

2.7- Etapa 7: Comprobación de los resultados obtenidos. Validación a partir de los resultados reportados en la literatura especializada

Este epígrafe le corresponde a la última etapa de la metodología propuesta en la investigación, la cual tiene como finalidad a través de técnicas de inteligencia artificial cuantificar la probabilidad de ocurrencia del efecto dominó más real en el área de almacenamiento de hidrocarburos propuesta. Esta etapa pretende comprobar y validar los resultados obtenidos comparándolos con los de la literatura especializada, con este fin la tabla 2.6 muestra los artículos que serán de apoyo para lograr dicho objetivo.

Tabla 2.6. Literatura científica para la validación de los resultados obtenidos

Artículos	Títulos
Dueñas, Orozco, Lantigua, <i>et al.</i> (2021)	<i>Using integrated Bayesian-Petri Net method for individual impact assessment of domino effect accidents</i>
Dueñas, Orozco, Furka, <i>et al.</i> (2021)	<i>A new Fuzzy-Bayesian approach for the determination of failure probability due to thermal radiation in domino effect accidents</i>
Dueñas <i>et al.</i> (2020)	<i>How to Determine Individual Risk Due to Toxic, Fire, and Explosion Accidents in a Hydrocarbon Processing Area?</i>
Kabir y Papadopoulos (2019)	<i>Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments: A review</i>
Khakzad (2021b)	<i>A Tutorial on Fire Domino Effect Modeling Using Bayesian Networks</i>

Con respecto a los artículos mostrados en la tabla 2.6, resaltar que los tres primeros tienen basado su análisis en un área de hidrocarburos similar a la evaluada en esta investigación, criterio a tener en cuenta, ya que una vez de aplicada toda la metodología explicada en epígrafes anteriores se podrá verificar los resultados obtenidos, para así poder llegar a las conclusiones finales de esta investigación.

Capítulo 3: Análisis de los resultados

En el presente capítulo se muestran y analizan los resultados obtenidos a partir de la metodología aplicada, los más relevantes son ilustrados en figuras que expresan de una manera más resumida y concluyente los mismos, también se hace uso de tablas a través de las cuales se comparan los resultados con la literatura especializada, además se da conocer el área de estudio y las unidades de procesos involucradas con más detalles. Primeramente, se comienza con los resultados de la simulación de escenarios de charco de fuego por el *software* ALOHA, los cuales son analizados a partir del vector de escalado de radiación térmica obtenido, seguidamente se pasa a analizar el árbol de eventos del cual se obtiene la frecuencia inicial del escenario, posteriormente se agrupa y se analiza los resultados de la probabilidad de escalado obtenidos a partir de la función Probit, el *software* Matlab y la literatura especializada. Se continúa con el análisis de resultados de las técnicas de inteligencia artificial aplicadas: redes Bayesianas, lógica difusa y redes Petri probabilísticas, así como las combinaciones de las mismas. Después se realiza la comprobación y validación de los resultados basándose en los reportados en la literatura especializada y de esta manera cumplir con el objetivo de esta investigación.

3.1- Análisis de los resultados del *software* ALOHA (Etapas 1-2)

Con la ayuda del *software* ALOHA (2016) se obtuvieron resultados imprescindibles para el desarrollo de la investigación y se pudo comprobar su alta validez y facilidad de uso para la simulación de accidentes y obtención de vectores de escalado que pudieran provocar la detonación de accidentes de efecto dominó. Además de ser un *software* del cual se pueden obtener resultados en tiempo record facilitando así la velocidad de respuesta ante cualquier situación que incluya en su análisis. Específicamente para esta investigación se simularon escenarios de charco de fuego como evento primario e iniciador de accidentes dominó en 17 unidades de proceso (tanques de almacenamiento de hidrocarburos a presión atmosférica), donde se cuantificó el vector de escalado de radiación térmica provocado por el charco de fuego en cuatro momentos del día para condiciones ambientales y climatológicas diferentes: dirección, velocidad del viento (ver anexo 25), humedad del aire (ver anexo 26) y temperatura del aire (ver anexo 27) (máxima de 29,50°C y mínima de 19,50°C) para un total de 68 corridas

mostradas en el anexo 28. En relación con las sustancias involucradas en la investigación se hizo necesario aplicarles el método del carbono equivalente para poder trabajar en ALOHA, en el anexo 29 se muestran las sustancias, su equivalente y según el *software* CAMEO *Chemicals* (2016), su temperatura flash. Para estas sustancias existe una alta probabilidad de inflamabilidad por lo que la posible existencia de graves accidentes siempre está presente.

Para más detalles y mejor comprensión, en el anexo 30 se muestra el área de estudio, con la posición de cada unidad de proceso y su numeración identificativa. Esta se decidió dividir en tres subáreas 1, 2 y 3, según lo mostrado en el anexo 30, las mismas están delimitadas por líneas discontinuas blancas; resaltar además que por el tipo de sustancia que se almacena en esta área, se aumentan aún más probabilidades de provocar escenarios de charco de fuego en caso de derrame, además de encontrarse almacenadas en grandes cantidades, aumentando así la magnitud del escenario, pudiendo provocar un accidente dominó más severo.

Para mejor comprensión de la relación de cada sustancia involucrada y su potencial de provocar un accidente, los anexos 31 y 32 muestran el escenario más probable a manifestarse en dependencia de la sustancia involucrada y del tipo de accidente a ocurrir debido a incendio o explosión (Casal *et al.*, 2002; Gyenes *et al.*, 2017), a partir de estas se evidencia que todas las sustancias involucradas en esta investigación conllevan a escenarios peligrosos y letales, además de que todas pueden provocar el escenario charco de fuego.

Del *software* ALOHA se obtuvieron resultados que permitieron comprobar y analizar el alcance y gravedad del escenario de charco de fuego, del cual dependió en gran parte de las características mecánicas del recipiente, así como la sustancia que contiene. La tabla 3.1 muestra los resultados más relevantes obtenidos a partir de la simulación en ALOHA para el escenario charco de fuego. Se tomó como criterio la corrida donde se emite el mayor valor de intensidad de radiación térmica, donde coincide en: condición climatológica con viento y en condición de temperatura mínima.

Tabla 3.1: Resultados más relevantes obtenidos de la simulación en ALOHA

	Tanque/corrida	Longitud máxima de la llama (m)	Flujo de quemado (kg/min)	Cantidad quemada (kg)	Diámetro del charco (m)
Subárea 1	30/66	61	12900	766858	60,0
	38/10	43	4390	260945	35,0
Subárea 2	1/58	38	3200	190069	29,0
	4/62	38	3200	190069	29,0
	13/14	39	3230	191714	30,0
	16/42	37	2150	127960	21,0
	17/18	40	3090	184262	26,0
	22/26	39	3230	191714	30,0
	23/38	39	3230	191714	30,0
	24/2	40	3200	190069	29,0
	25/6	39	3200	190069	29,0
	26/54	37	3200	190069	29,0
Subárea 3	18/34	30	1400	83326	18,1
	19/22	24	787	46871	13,6
	20/46	25	787	46871	13,6
	21/50	25	787	46871	13,6
	74/30	26	787	46871	13,6

De la tabla 3.1 se puede concluir que el tanque con mayor diámetro de charco y longitud de la llama es el tanque 30 que contiene *fuel oil*, por lo tanto es el de mayor flujo de quemado y cantidad quemada; vale la pena resaltar de que esos valores de liberación y quemado de combustible altamente inflamable pueden causar grandes y agravantes daños al medio

ambiente circundante perjudicando tanto la vida animal, vegetal y humana. La cercanía e igualdad de resultados entre los tanques es debido principalmente a volúmenes de almacenamiento cercanos o del mismo valor.

Con los resultados ya obtenidos de la tabla 3.1 se obtuvieron valores de los cuales se pudiera decir que son el principal objetivo de esta simulación, para esto se introdujeron como datos las distancias entre las unidades de procesos (ver anexo 33) y se obtuvieron los valores asociados al vector de escalado, cuantificando así la intensidad de la radiación térmica (ver anexo 34) provocada por el escenario charco de fuego como evento iniciador de accidentes de efecto dominó para cada unidad evaluada con respecto a las otras.

De acuerdo con Khakzad y Reniers (2015) para que un vector de escalado cause daños agravantes a una unidad objetivo su magnitud no debe ser menor que sus respectivos valores umbrales, de ser así la probabilidad de daño se consideraría insignificante, por lo que en su estudio solo considera los vectores de escalado que exceden el valor umbral predefinido. Reniers y Cozzani (2013) proponen valores umbrales de intensidad de la radiación térmica provocada por charco de fuego, que este caso sería de 15 kW/m^2 para tanques atmosféricos. En el anexo 35 se muestra separados por subáreas los tanques que superaron ese valor umbral de intensidad proyectado hacia otros tanques.

Se pudo evidenciar en el anexo 35 que el tanque 18 que contiene combustible de aviación es el que mayor intensidad de radiación emite sobre el tanque 20 con $32,20 \text{ kW/m}^2$, además la subárea 3 es la que mayores valores de intensidad emitió a pesar de tener la menor cantidad de tanques en comparación con la subárea 1 y 2, esto se debe principalmente a la corta distancia de separación que existe entre estos tanques, que según Alileche *et al.* (2015) y Reniers y Cozzani (2013) se sugiere como distancia segura para el escalado de tanques atmosféricos el diámetro del charco provocado por el tanque más 50 metros, donde según la tabla 3.1 y el anexo 33, se pudo verificar que ninguno de los tanques cumple con la distancia requerida entre estos y según Landucci *et al.* (2017) en un espacio limitado entre varias unidades, un solo evento primario puede desencadenar varios escenarios secundarios simultáneamente. De manera general, diez tanques irradian valores de intensidad por encima del valor umbral de 15 kW/m^2 , esto representa aproximadamente un 58,82 % del total de los 17 tanques simulados.

Para mayor fiabilidad en los resultados se comparó con la literatura especializada donde se aplicó de igual modo la simulación en ALOHA a la misma área de hidrocarburos, donde se mostraron resultados para los tanques 18 y 30, para más detalles consultar Dueñas, Orozco, Lantigua, *et al.* (2021). La tabla 3.2 muestra el análisis para los tanques 18 y 30.

Tabla 3.2: Comparación de resultados con la literatura especializada

Subárea	Tanque	Tanque afectado	Intensidad (kW/m ²)	Intensidad (kW/m ²) según Dueñas, Orozco, Lantigua, <i>et al.</i> (2021)
1	30	17	16,3	16,8
		38	26,1	27,3
		1	15,0	15,0
3	18	19	26,6	18,9

En la tabla 3.2 quedó reflejado la proximidad de los valores obtenidos, difiriendo un poco respecto al tanque 18. De forma general son resultados bastante cercanos, los cuales aportan mayor fiabilidad a la investigación.

3.1.1- Análisis del alcance de la simulación del escenario charco de fuego

Con todo lo anterior mostrado y analizado, se decidió tomar como unidades de mayor peligro potencial para cada subárea los tanques 17, 18 y 30 para un análisis más profundo y aplicación de la metodología planteada en la figura 2.1. Estas unidades de proceso mostraron alta peligrosidad en lo relacionado a la detonación del accidente de charco de fuego, el cual es el escenario escogido a evaluar en esta investigación por su alta presencia en la detonación y escalado de accidentes del efecto dominó. Para los tanques anteriormente mencionados, se muestran dos figuras, cada una de ellas muestra resultados concluyentes y abarcadores acerca de los mismos: en una de ellas se ilustra el radio de alcance y posible escalado para el escenario de charco de fuego según lo mostrando en la tabla 2.1 y en la otra se relaciona la intensidad de radiaciones máximas para distancias dadas.

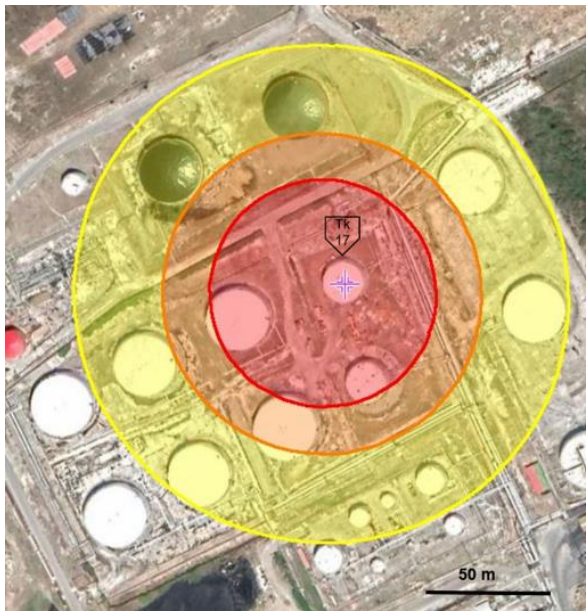


Figura 3.1a: Accidente de charco de fuego, tanque 17

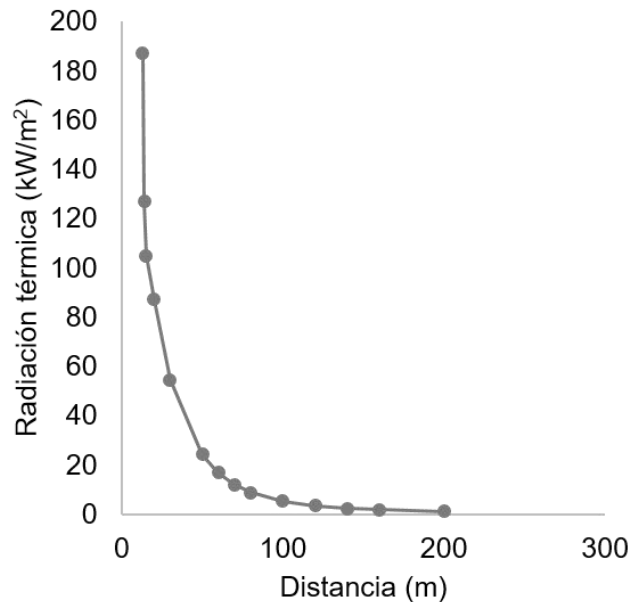


Figura 3.1b: Intensidad vs Distancia para el tanque 17

En la figura 3.1a se muestra el radio de la acción de la radiación térmica provocada por el charco de fuego simulado en ALOHA para el tanque 17, donde los tanques que se encuentran dentro del círculo rojo son los que mayor intensidad reciben, por lo tanto son los más probables a provocar un escalado para convertirse el escenario en un accidente dominó, además a pesar de tener un volumen de 4647 m³ relativamente pequeño su radio de acción abarca a la mayoría de los tanques del área de estudio, esto se debe a la céntrica posición que este se encuentra dentro del área y principalmente a la sustancia que almacena y su alta inflamabilidad, la nafta. Para la figura 3.1b se relaciona la máxima radiación con la variación de la distancia, donde se aprecia claramente que a medida que aumenta la distancia disminuye la radiación máxima desde valores de 187 kW/m² a 13m de distancia hasta llegar a valores cercanos a cero de radiación.

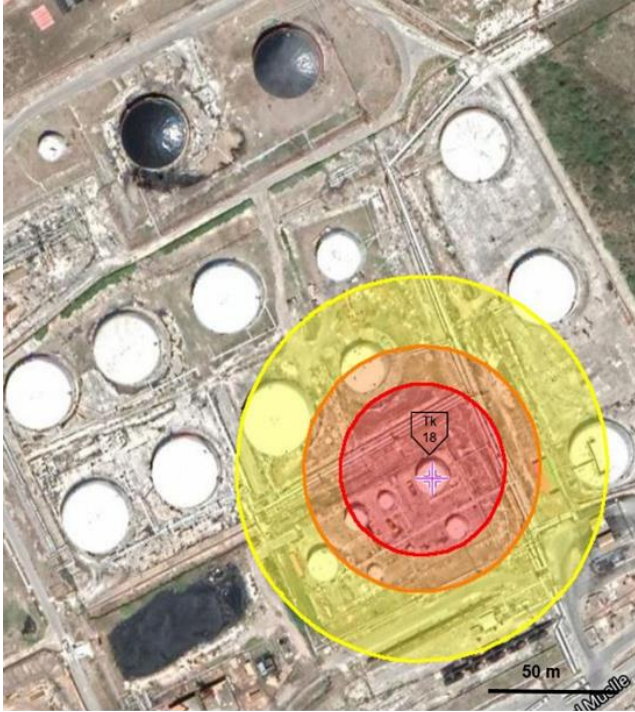


Figura 3.2a: Accidente de charco de fuego, tanque 18

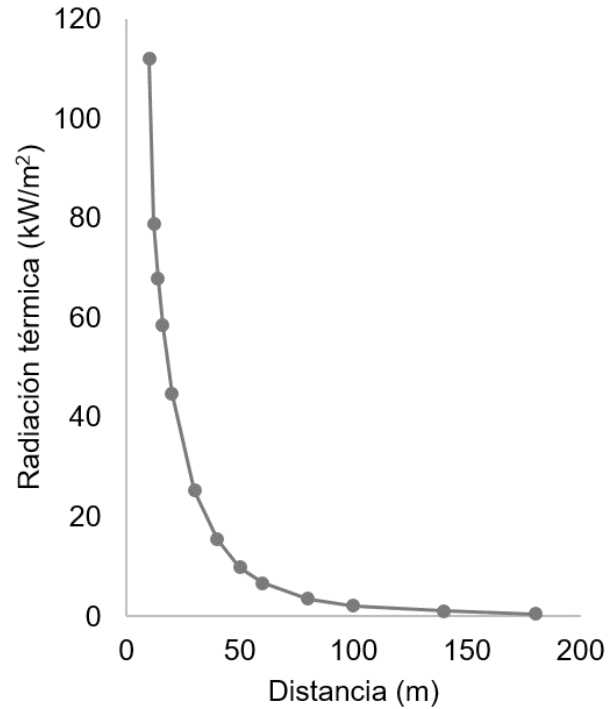


Figura 3.2b: Intensidad vs Distancia para el tanque 18

La figura 3.2a muestra el accidente de charco de fuego simulado para el tanque 18, donde a pesar de tener un radio de acción no tan abarcador como el tanque 17, es el que mayor intensidad de radiación térmica emite, afectando a el cercano tanque 20 con 32,2 kW/m², el cual se encuentra dentro de la zona roja y de máxima intensidad del charco aumentando así la probabilidad de escalado y por tanto de provocar un accidente dominó. En la figura 3.2b se aprecia que el tanque 18 alcanza un valor máximo de intensidad de 112 kW/m² a 10 m de distancia, donde de igual modo que la figura 3.1b va disminuyendo a medida que aumenta la distancia.

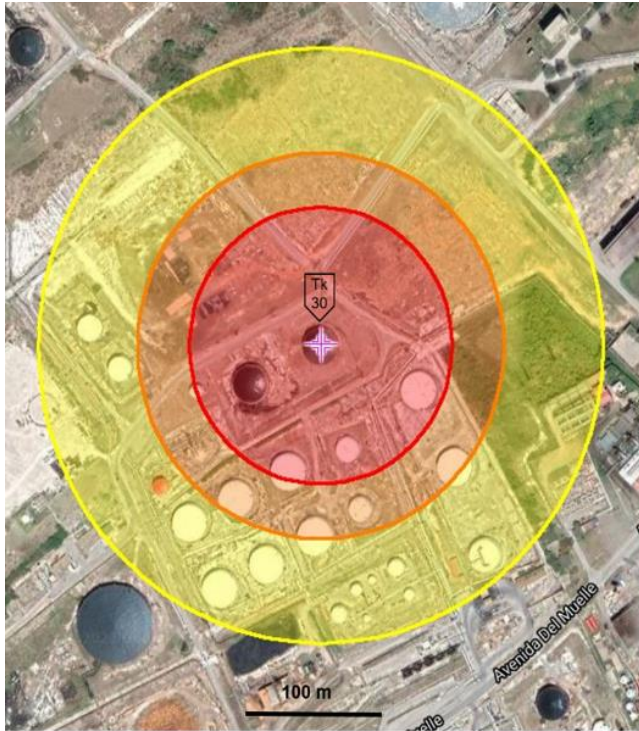


Figura 3.3a: Accidente de charco de fuego, tanque 30

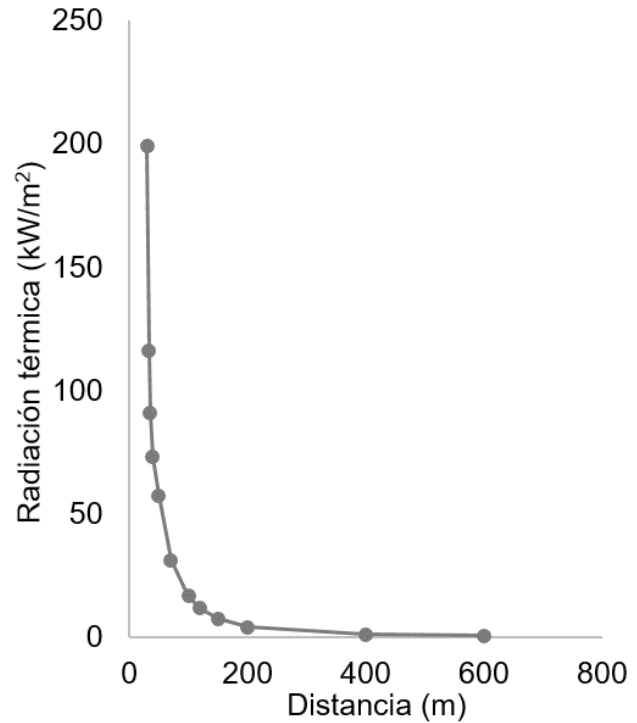


Figura 3.3b: Intensidad vs Distancia para el tanque 30

En la figura 3.3a se aprecia como el radio de acción de la radiación térmica provocada por el tanque 30 afecta a toda el área de estudio de almacenamiento de hidrocarburos, afectando dentro de la zona roja los tanques: 38, 17, 26 y 1, esto se debe principalmente a que este tanque provoca el mayor diámetro de charco con 60 m, a pesar de no ser el de mayor volumen de capacidad con 10919 m³. Según Reniers y Cozzani (2013) se considerará siempre un posible escalado para todas las unidades localizadas dentro del área del charco. Por tanto, el tanque 30 es ampliamente el que mayor peligro origina desde el punto de vista de afectación hacia otras unidades dentro del áreas de estudio. Además, en la figura 3.3b el tanque 30 alcanza una máxima radiación de 199 kW/m² a una distancia de 30 m la cual va aumentando haciendo que disminuya la radiación térmica hasta valores cercanos a cero.

A modo de resumen el tanque 30 es el que mayor valor de intensidad máxima alcanza y el que mayor cantidad de tanques afecta con su diámetro de charco, además el tanque 18 es de mayor intensidad emite sobre el tanque 20 y el tanque 17 por su centrada ubicación dentro del área

de estudio es un claro candidato a provocar el escalado del accidente de charco de fuego emitiendo radiaciones máximas hasta de 187 kW/m².

3.2- Resultados de la cuantificación inicial de cada escenario y de la probabilidad de escalado (Etapas 3-4)

En los subepígrafes siguientes se muestran los resultados obtenidos de la cuantificación de la frecuencia inicial del escenario de charco de fuego a partir del árbol de eventos, así como los valores obtenidos de la probabilidad de escalado, en conjunto con un análisis del escalado mostrado mediante figuras gráficas.

3.2.1- Resultados de cuantificación de la frecuencia inicial usando árbol de eventos

La forma más común de modelar secuencias de accidentes es el enfoque de árbol de eventos, la técnica es universalmente aplicable a sistemas de todo tipo, con la limitación de que los eventos no deseados, así como los eventos deseados deben anticiparse para producir resultados analíticos significativos. Para su aplicación exitosa a sistemas complejos es necesario realizar un estudio durante un período de tiempo combinado con la experiencia práctica (Schüller *et al.*, 2005).

Para la cuantificación de la frecuencia inicial usando árbol de eventos fue imprescindible la aplicación de un análisis histórico con el objetivo de cuantificar las fallas relacionadas en cuanto a derrames de sustancias combustibles para todos los tanques, este fue conformado a partir del registro histórico de accidentes ocurridos en los últimos diez años en la empresa donde se encuentra el área de estudio (ver anexo 36). En el anexo 37 se muestran los resultados obtenidos a partir de la aplicación del análisis histórico de accidentes. En el análisis se encuentran incluidos todos los tanques presentes en la empresa que almacenan las sustancias en cuestión para esta investigación, se decidió realizar de manera general el análisis histórico debido principalmente a el déficit de datos acumulados relacionados a accidentes provocados por derrames de estas sustancias en dicha empresa, lo cual quedaría incompleto y dificultaría el análisis si se hiciera solo para los tanques que se cuestionan en la investigación.

De esta manera el *fuel oil* obtiene la mayor frecuencia y la mayor cantidad de derrames a pesar de no ser la sustancia que mayor cantidad de tanques ocupa, quedando el turbo combustible con la menor cantidad de derrames registrados en los últimos diez años. De manera general

todos cuentan con un valor frecuencial elevado según lo reportado por Bevi (2009); Reniers y Cozzani (2013); Uijt de Haag y Ale (2005) y Wells (1997). Con la aplicación de este análisis se suple la necesidad de un mayor acercamiento a la realidad y se mejora la adaptabilidad de los resultados. Con estos valores cuantificados se le da inicio al árbol de eventos.

Los derrames de sustancias inflamables pueden provocar varios eventos dependiendo de si hay una ignición directa o retardada en instalaciones estacionarias, se asume que el 70% de las liberaciones instantáneas con ignición directa son causadas por calentamiento debido a un charco de fuego debajo del tanque o por la radiación de calor de un incendio cercano. En el caso de una liberación continua la probabilidad de ignición directa puede estar asociada al caudal másico y a la categoría de la sustancia liberada, la ignición directa de un charco de combustible líquido da como resultado un charco de fuego (Alileche *et al.*, 2016; Bosch y Weterings, 2005; Uijt de Haag y Ale, 2005).

De los valores obtenidos a partir de las ecuaciones de la tabla 2.2 sobre el cálculo de la probabilidad de ignición, el mayor valor que se obtuvo fue la ignición en función de la fuente y las características del entorno, siendo igual a 0,8130, para un valor de 0,9000 de ignición según la fuente. Obteniéndose un valor final de probabilidad de ignición directa de 0,2000, valor superior a lo planteado por Uijt de Haag y Ale (2005) para este tipo de sustancias.

Con la obtención del valor frecuencial de derrame para cada sustancia, el valor de la probabilidad de ignición directa y probabilidad de ignición retardada se procedió a la aplicación del árbol de evento, que según Khakzad *et al.* (2016) se aplica para investigar los posibles escenarios de accidentes primarios de un tanque de almacenamiento de hidrocarburos y el cual tiene como principal objetivo en esta investigación conocer la posible frecuencia anual del escenario de charco de fuego. La figura 3.4 muestra una relación entre los valores frecuenciales del escenario de charco de fuego como evento primario con la temperatura flash tomada del anexo 29, correspondiente a cada sustancia.

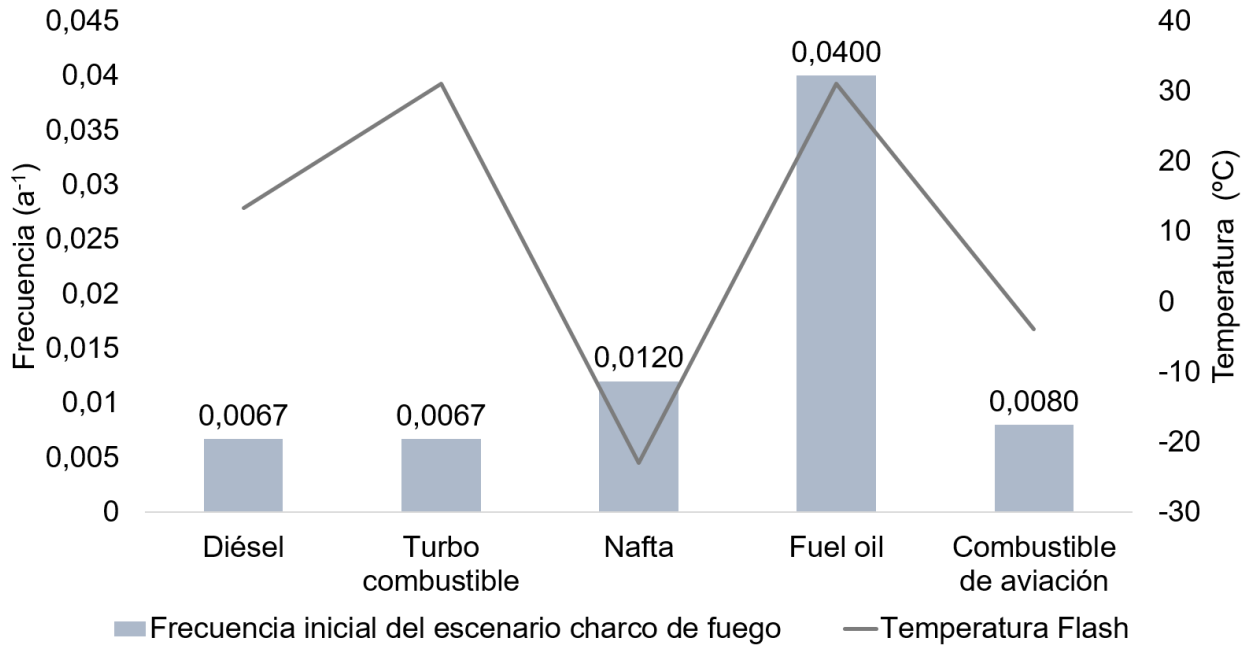


Figura 3.4. Frecuencia del escenario de charco de fuego vs temperatura flash para cada sustancia

De los valores de frecuencias obtenidos el *fuel oil* obtuvo el mayor con $0,0400 \text{ a}^{-1}$, esto se debe principalmente a que cuenta con la mayor cantidad de tanques en que está almacenado por lo que aumenta el número de derrames y por lo tanto la probabilidad y la frecuencia con la que ocurre los mismos. Por otro lado, la nafta al contar con la menor temperatura flash entre las sustancias mostradas de la figura 3.4, seguida por el combustible de aviación, aumenta considerablemente las posibilidades de provocar una ignición directa a partir de un derrame continuo desde un tanque, pudiéndose manifestar un escenario de charco de fuego, según Changlong *et al.* (2012) a menores valores de temperatura flash existirán mayores probabilidades de ignición, además se pueden categorizar estas sustancias altamente inflamables a excepción del turbo combustible y el *fuel oil* las cuales son simplemente inflamables. Resaltar también que los mayores valores frecuenciales corresponden a las sustancias que almacenan los tanques 17 (nafta), 18 (combustible de aviación) y 30 (*fuel oil*), los cuales fueron los seleccionados como las unidades de mayor peligro potencial en el área de estudio, reafirmando de esta manera dicha elección. Con los valores de frecuencia del escenario de charco de fuego se inicia la construcción de las redes Bayesianas.

3.2.2- Resultados de la probabilidad de escalado del escenario de charco de fuego

La probabilidad de escalado depende de varios factores: tipo de vector de escalado, sustancia involucrada, distancia entre las unidades primarias y secundarias y de la vulnerabilidad de las unidades secundarias. Entre los métodos disponibles para el cálculo de la probabilidad de escalado, los modelos Probit son muy usados por su simplicidad y versatilidad, facilitando su aplicación a gran variedad de escenarios de accidentes, vectores de escalado y unidades con diferentes vulnerabilidades (Khakzad, 2015).

Los valores de probabilidad de escalado mostrados en el anexo 38, se obtuvieron a partir del resultado de la cuantificación de la radiación térmica. Con las ecuaciones 2.2 y 2.1 se obtuvo el tiempo de falla y el valor Probit respectivamente, el cuál fue introducido en el *software* MatLab donde previamente para esto se creó un *script* que contenía la ecuación para el cálculo de la probabilidad (ecuación 2.6), permitiendo de esta manera automatizar el proceso para la cuantificación de la probabilidad que existe entre una unidad de proceso primaria que emite una radiación térmica determinada que pueda provocar un accidente de mayor gravedad en unidades secundarias cercanas a través del vector de escalado, donde el tiempo de falla (tff) es un factor importante a considerar y que a su vez el mismo está determinado principalmente por el volumen de la unidad secundaria y la radiación térmica recibida por la unidad primaria. Por lo tanto, a volúmenes menores y a mayores valores de intensidad de radiación térmica recibida el tff será menor, aumentando las probabilidades de ocurrencia del escalado del accidente. En el anexo 39 se muestran las probabilidades promedio para cada unidad de proceso y se relaciona con la sustancia almacenada y su volumen.

Según el anexo 39, el tanque 20 fue el que mayor probabilidad promedio de escalado obtuvo, aunque estos valores de probabilidad dependen de ciertas variables específicas, entre las más importantes se encuentran el tiempo de falla y la intensidad de la radiación térmica. La figura 3.5 muestra para un mejor entendimiento la relación entre las variables que afectan directamente la probabilidad de escalado.

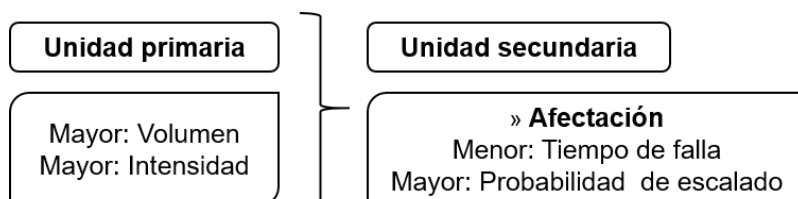


Figura 3.5. Relación de variables que afectan la probabilidad de escalado.

A partir de la figura 3.5 se puede comprender la afectación entre las principales variables que están presente en el análisis de probabilidad de escalado del escenario charco de fuego, además de estas, las distancias en que se encuentran separadas estas unidades es otro factor que influyen en cualquier accidente que pueda provocar un escalado y también se debe tener en cuenta que según Zhou y Reniers (2018b) una unidad proceso ubicada en la dirección del viento de un incendio de charco de fuego recibirá una mayor intensidad de radiación térmica, pero aunque el viento puede promover la propagación de un incendio, el escalado del charco de fuego funciona a través de la radiación térmica. El valor de ttf probablemente cambiará por esa condición, pero el proceso de análisis y el enfoque del análisis sería idéntico.

Para una mayor profundidad en el análisis se muestra para la subárea 2 la figura 3.6, en la que se encuentra el tanque 17, el cual será la unidad principal e iniciadora del efecto dominó para la aplicación de las técnicas de AI. En esta figura se muestra el comportamiento de la intensidad de la radiación térmica para cada tanque en relación con la distancia a la cual se alcanza la máxima radiación y la distancia a la cual ocurre el escalado sobre equipos atmosféricos, esta relación se muestra para las subáreas 1 y 3 en los anexos 40 y 41 respectivamente.

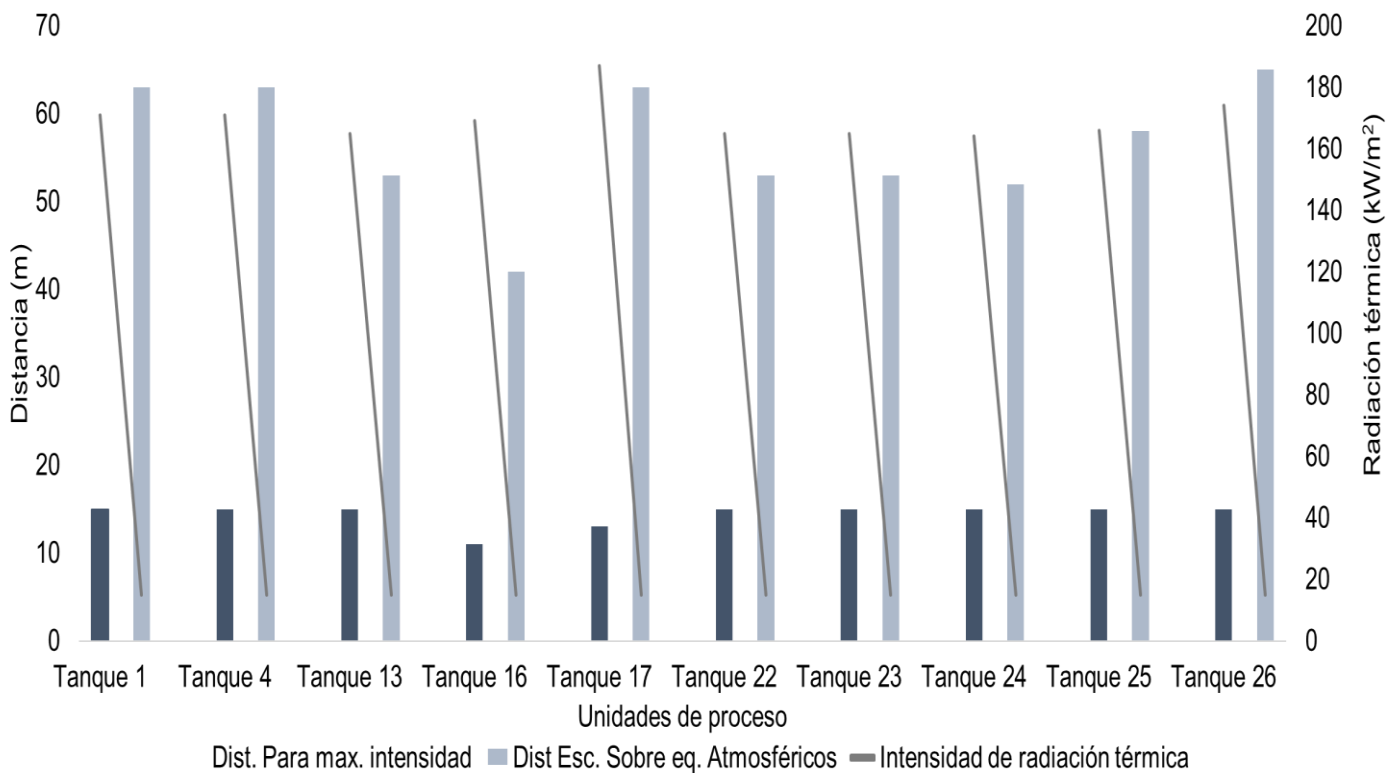


Figura 3.6: Comportamiento de radiación térmica vs distancia para la subárea 2

En la subárea 2 según la figura 3.6 el tanque 17 muestra el máximo valor de intensidad de 187 kW/m² para 13 m de distancia y el tanque 26 es el que alcanza la mayor distancia a 65 m para el escalado sobre equipos atmosféricos y la menor distancia le corresponde a el tanque 16 con 42 m.

Para la subárea 1, según el anexo 40 el tanque 30 es el que alcanza la máxima intensidad de 199 kW/m² a la mayor distancia de 30 m, además de ser el que a mayor distancia de 105 m provoca la ocurrencia del escalado sobre equipos atmosféricos. Respecto al anexo 41 para la subárea 3, el tanque 19 es el que mayor intensidad alcanza con 153 kW/m² para una distancia de 7 m, aunque sobre equipos atmosféricos para una intensidad de 15 kW/m² según lo planteado por Reniers y Cozzani (2013) el tanque 18 logra una distancia de 41 m, siendo el que mayor distancia alcanza para esta intensidad.

De manera general, se reafirma que por subáreas los tanques 17, 18 y 30 son los que mayor interés le aportan a la esta investigación, ya que cuentan con los resultados más relevantes, esto se traduce a mayores a daños y destrucción en caso de que una de estas unidades provoque un accidente de charco de fuego, además como es lógico provocarían escenarios dominó de mayores magnitudes.

3.3- Resultados y análisis de las cuatro combinaciones de técnicas de AI aplicadas (Etapas 5-6)

El efecto dominó se encuentran entre los eventos de alto impacto y baja probabilidad que contribuyen a accidentes graves y catastróficos en las industrias químicas y de procesos (Khakzad *et al.*, 2018). En este epígrafe se muestran, se analizan y se validan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de las cuatro variantes de combinaciones de técnicas de AI desarrolladas en esta investigación para evaluar la probabilidad del efecto dominó tanto espacial como temporalmente. A raíz de estos resultados, se realiza una comparación entre las cuatro variantes, concluyendo y recomendando su uso, además se desarrolla un árbol de decisiones con el objetivo de brindar una mejor orientación con respecto a la aplicación de estas técnicas. A partir de este epígrafe, se considerarán pertenecientes a la subárea 1 los tanques 1 y 4, decisión que fue tomada a partir de la necesidad de incluir como mínimo cuatro tanques en cada subárea para mejorar el análisis y la aplicación de estas técnicas.

3.3.1- Resultados de la combinación de red Petri probabilística con red Bayesiana (Variante 1)

Con la aplicación de esta primera combinación, a partir de la red Petri probabilística (PPN) se obtuvieron los valores de probabilidad de falla para todos los tanques del área de estudio, teniendo en cuenta la ocurrencia de un escenario de incendio en el tanque 17 como unidad primaria e iniciadora del efecto dominó, tomando el valor obtenido del árbol de eventos de 0,0120 como probabilidad inicial del escenario de un charco de fuego en esta unidad. Los valores resultantes se obtuvieron en la iteración 16 de la matriz Petri, completada a partir de la estructura de la PPN previamente desarrollada, mostrada en la figura 3.7 y considerándose todas las interacciones posibles entre los tanques del área. Los valores de probabilidad de escalado obtenidos en el epígrafe 3.2.2 fueron los valores para las transiciones que se dirigían desde el accidente de la unidad A_i hacia la falla de otra unidad F_b y según Zhou y Reniers (2017) para las transiciones de la falla de la unidad F_b al accidente de esa misma unidad A_b un valor de 0,5000 de probabilidad para cada unidad de proceso. La PPN desarrollada está compuesta por 33 lugares y 46 transiciones, el anexo 42 muestra el significado de cada lugar, así como todas las transiciones representadas en la PPN. Esta primera combinación se decidió validar basándose en el artículo desarrollado por Dueñas, Orozco, Lantigua, *et al.* (2021), en el cual se aplicó las técnicas de esta combinación en la misma área en cuestión, exceptuando a los tanques 16, 20 y 21 que si fueron tenidos en cuenta en esta investigación.

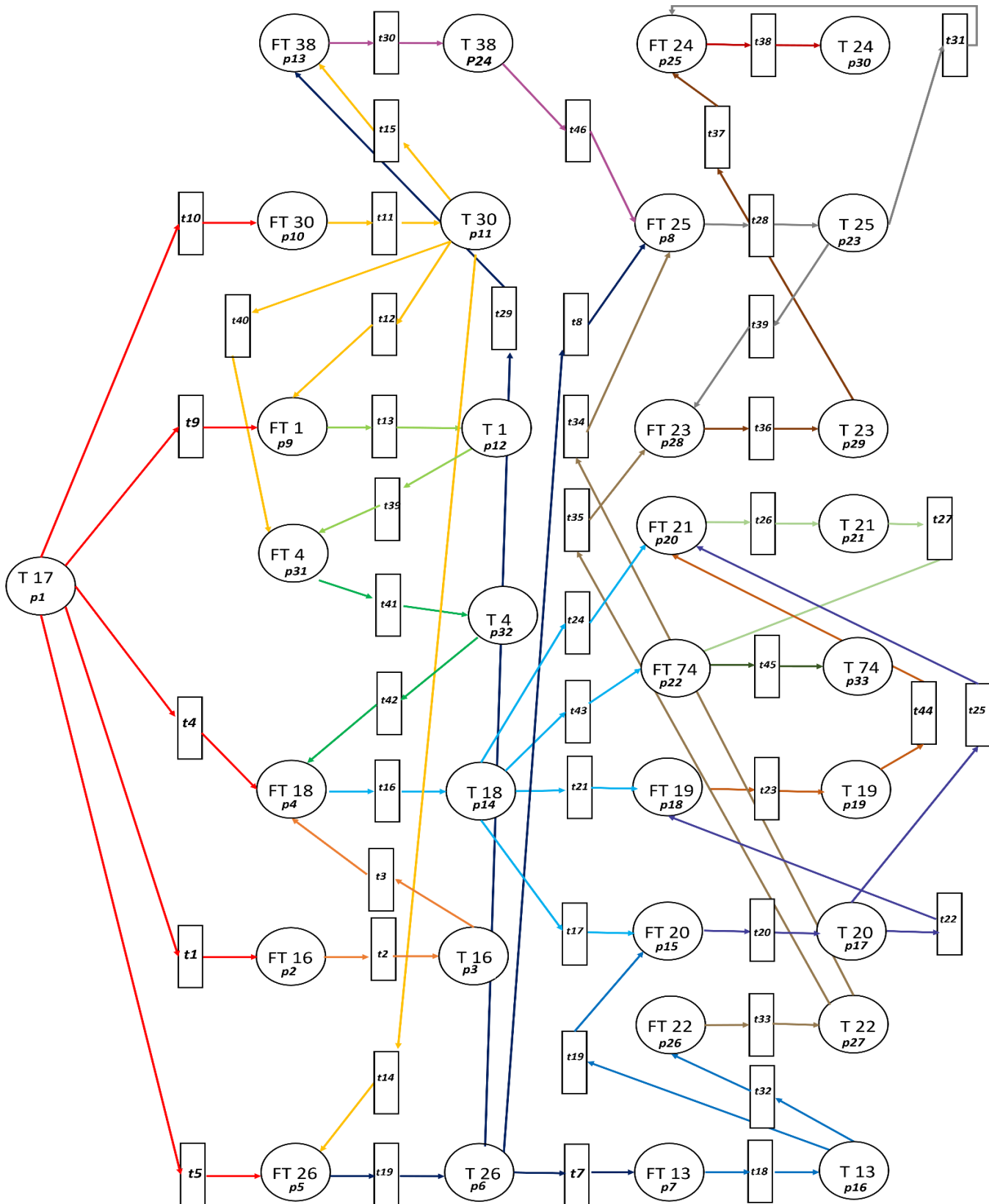


Figura 3.7. Red Petri probabilística para cuantificar la probabilidad de falla a partir de la ocurrencia de un charco de fuego en el tanque 17

Los valores de las probabilidades obtenidas en la iteración 16 de la PPN son mostrados separados por subáreas en las figuras 3.8a, b y c, a partir de la ocurrencia de un charco de fuego en el tanque 17.

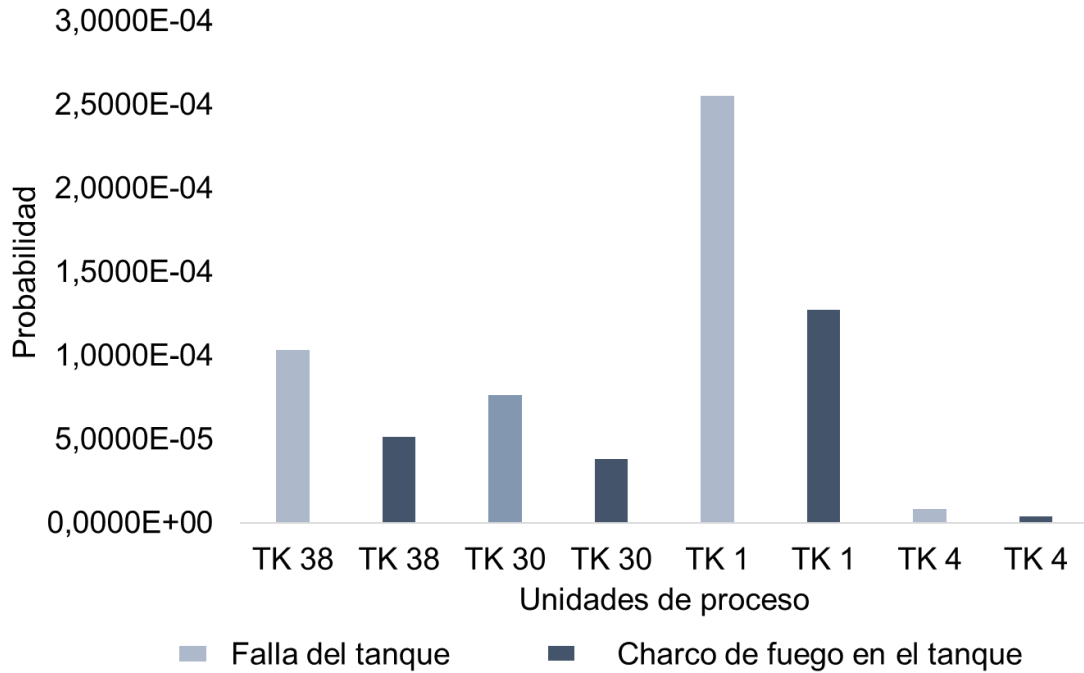


Figura 3.8a. Probabilidades de falla e incendio por PPN, para la subárea 1

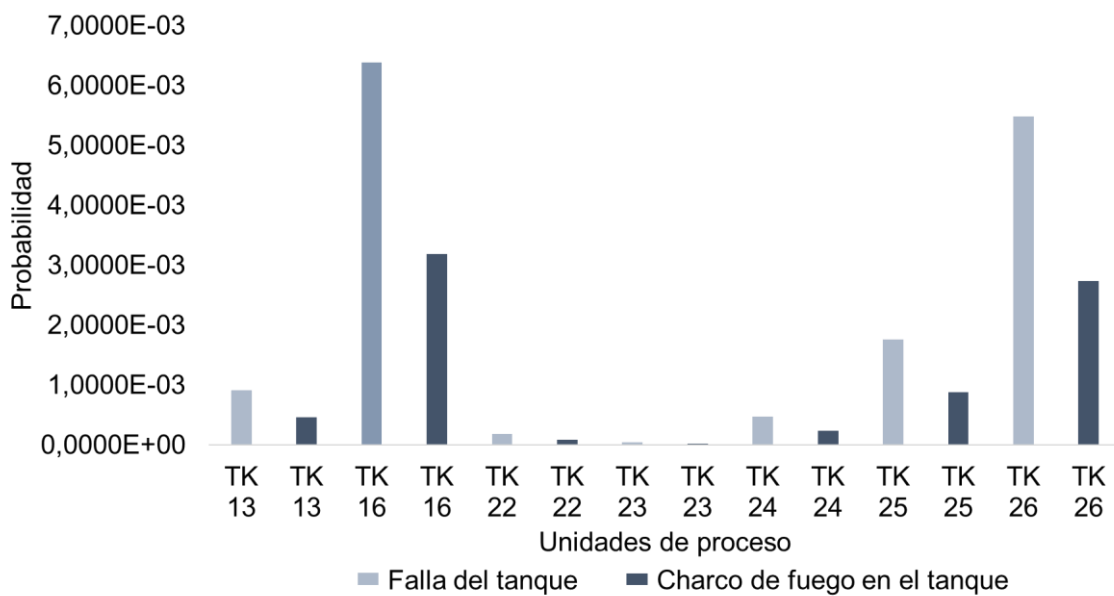


Figura 3.8b. Probabilidades de falla e incendio por PPN, para la subárea 2

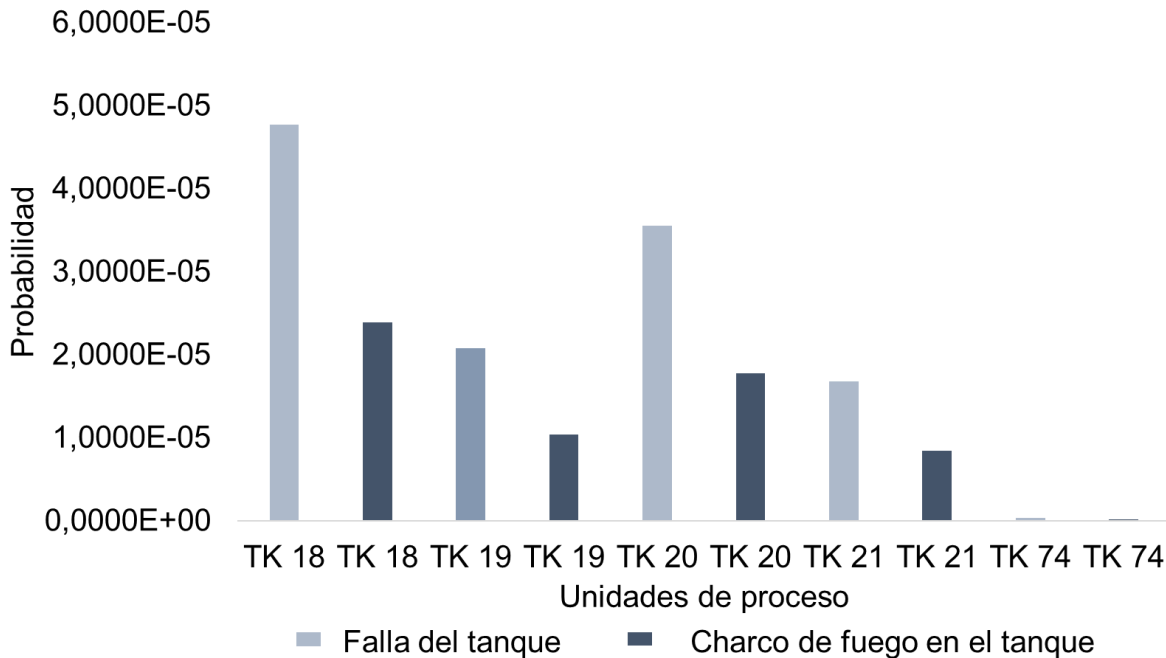


Figura 3.8c. Probabilidades de falla e incendio por PPN, para la subárea 3

La figura 3.8a muestra que el tanque 1 tiene la mayor probabilidad de falla y de posterior charco de fuego para la subárea 1, con $2,5525E-04$ y $1,2762E-04$ respectivamente. En la figura 3.8b, se muestra que para la subárea 2 el tanque 16 es el que mayor probabilidad de falla y de fuego presenta con $6,3826E-03$ y $3,1913E-03$ respectivamente en caso de un escenario de charco de fuego en el tanque 17. Respecto a la figura 3.8c, el tanque 18 es el que representa la mayor probabilidad de falla y de fuego para la subárea 3, con valores de $4,7707E-05$ y $2,3853E-05$ respectivamente. Se puede afirmar a partir de las figuras 3.8 que el inicio de un accidente de charco de fuego en el tanque 17 provocaría la falla en el tanque 16 y posteriormente el charco de fuego en el mismo. Además, el efecto sinérgico hace que las probabilidades de falla sean mayores a la de la ocurrencia del escenario de incendio (Dueñas, Orozco, Lantigua, *et al.*, 2021).

Con los valores obtenidos de la aplicación de la PPN y basándose en la estructura de la misma, fue constituida la red Bayesiana (BN) que se muestra en la figura 3.9 y desarrollada con la ayuda del *software* Hugin, con el objetivo de evaluar el sinergismo y obtener la probabilidad del efecto dominó a los diferentes niveles de escalado con la introducción de los nodos auxiliares L_i y DL_i .

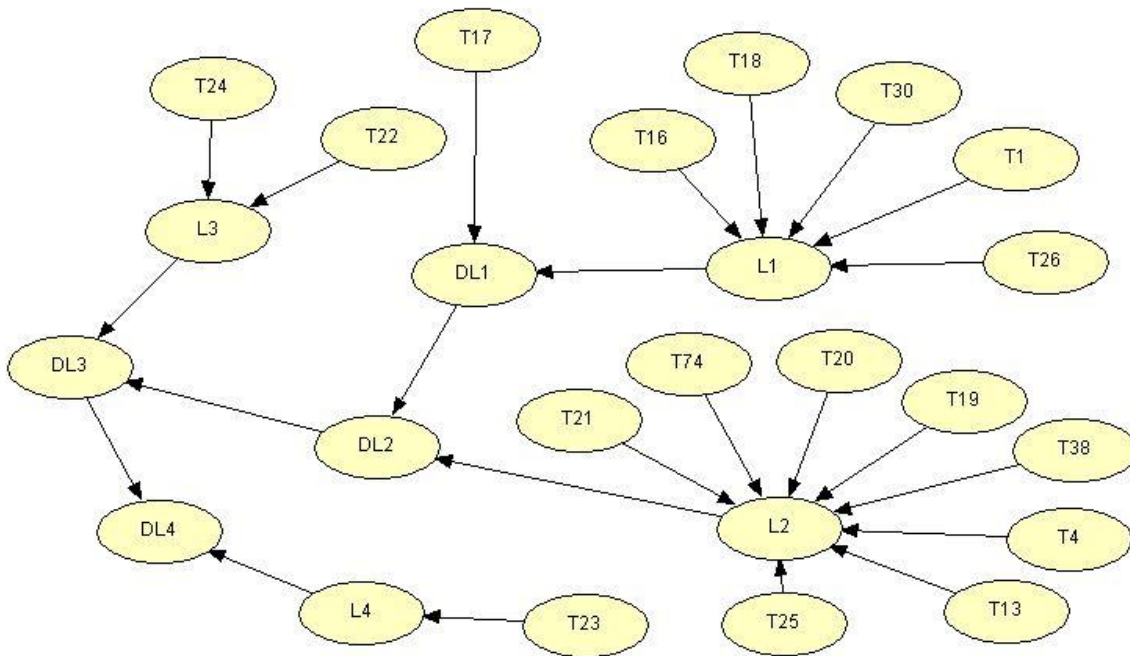


Figura 3.9. Red Bayesiana para la obtención y cuantificación de sinergismo y de la probabilidad del efecto dominó a diferentes niveles

La red Bayesiana (BN) es una técnica robusta para razonar bajo incertidumbre, debido a su capacidad para manejar la escasez de datos, la opinión de expertos, la incertidumbre de los parámetros, la incertidumbre del modelo, las dependencias condicionales y las fallas secuenciales (Khakzad *et al.*, 2018). De la BN mostrada en la figura 3.9 se obtuvieron cuatro nodos DL_i, lo cual significa que se obtuvieron las probabilidades del efecto dominó hasta el cuarto nivel de escalado, considerando la ocurrencia de un escenario de charco de fuego en el tanque 17 como accidente primario e iniciador del mismo. Las figuras 3.10a y 3.10b muestran las probabilidades obtenidas de la BN y las probabilidades del efecto dominó en cada nivel de escalado.

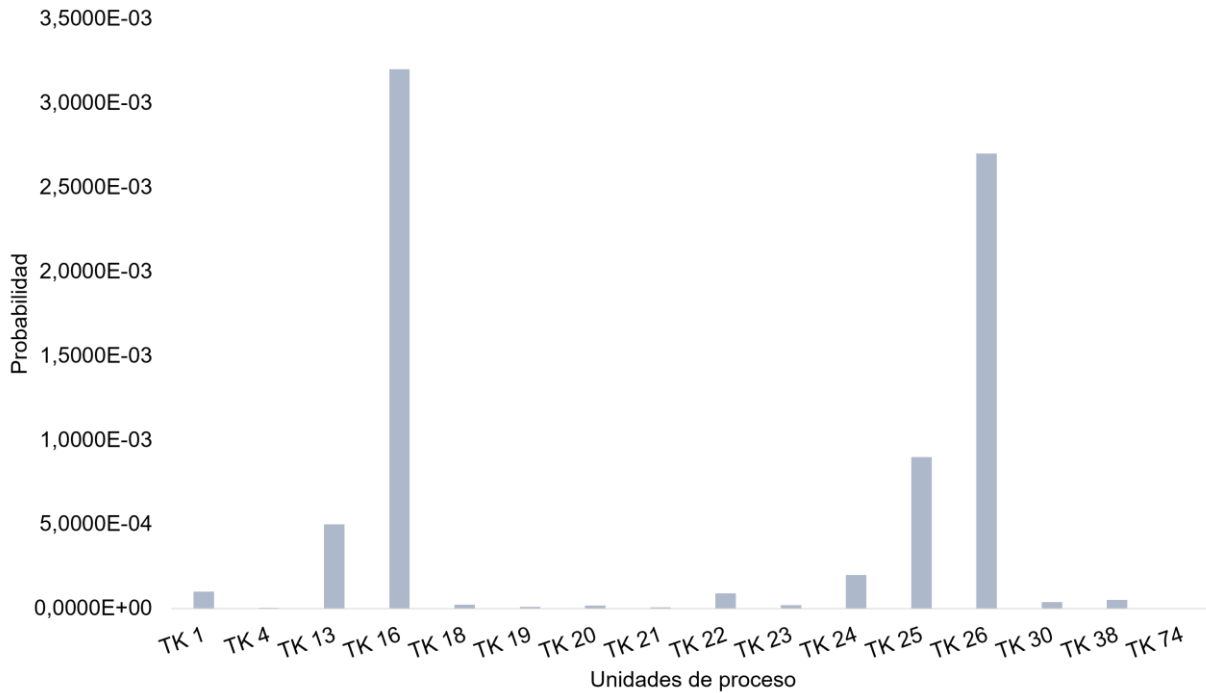


Figura 3.10a. Probabilidades obtenidas de la BN a partir de la ocurrencia del accidente en el tanque 17

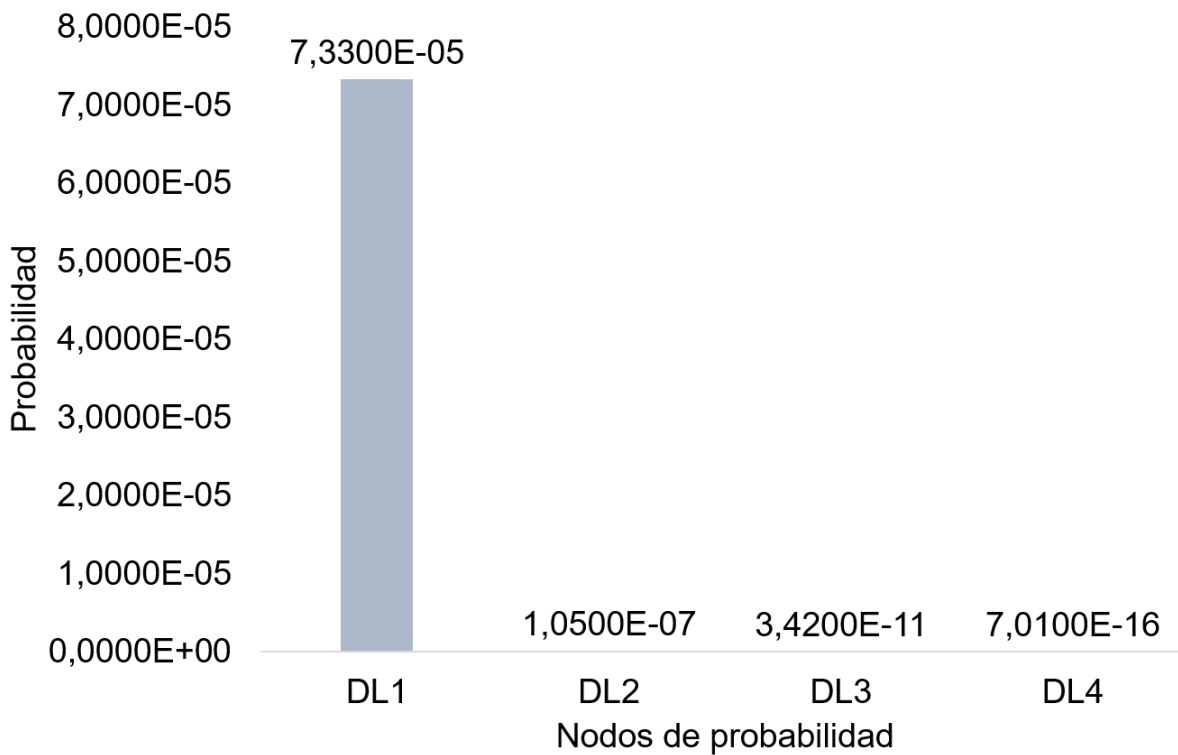


Figura 3.10b. Nodos de probabilidad para cada nivel de escalado del efecto dominó

De las probabilidades obtenidas de la BN para cada tanque a partir de la ocurrencia de un charco de fuego en el tanque 17 mostradas en la figura 3.10a el tanque 16 obtuvo la mayor probabilidad con $3,2000E-03$, demostrando nuevamente que la corta distancia entre estos tanques hace que se propague el efecto dominó hacia el tanque 16, seguido por el tanque 26 con $2,7000E-03$ de probabilidad de propagación. Para los valores mostrados en la figura 3.10b se demuestra una disminución de la probabilidad del efecto dominó a medida que aumenta el nivel de escalado, coincidiendo con lo planteado por Dueñas, Orozco, Lantigua, *et al.* (2021), ya que los niveles mayores tendrán involucrados menor cantidad de tanques debido al avance del accidente dominó, haciendo que disminuyan las probabilidades. Además, el efecto sinérgico demostró ser generador de probabilidades de falla mayores debido a que se considera un mayor número interacciones entre los tanques del área. La probabilidad conjunta del efecto dominó es de $7,3405E-05$ y se obtiene de la sumatoria de los nodos DL_i , según Dueñas *et al.* (2020). El anexo 43 y la tabla 3.3 muestran una comparación de los resultados obtenidos de la PPN y la BN respectivamente.

Tabla 3.3. Comparación de resultados de la BN según Dueñas, Orozco, Lantigua, *et al.* (2021)

Nodos	Probabilidades de los nodos auxiliares	
	Investigación actual	Dueñas, Orozco, Lantigua, <i>et al.</i> (2021)
DL ₁	7,3300E-05	6,0000E-04
DL ₂	1,0500E-07	1,2100E-06
DL ₃	3,4200E-11	1,5800E-10
DL ₄	7,0100E-16	-
Prob. Conj	7,3405E-05	6,0121E-04

En la comparación de los resultados de la PPN, mostrados en el anexo 43, las probabilidades obtenidas por Dueñas, Orozco, Lantigua, *et al.* (2021) son probabilidades mayores debido a que consideró un mayor número de interacciones entre los tanques del área, obteniendo los resultados mostrados en la iteración 19. Con respecto a los niveles de escalado comparados en la tabla 3.3, en esta investigación se alcanza un mayor nivel del efecto dominó, debido a que se considera un mayor número de tanques, aunque los valores del artículo siguen siendo mayores debido a que los valores obtenidos de la PPN son la fuente de datos para el desarrollo

de la BN, además que los dos primeros niveles consideran un mayor número de tanques por lo que la probabilidad del tercero será también mayor debido a que los nodos auxiliares se enlazan entre sí, considerando las probabilidades de los niveles anteriores aumentado de esta manera el sinergismo. Esto demuestra que a una mayor cantidad interacciones habrá un aumento de las probabilidades de falla y del efecto sinérgico entre estos tanques, además que no porque exista mayor cantidad de tanques existirán mayores probabilidades si no se tienen en cuenta todas las interacciones posibles.

3.3.2- Análisis de resultados de la combinación de lógica difusa con criterio de expertos y red Bayesiana (Variante 2)

En esta combinación se aplicó la lógica difusa con el criterio de expertos para cuantificar la probabilidad de falla de los tanques del área a partir de un escenario de charco de fuego en el tanque 17 como evento iniciador del accidente dominó. Posteriormente se tomaron los valores obtenidos y se introdujeron en la BN diseñada y desarrollada a partir de la PPN de la variante 1 y con la ayuda del *software* Hugin; a diferencia de la combinación anterior, esta BN enlaza los nodos entre sí, lo cual es necesario para poder considerar el sinergismo entre todas las unidades del área. Con los nodos auxiliares L_i y DL_i , se obtienen las probabilidades del efecto dominó a diferentes niveles de escalado. Esta BN se aplicó con el objetivo de obtener la probabilidad del efecto dominó y relacionar las interacciones entre las unidades de proceso considerando el sinergismo entre las mismas. Los resultados obtenidos son validados por artículo publicado por Dueñas, Orozco, Furka, *et al.* (2021), en el cual aplicó la lógica difusa con criterio de expertos y posteriormente la BN para obtener probabilidad de falla y del efecto dominó respectivamente, considerando el sinergismo entre las unidades de proceso en un área de almacenamiento de hidrocarburos similar a la estudiada en esta investigación.

La lógica difusa y el criterio de expertos fueron programados en el *software* MatLab. El anexo 44 muestra los datos que fueron introducidos en el *software* para la cuantificación de tres factores fundamentales: TACC-TTF que expresa la tasa entre el tiempo del accidente y el tiempo de falla, SCAL-SACT expresa la tasa entre el nuevo grosor de la forma y el grosor de la forma real y el PERAD factor de probabilidad de escalado, que representa la probabilidad de escalado debido a la radiación térmica considerando el tiempo de falla (Dueñas, Orozco, Furka, *et al.*, 2021). Por lo que a menores ttf se obtendrán menores valores del factor TACC-TTF con

respecto al factor SCAL-SACT, el cual siempre se obtuvo un valor igual a 1, lo cual quiere decir que el espesor con que están contruidos los tanques del área no es capaz de soportar radiaciones tan elevadas, por lo que se obtendrán menores tiempos de falla y por lo tanto mayores probabilidades de falla. Con esos factores se obtuvieron posteriormente los valores de probabilidad de falla de cada unidad de proceso respecto a las otras, de acuerdo a la estructura de la BN estos valores se muestran en la figura 3.11.

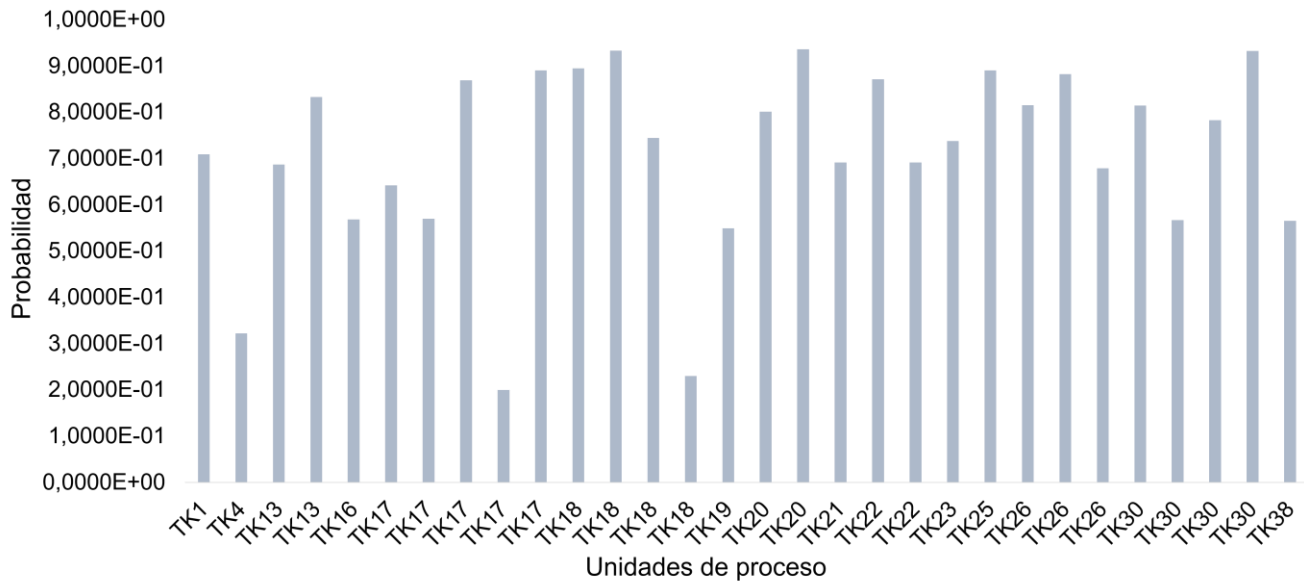


Figura 3.11. Probabilidades de falla obtenidas por lógica difusa

Según la figura 3.11 el tanque que mayor probabilidad de falla obtuvo con $9,3600E-01$ es el tanque 21 debido a la afectación por un escenario de incendio proveniente del tanque 20, seguido de este el tanque 20 con $9,3300E-01$ afectado por el tanque 18, esta diferencia se debe a la distancia de 18 m a la que se encuentran separados los tanques 20 y 21 en comparación con la que existe de 25 m entre los tanques 18 y 20, aunque el factor PERAD entre estos es mayor con $0,8150$ con un tff menor de 369 s y el Scal con un valor de 211,30 mm es menor. Por lo tanto, el cálculo de la probabilidad de falla con el uso de lógica difusa no siempre se cumple que a menores tiempos de falla existirán mayores valores probabilidad de falla, valores ambos que están estrechamente vinculados a elevados valores del factor PERAD. El tiempo de 3600 segundos de accidente, valor obtenido de la simulación del *software* ALOHA, es suficiente para que todas las interacciones entre los tanques del área sean más propensas a ocurrir, exceptuando entre los tanques 17-18 y 18-74, estos tienen un tiempo de falla de 4593 s y 4225 s respectivamente, lo cual no significa que no exista la probabilidad de que fallen estos tanques

ya que los mismos aunque presentan los valores más bajos con $2,0000E-01$ y $2,3000E-01$ de probabilidad de falla respectivamente, pueden hacer que se genere la falla, sin embargo es menos probable, aunque comparándolos con los valores de probabilidad de falla obtenidos de la combinación de la variante 1 de la PPN, estos son significativamente mayores, esto es debido principalmente a que existen un mayor número variables que se tienen en cuenta cuando se usa la lógica difusa para obtener la probabilidad de falla por incendio, como son: la densidad de la sustancia y el espesor de los tanques, las cuales influyen también en la afectación y en la posterior falla del tanque. En el anexo 45 muestra los resultados obtenidos de la lógica difusa usando los mismos factores por Dueñas, Orozco, Furka, *et al.* (2021), donde se puede apreciar valores similares.

Además de los valores de probabilidad de falla, de la lógica difusa también se obtuvieron tres superficies de respuesta en función de los tres factores vinculados. Las figuras 3.12a, b y c muestran estas superficies y sus tres combinaciones posibles.

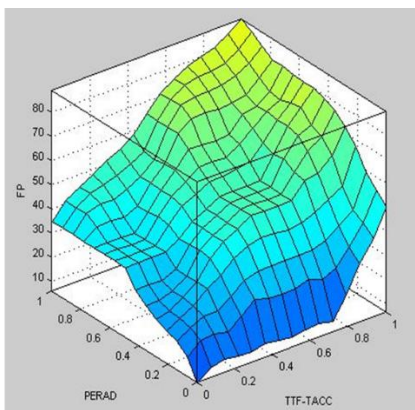


Figura 3.12a Superficie de respuesta considerando los factores PERAD y TTF-TACC

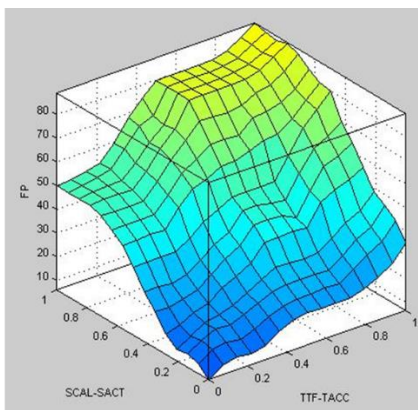


Figura 3.12b Superficie de respuesta considerando los factores SCAL –SACT y TTF-TACC

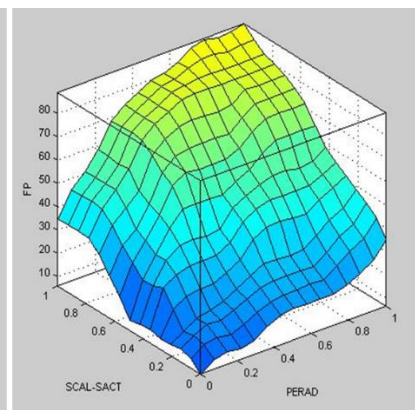


Figura 3.12c Superficie de respuesta considerando los factores SCAL –SACT y TTF-TACC

Las figuras 3.12 describen la relación entre la probabilidad de falla y la influencia de los factores que fueron las tres variables de entrada usadas para el cálculo de la probabilidad de falla como única variable de salida, usando el conjunto de lógica difusa (Q. Zhou *et al.*, 2016). Estos tres factores mostraron que son determinantes, ya que pequeñas variaciones en los mismos provocan cambios notables en la probabilidad de falla. Por lo tanto, variables como son: el tiempo de falla, el espesor del tanque y la probabilidad de escalado por radiación térmica, son imprescindibles cuando se aplica la lógica difusa para este fin.

A partir de la BN que se muestra en la figura 3.13 desarrollada y ejecutada por el *software* Hugin, se obtuvieron los valores de probabilidad del efecto dominó iniciado por un incendio de charco de fuego en el tanque 17 como unidad primaria.

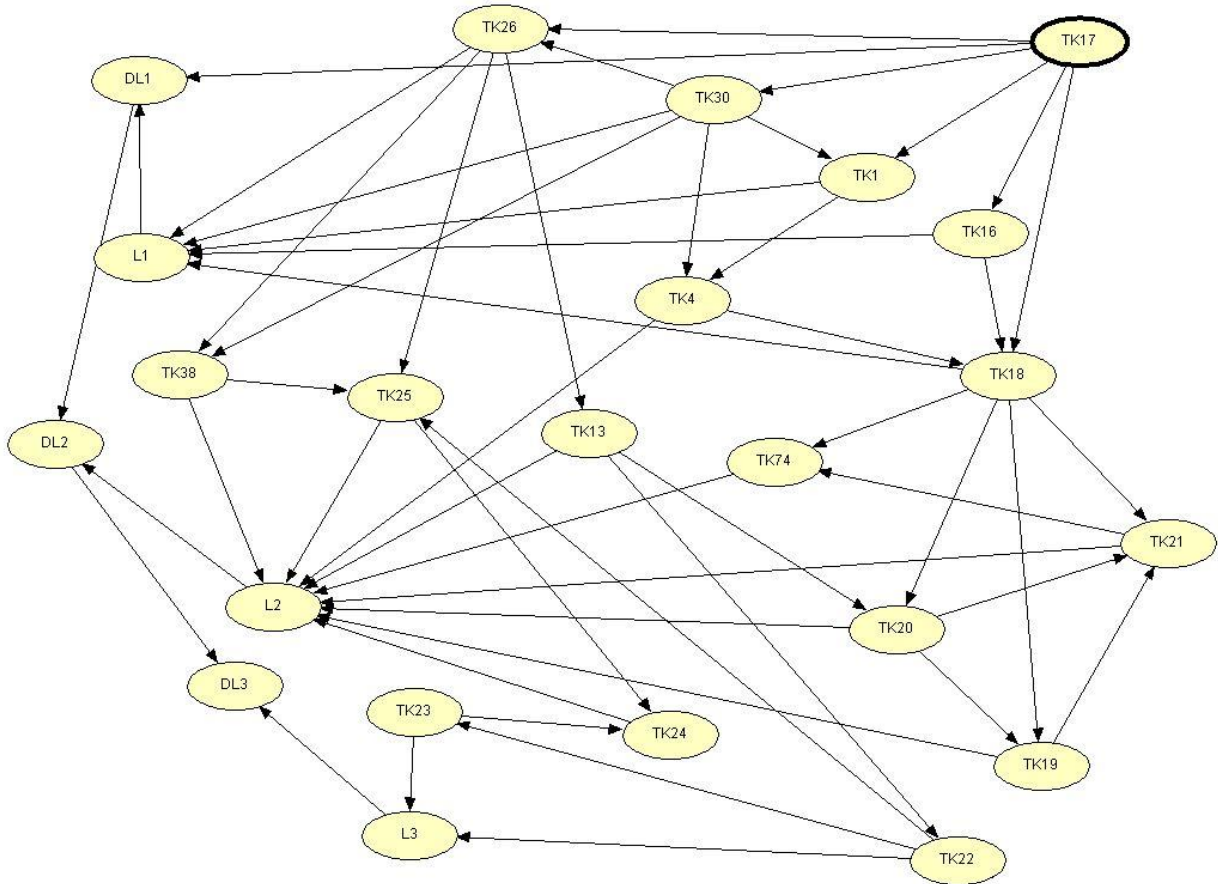


Figura 3.13. Red Bayesiana para cuantificar la probabilidad del efecto dominó

La BN mostrada en la figura 3.13 muestra el sinergismo entre los tanques del área, además se obtuvo que los tanques más afectados son el 18, 21 y 25, cada uno con tres interacciones provenientes de otros tanques, lo que demuestra el alto impacto del efecto sinérgico. A partir de esta BN se muestran en las figuras 3.14a y 3.14b los resultados de las probabilidades previas y con la ocurrencia del charco de fuego en el tanque 17, aprovechando la ventaja de poder actualizar las probabilidades insertando nueva evidencia, debido a su basamento en el teorema de Bayes para el desarrollo de la BN.

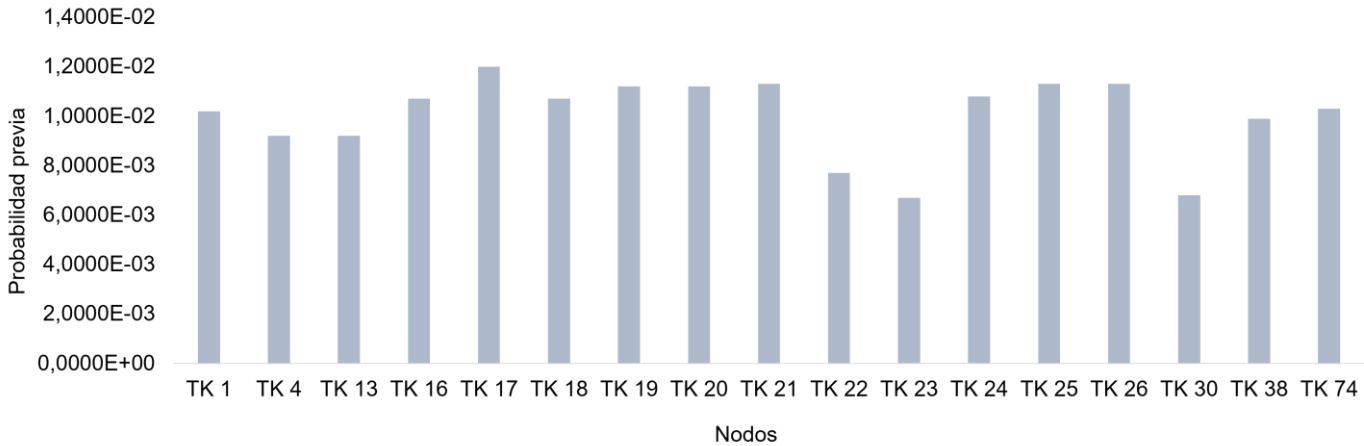


Figura 3.14a Probabilidades previas obtenidas de la BN para cada tanque del área

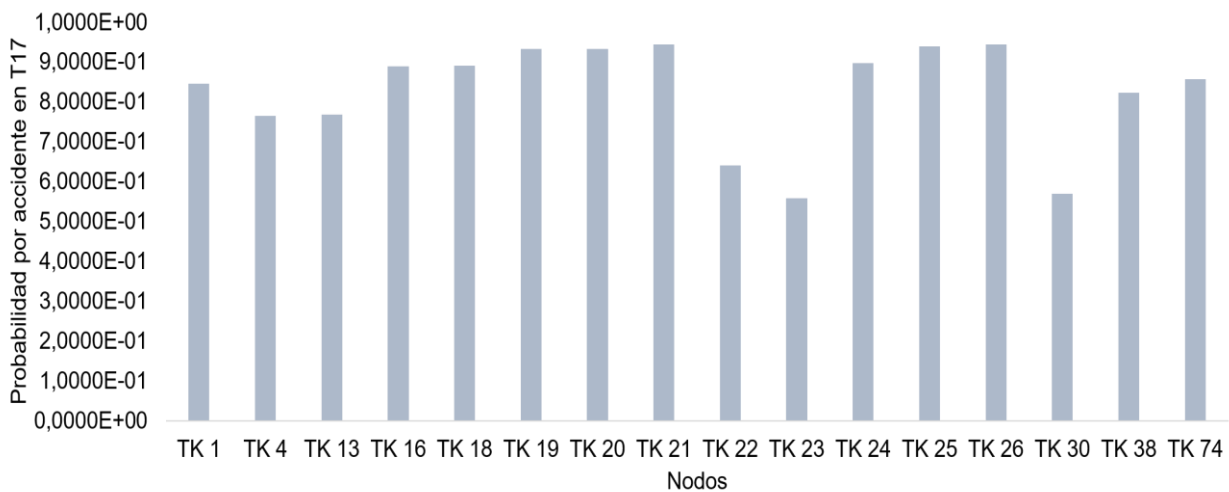


Figura 3.14b. Probabilidades obtenidas de la BN a partir de la ocurrencia del accidente en el tanque 17

De la figura 3.14a el tanque 17 es el de mayor valor de probabilidad previa con 1,2000E-02, esto es debido principalmente a que para este tanque se toma el valor de frecuencia del accidente de charco de fuego obtenido del árbol de eventos, ya que es la unidad primaria e iniciadora del accidente de incendio según lo mostrado en la estructura de la BN de la figura 3.13. El tanque 23 cuenta con el menor valor con 6,7000E-03 de probabilidad previa, valor asociado a la estructura conformada de la BN ya que el tanque 23 está afectado solamente por el tanque 22, por lo tanto se puede decir que mayormente el valor de probabilidad previa está en dependencia de las interacciones que existan entre los tanques, por lo que considerando un mayor número de interacciones posibles dará como resultado un mayor valor de probabilidad

de falla y por lo tanto un valor de probabilidad previa mayor antes de la ocurrencia de un accidente de efecto dominó en el área. En la figura 3.14b se muestran los valores de probabilidad en el momento de la ocurrencia de un accidente de charco de fuego en el tanque 17, el tanque 21 es el más probable con $9,4500E-01$ de probabilidad de continuar y fomentar el inicio del efecto dominó, este resultado está asociado a que recibe radiación de tres tanques, entre los que encuentra el tanque 18, considerado en epígrafes anteriores con un elevado peligro potencial en el área. La figura 3.15 muestra la probabilidad del efecto dominó para tres niveles de escalado sin la detonación del accidente en el tanque 17.

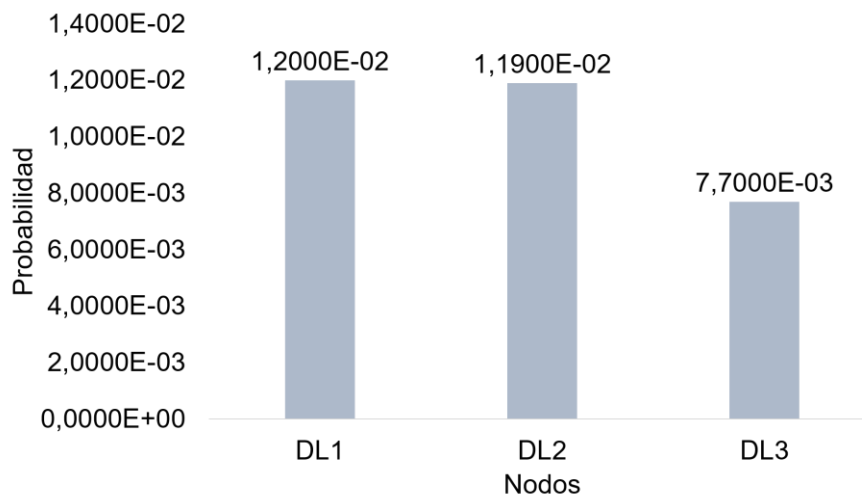


Figura 3.15. Nodos de probabilidad para cada nivel de escalado del efecto dominó

De la figura 3.15 se evidencia que las probabilidades disminuyen a medida que aumentan los niveles de escalado, coincidiendo con Dueñas, Orozco, Furka, *et al.* (2021). Además, se obtuvo la probabilidad conjunta, obtenida de la sumatoria de estos nodos DL con un valor de $3,1600E-02$ (Dueñas *et al.*, 2020).

3.3.3- Combinación de la lógica difusa y criterio de expertos con red Petri probabilística y red Bayesiana (Variante 3)

En esta combinación fue aplicada la lógica difusa para obtener la probabilidad de falla asociada al incendio de charco de fuego, por lo que los valores de la combinación de la variante 2 son los usados en esta. Se introdujeron los nuevos valores de probabilidad de falla en la matriz Petri basándose en la estructura de la PPN aplicada en la primera combinación, se sustituyeron los valores de probabilidad de falla tomados como un valor constante de 0,5000 según Zhou y Reniers (2017) por los valores obtenidos de la lógica difusa según la estructura de dicha red,

con el objetivo de obtener el sinergismo entre los todos los tanques del área. La matriz de la PPN se mantuvo con 16 iteraciones, resultado esperado debido a que no se agregaron nuevas interacciones entre los tanques, solo se actualizaron los valores de la matriz, obteniéndose valores mayores y además se mantuvo la misma estructura que la mostrada en la figura 3.7. Los nuevos valores de la matriz Petri, fueron introducidos en la BN mostrada en la figura 3.9, para obtener la probabilidad conjunta del efecto dominó, esta red no varía su estructura con respecto a la de la primera combinación, solo se actualizan sus valores aprovechando una vez más la ventaja que ofrece esta técnica para la actualización de nueva evidencia, debido a su basamento en el teorema de Bayes y a la utilización del *software* Hugin para su ejecución. Los artículos Dueñas *et al.* (2020); Dueñas, Orozco, Furka, *et al.* (2021); Dueñas, Orozco, Lantigua, *et al.* (2021), son usados para la validación de esta combinación de técnicas. La figura 3.16 muestra los resultados de la aplicación de la PPN con la inclusión de las probabilidades de falla calculadas por lógica difusa con la ayuda del *software* MatLab, para todos los tanques del área de estudio.

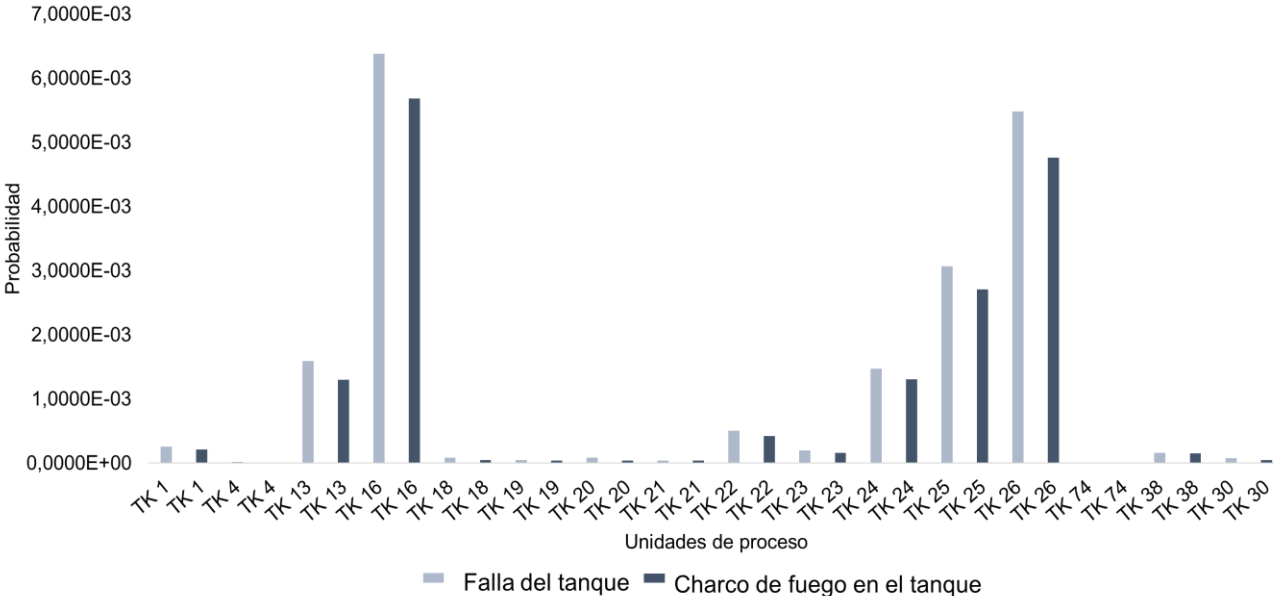


Figura 3.16. Probabilidades de falla e incendio obtenidas por PPN, actualizadas por lógica difusa

Con respecto a la primera combinación, los valores de la figura 3.16 son casi todos mayores debido a que los valores de probabilidad de falla incluyen el debilitamiento del material del tanque, coincidiendo con Dueñas, Orozco, Furka, *et al.* (2021). Como se muestra en la figura

3.16, el tanque 16 mantuvo su probabilidad de falla igual a $6,3826E-03$ como en la primera combinación, debido a que el único tanque de donde recibe afectación es del tanque 17, del cual no hubo cambio en cuanto a la frecuencia del escenario, aunque su probabilidad de falla si tuvo un aumento desde $3,1913E-03$ con respecto a la primera combinación hasta $5,6805E-03$ de probabilidad, por lo tanto el tanque 16 se reafirma y se mantiene como el tanque más vulnerable a fallar y por lo tanto a propagar el efecto dominó a partir de la existencia de un escenario de charco de fuego en el tanque 17, seguido por el tanque 26. Después de haber considerado el efecto sinérgico entre los tanques, los valores de la matriz Petri fueron introducidos en la BN que coincide en estructura con la de la figura 3.9. En la figura 3.17 se muestran los valores de probabilidad para la ocurrencia del escenario de charco de fuego en el tanque 17.

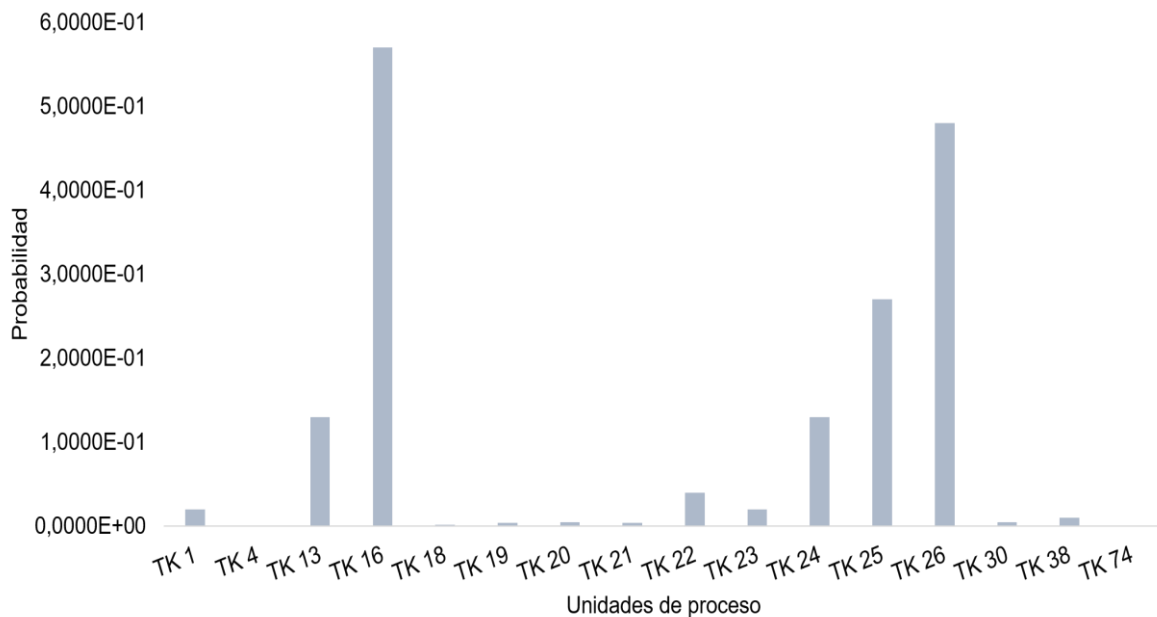


Figura 3.17. Probabilidades obtenidas de la BN para todas las unidades del área

De la figura 3.17, se mantiene el tanque 16 con la mayor probabilidad de propagación del efecto dominó con $5,7000E-01$, aunque tuvo un aumento considerable con la obtenida en la primera combinación con $3,2000E-03$, esto es debido principalmente a que para esta combinación se tuvo en cuenta además de la probabilidad de escalado por radiación térmica, la probabilidad de falla considerando el efecto sinérgico pero con la inclusión en su cuantificación de variables que son afectadas y otras que contribuyen a la falla de una unidad de proceso.

En la figura 3.18 se muestra una comparación de los valores obtenidos en la primera variante de PPN con los de esta combinación y en la figura 3.19 se muestran los nuevos valores de los nodos auxiliares obtenidos a partir de la BN que cuantifican la probabilidad del efecto dominó.

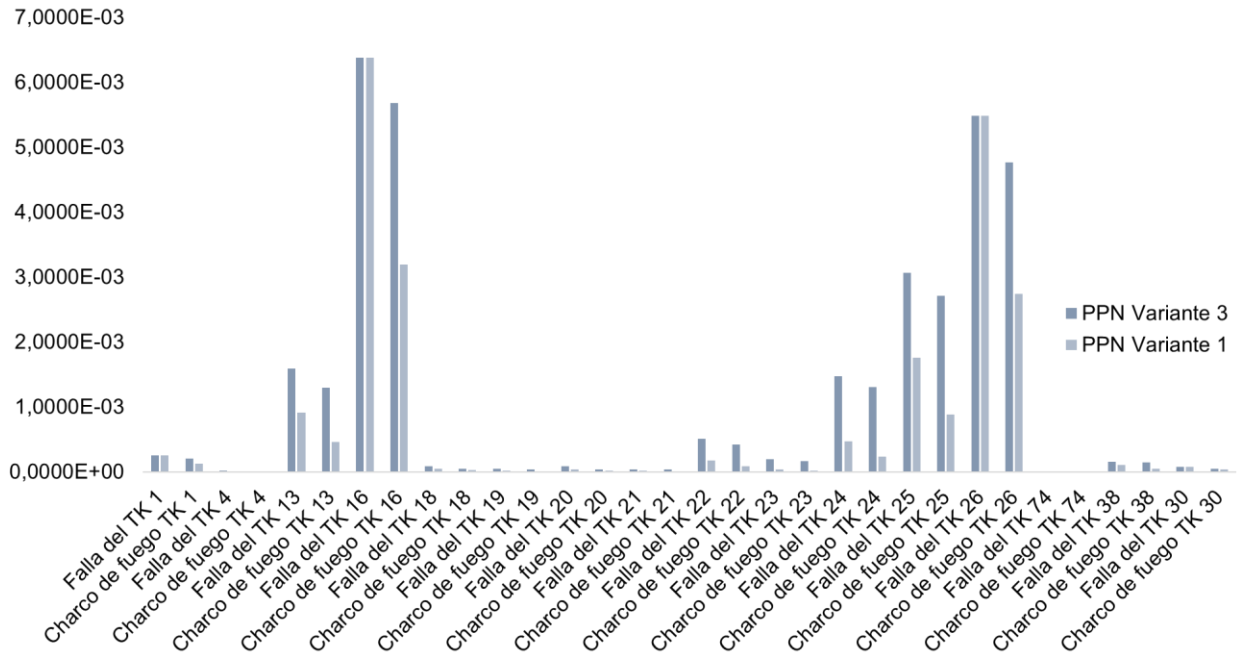


Figura 3.18. Comparación entre los valores de la primera y la tercera variante de PPN

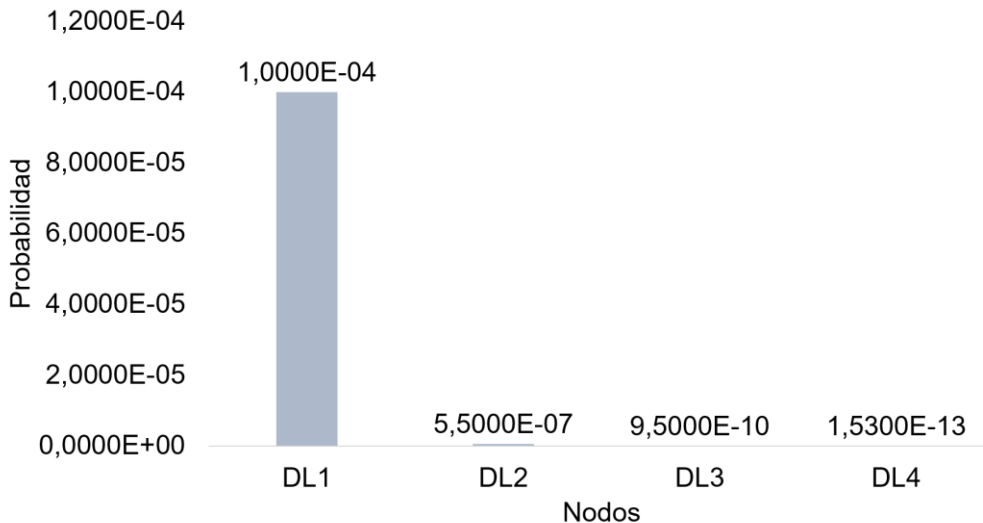


Figura 3.19. Nodos auxiliares DL para cuantificar probabilidad conjunta del efecto dominó

En la figura 3.18 para la tercera variante, para todos los tanques los valores de probabilidad tanto de falla como de accidente de charco de fuego son mayores o iguales a los de la primera.

Por lo que queda demostrado que la probabilidad de falla llevada a cabo por la lógica difusa tiene incluida en su cuantificación un mayor número de variables necesarias a tener en cuenta, de los cuales la falla es dependiente, por lo tanto, se obtienen valores mayores, más precisos y confiables. Los valores de probabilidad de falla obtenidos de la lógica difusa son mayores a los de probabilidad de escalado por radiación térmica, debido principalmente a que la probabilidad de falla incluye la falla debido a la disminución de la resistencia del material, algo que la probabilidad de escalado calculada en epígrafes anteriores no incluye, coincidiendo con lo demostrado por Dueñas, Orozco, Furka, *et al.* (2021). Por otro lado, la figura 3.19, donde según Dueñas *et al.* (2020), a partir de la sumatoria de los nodos auxiliares DL se cuantificó la probabilidad conjunta del efecto dominó, del cual se obtuvo un valor de 1,0055E-04 en esta combinación, considerando el efecto sinérgico y cuatro niveles de escalado. La probabilidad del efecto dominó en los niveles de escalado de esta combinación dieron mayores con respecto a los de la primera, debido a la actualización y aumento de la probabilidad de falla en la BN.

En la PPN se evidencio como el efecto sinérgico aumentaba con las actualizaciones de las probabilidades de falla obtenidas de la lógica difusa, coincidiendo con Dueñas, Orozco, Furka, *et al.* (2021), que el efecto sinérgico de posibles escenarios de charco de fuego aumentan considerablemente las probabilidades. En cuanto a la BN, se alcanzó un valor de 1,0000E-04 de probabilidad del efecto dominó al primer nivel de escalado, lo cual quiere decir que hay alta probabilidad del efecto dominó si ocurriese un accidente de charco de fuego en el tanque 17, esto de acuerdo con lo planteado en dicho artículo.

3.3.4- Análisis de resultados de la combinación de lógica difusa con criterio de expertos y red Bayesiana dinámica (Variante 4)

Los efectos dominó pueden considerarse procesos dependientes del tiempo (Khakzad, 2015; Khakzad, 2021a). En esta combinación la lógica difusa fue programada para obtener la evolución en el tiempo de la probabilidad del escenario de charco de fuego y posteriormente se aplicó la Red Bayesiana Dinámica (DBN) para cuantificar la probabilidad debido a la evolución en el tiempo del efecto dominó si existiese la ocurrencia de un escenario de charco de fuego en el tanque 17 como evento iniciador. Para la construcción de la DBN fue necesario desarrollarla en el *software* Hugin creando varias redes, las cuales se muestran en los anexos 46, 47, 48, 49

y 50 para las subáreas 1, 2 y 3 y los tiempos de evolución 1 y 2, esto debido a la limitación de dicho *software* de solo permitir 24 nodos.

Los resultados de la lógica difusa son mostrados en el anexo 51 los mismos están basados y asociados a tres factores: tiempo del accidente entre el tiempo de falla mínimo (TACC/TTF), probabilidad de escalado mayor provocada por radiación térmica (PERAD) y las acciones de mitigación (MIT), estos tres factores fueron introducidos en MatLab para obtener el valor de evolución en el tiempo de la probabilidad del escenario de incendio como única variable de salida. El mayor valor de probabilidad se encuentra para la evolución del accidente desde el tanque 17 hacia el tanque 16, con el mayor valor del factor PERAD de $5,3190E-01$ de probabilidad y por lo tanto correspondiéndole el menor tiempo de falla con 572 s, sobresaliendo la corta distancia de 55 m que existe entre ambos tanques. La subárea 3 con $6,5000E-01$ es el segundo valor más probable, con un valor del factor PERAD de $4,3250E-01$ de probabilidad, debido principalmente a la corta distancia que existe entre los tanques de esta subárea. Para el escalado desde la subárea 3 hacia la 2 con un valor de $2,2700E-01$ siendo en más bajo, hace que sea muy poco probable la evolución de un accidente desde la subárea 3 hacia la 2. El tanque 17 es el que más interacciones contempla, ya que es la unidad primaria donde comienza el escenario de incendio. Por lo tanto, el inicio de un accidente en el tanque 17 tiene la mayor probabilidad en el tiempo de escalar hacia el tanque 16; las variables tales como el TTF, la distancia entre los tanques y los tres factores, en específico el PERAD, tienen un alto impacto ya que son imprescindibles para la obtención de los resultados de estas técnicas de inteligencia artificial (AI). Para validar esta combinación se hará uso del artículo de Khakzad (2021b).

La figura 3.20 muestra tres variantes de superficies de respuesta obtenidas de la aplicación de la lógica difusa, en función de los tres factores tenidos en cuenta.

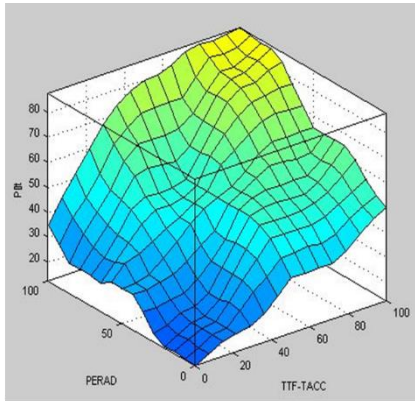


Figura 3.20a. Superficie de respuesta considerando los factores PERAD y TTF-TACC

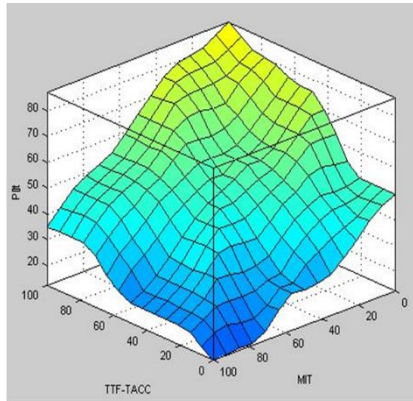


Figura 3.20b. Superficie de respuesta considerando los factores MIT y TTF-TACC

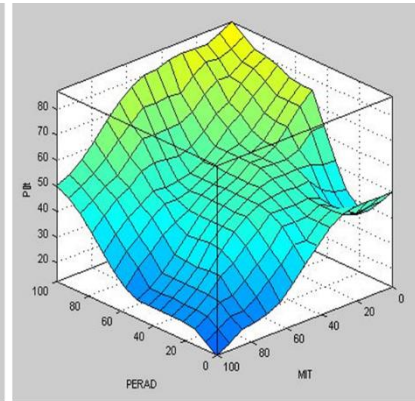


Figura 3.20c. Superficie de respuesta considerando los factores MIT y PERAD

Las figuras 3.20 muestran la relación de los factores usados en el desarrollo de la lógica difusa para la cuantificación de la probabilidad de evolución en el tiempo del escenario de incendio, para el factor TTF-TACC en los casos que se obtiene un 100%, quiere decir que existen tiempos de fallas mínimos, que relacionado al tiempo de accidente de 3600 s son más que suficiente para la detonación del accidente y por lo que se obtienen valores mayores a 1 y se establece un 100%. El factor MIT es constante para todos los casos, el cual muestra un valor medio, que en caso de ser mayor, este podría hacer que disminuyera la probabilidad de la evolución temporal del accidente, además según Khakzad (2021b) es un factor de gran importancia para la evaluación de la evolución de accidentes de incendio en el tiempo. La combinación del factor PERAD con el MIT mostrada en la figura 3.20c, es la que provoca el valor más elevado de probabilidad ($P\Delta t$).

Los valores de probabilidad obtenidos de la lógica difusa son la fuente de información para la DBN, específicamente para evaluar la evolución en el tiempo del accidente de incendio. La figura 3.21 muestra la DBN general obtenida hasta el tercer segmento de tiempo considerado, a partir del *software* Hugin.

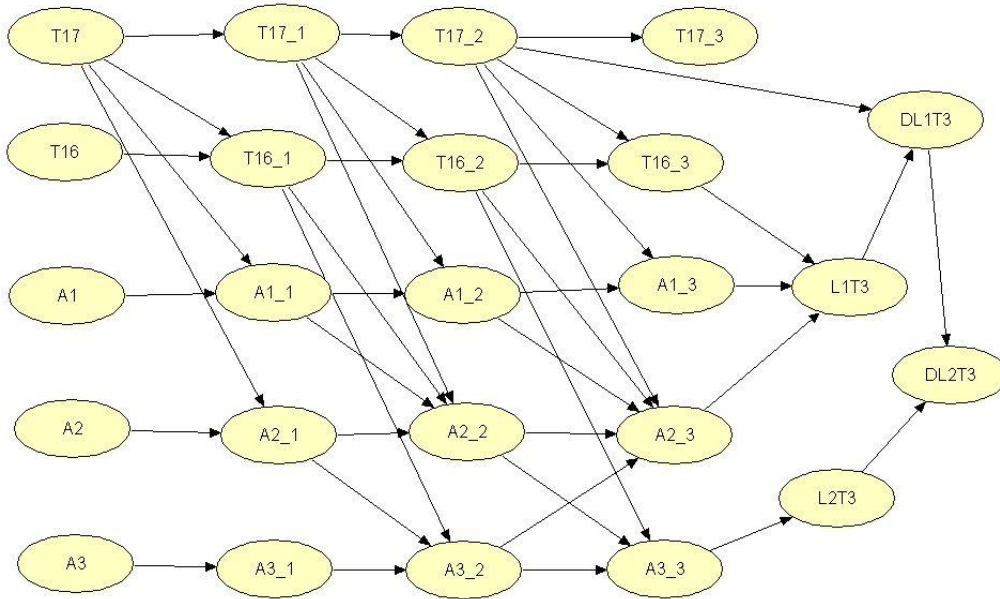


Figura 3.21. Red Bayesiana dinámica para cuantificar la evolución en el tiempo del efecto dominó

La figura 3.21 fue construida y enlazada entre los diferentes tanques teniendo en cuenta el criterio de probabilidad de escalado por radiación térmica, valor obtenido a partir de las ecuaciones Probit y para enlazar los nodos de una misma unidad de proceso se utilizó la probabilidad obtenida de la lógica difusa, estos nodos donde aparece un número separado por un guión bajo, están representando el segmento de tiempo en que se encuentra el accidente. Las figuras 3.22a y 3.22b muestran los resultados de las probabilidades previas y con accidente en cada nodo respectivamente, de los cuales se obtuvo los valores de los nodos auxiliares DL₁ y DL₂ para los tres segmentos de tiempo que se consideraron. El anexo 52 muestra todos los resultados obtenidos.

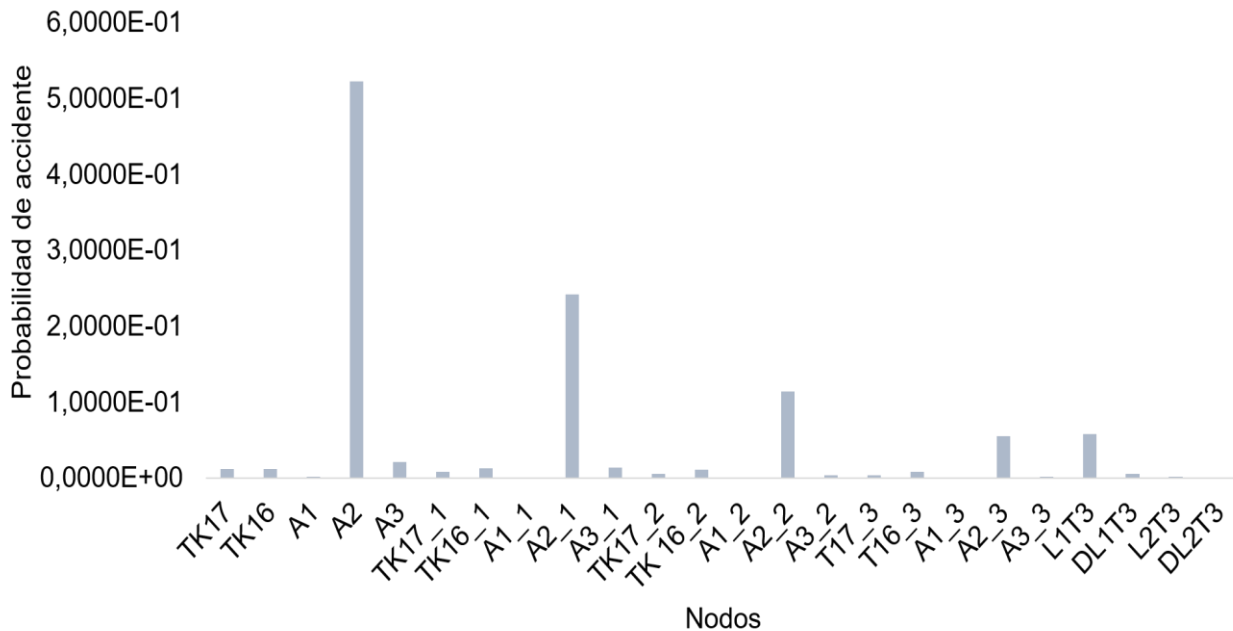


Figura 3.22a. Valores de probabilidades previas obtenidas de la DBN

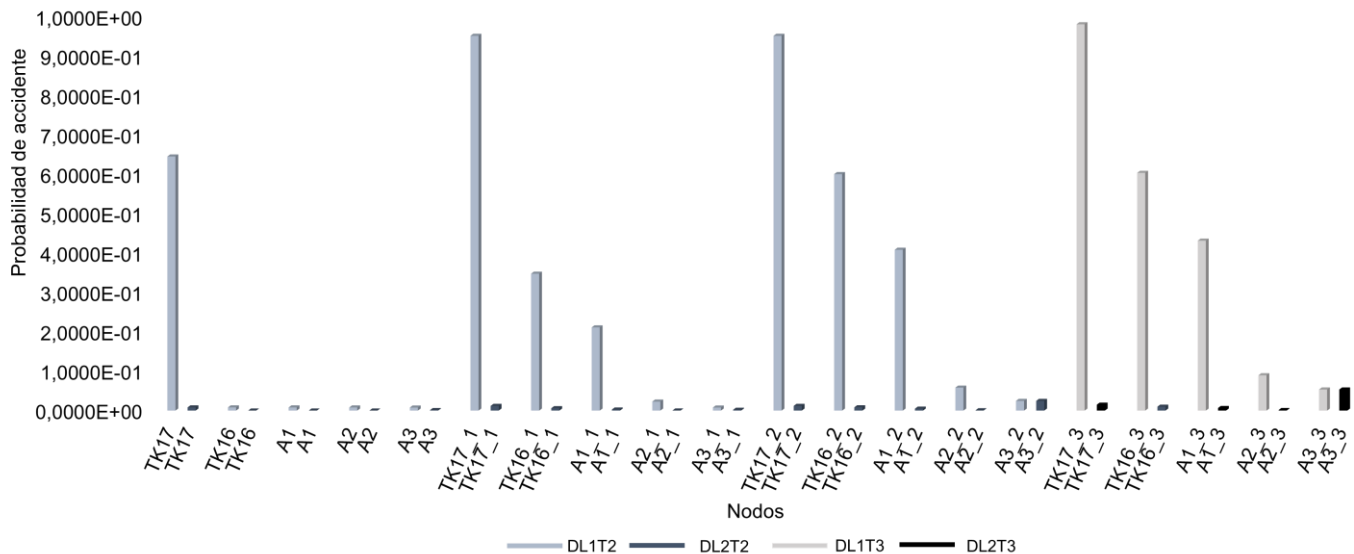


Figura 3.22b. Valores de los nodos auxiliares DL, para el tiempo 2 y 3 con la ocurrencia de accidente en cada nodo

Según la figura 3.22a las probabilidades previas se refieren a la no existencia aún de accidente en ninguna unidad del área, en este caso la subárea 2 presenta la mayor probabilidad de que ocurra un accidente y evolucione en el tiempo con $5,2280E-01$ de probabilidad, además se puede apreciar claramente como los valores previos de probabilidad decrecen con el tiempo debido a la no existencia de accidente. En la figura 3.22b la probabilidad del nodo DL₁T₃ debido a la evolución del accidente en el tanque 17 en el tercer segmento de tiempo considerado, tiene el mayor valor con $9,8100E-01$, por lo que se puede afirmar, que los valores de probabilidad por

evolución en el tiempo de un accidente ya sea en un área o un tanque determinado, van aumentando a medida que pasa el tiempo desde el inicio del accidente, coincidiendo con Khakzad (2021b).

La tabla 3.4 muestra a modo de resumen los principales resultados obtenidos después de la aplicación de las cuatro variantes de combinaciones de técnicas de AI.

Tabla 3.4 Principales resultados obtenidos de las cuatro variantes de técnicas aplicadas.

Variante	1	2	3	4
Combinación	PPN+BN	FL+BN	FL+PPN+BN	FL+DBN
Probabilidad de falla	TK16	TK20	TK16	-
Propagación del efecto dominó	TK16	TK21	TK16	TK16
Probabilidad conjunta del efecto dominó	7,3405E-05	3,1600E-02	1,0055E-04	5,4826E-01

Aunque para la segunda variante mostrada en la tabla 3.4 los tanques que obtuvieron las mayores probabilidades fueron el 20 el cual tiene la mayor probabilidad de falla y el tanque 21 que tiene la mayor probabilidad de propagación precisamente por la cercanía de 17 m entre estos tanques y la alta radiación de 19 kW/m² emitida desde el tanque 20. Se puede concluir ya que fue el resultado que predominó, que el tanque 16 es el más probable a fallar y propagar el efecto dominó en el área después de la ocurrencia de un accidente de charco de fuego en el tanque 17, resaltando dos variables fundamentales, la radiación térmica y la distancia entre estos tanques; para la tercera combinación se tomó el valor de falla después de haber considerado el efecto sinérgico a partir de la PPN. Además, para la combinación de lógica difusa y DBN también coincide con que si ocurriera un accidente en el tanque 17 provocaría que el tanque 16 tenga la mayor probabilidad por evolución en el tiempo del efecto dominó, aumentando su probabilidad a medida que avanza el tiempo después del inicio del accidente. Por lo que la secuencia de inicio del efecto de dominó más probable en el área podría ser: charco de fuego en el tanque 17, seguido por el incendio del 16 y posteriormente el tanque 26.

3.4- Comparación de técnicas de AI aplicadas según los resultados obtenidos (Etap 7)

A partir de los resultados obtenidos de las combinaciones de las técnicas de AI y su posterior análisis, el presente epígrafe muestra de manera concluyente la aplicabilidad que mejor se acopla al objetivo que se quiera lograr. La tabla 3.5 muestra las cuatro variantes de

combinaciones de técnicas de AI y las características objetivas que se incluyen en esta investigación.

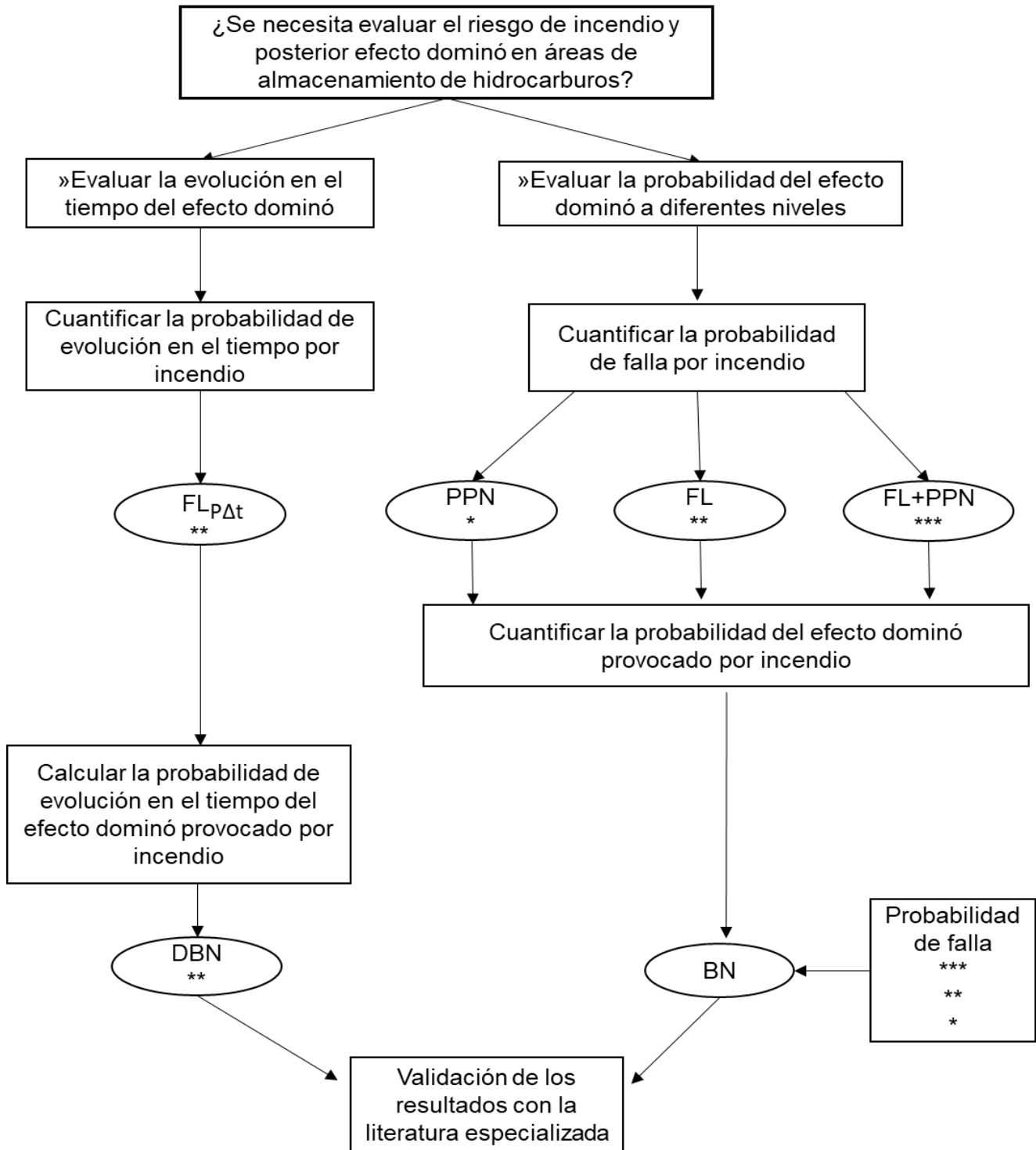
Tabla 3.5. Combinaciones de las técnicas de AI y sus aplicaciones en la investigación

Características	Combinaciones de técnicas aplicadas			
	PPN+BN	FL+BN	FL+PPN+BN	FL+DBN
Determinación de la probabilidad de falla	-	x	x	-
Determinación del efecto sinérgico del efecto dominó	x	x	x	-
Determinación de la probabilidad del efecto dominó a diferentes niveles	x	x	x	x
Determinación de la probabilidad del efecto dominó	x	x	x	x
Determinación de la probabilidad por evolución en el tiempo de accidentes de incendio	-	-	-	x
Determinación de la probabilidad de evolución en el tiempo del efecto dominó	-	-	-	x

En cuanto a la segunda combinación de la tabla 3.5, de esta se obtuvieron valores de probabilidad por la lógica difusa bastante elevados sin haber considerado el efecto sinérgico entre los tanques, el cual es considerado después al ser introducidos en la BN, obteniéndose en la misma valores también elevados. Por lo que, es más recomendable antes de introducir los valores en la BN, considerar la cuantificación del efecto sinérgico a través de la PPN, manteniendo la lógica difusa para el cálculo de la probabilidad de falla ya que con la misma se consideran un mayor número de variables relacionadas a la falla de una unidad de proceso, obteniéndose resultados más realistas. La tercera combinación es la más recomendable ya que cubre la mayor cantidad de características en cuanto a la fiabilidad del uso de cada técnica para un objetivo específico a la hora de desarrollar una evaluación de riesgo en cualquier industria

donde se manejen y almacenen sustancias inflamables, aunque es válido resaltar que solo por la cuarta combinación la cual incluye DBN, se puede obtener la probabilidad de la evolución en el tiempo del escenario de incendio y del efecto dominó, ya que según Khakzad (2021b) estas proporcionan más flexibilidad para modelar interdependencias tanto espacial como temporalmente, lo cual no es posible en una BN ordinaria. Aunque todavía es necesario abordar algunos problemas de modelado para mejorar el rendimiento de DBN y aumentar la precisión de los resultados, entre estos el efecto sinérgico durante el efecto dominó propagado por incendio, lo cual puede conducir a un crecimiento exponencial de la de probabilidad condicional de la unidad objetivo a medida que aumenta el número de incendios simultáneos en las proximidades de la unidad (Khakzad, 2021b).

A pesar de que estas técnicas de AI permiten realizar análisis de riesgo más profundos, la necesidad de mantener las técnicas clásicas es eminente, debido a que son la fuente de información primaria para la aplicación de las técnicas de AI y sin técnicas tales como: la simulación de escenarios, el análisis histórico de accidentes, los modelos Probit y los árboles de eventos, las AI no tuvieran una fuente de información confiable para su aplicación. La figura 3.23 muestra un esquema orientativo que simula un árbol de decisiones con el objetivo de facilitar la elección de estas combinaciones de técnicas de AI para la evaluación de riesgo industrial.



- Preguntas pruebas**
- ¿Se necesita elevada cantidad de datos?
 - ¿Es fácil de aplicar?
 - ¿Se necesita usar *software*?
 - ¿Se considera el sinergismo?

Nivel de fiabilidad
 *** Alto
 ** Medio
 * Medio-Bajo

Figura 3.23. Árbol de decisión para evaluar riesgo con técnicas de AI

Con la utilización de la figura 3.23, se pueden obtener resultados como los evaluados en esta investigación, aunque como fue establecido anteriormente, las aplicaciones de estas técnicas requieren la implementación de las técnicas clásicas como las usadas en la investigación, para lograr mejores y más confiables resultados. Las preguntas pruebas fueron diseñadas para evaluar cada técnica y asignarle una calificación de fiabilidad en dependencia de las mismas, la formulación de estas preguntas fue basada en la experiencia que se obtuvo a través de la realización de esta investigación. Estas preguntas fueron aplicadas a cada técnica, en dependencia si la respuesta es negativa o positiva es el nivel de fiabilidad que se le otorga a la técnica, siendo para la mayor fiabilidad el mayor acierto de preguntas. La decisión de aplicar una variante u otra está en dependencia del nivel de fiabilidad que se desee obtener teniendo en cuenta las preguntas pruebas.

3.5- Conclusiones parciales

1. El tanque 30 es el que mayor diámetro de charco y longitud de llama genera con 60 y 61 metros respectivamente, aunque la mayor intensidad de radiación térmica es de 33,2 kW/m² emitida desde el tanque 18 hacia el 20 y el tanque 17 fue determinado como el que más peligro dentro del área presenta, resalta su centrada ubicación y su máxima de radiación térmica de 187 kW/m².
2. Se obtuvo un valor de probabilidad de ignición directa de 0,2 y a partir del del árbol de eventos la sustancia que mayor frecuencia de derrame presentó fue el *fuel oil* con 0,0400 a⁻¹.
3. Los tanques que mayor peligro potencial generan son el 30, 17 y 18 pertenecientes a las subáreas 1, 2 y 3 respectivamente, por sus máximas radiaciones emitidas a mayores distancias que en comparación con los tanques restantes del área.
4. Para las variantes 1 y 3 de las combinaciones de técnicas de AI aplicadas, los valores de probabilidad de falla de la PPN se obtuvieron en la iteración 16 y el tanque 16 obtuvo el mayor valor de probabilidad de falla en toda el área de estudio, aunque el tanque 20 fue el que mayor valor obtuvo de probabilidad de falla usando lógica difusa con criterio de expertos.
5. La introducción de los nodos Li y DLi permitieron obtener a partir de la BN la probabilidad del efecto dominó a diferentes niveles de escalado, la cual disminuye a medida que

aumentan los mismos y el efecto sinérgico aumenta considerablemente las probabilidades del efecto dominó.

6. La lógica difusa fue aplicada en la variante 4 para obtener la probabilidad de evolución en el tiempo del escenario de charco de fuego y a partir de la DBN se obtuvieron los valores de probabilidad por evolución en el tiempo del efecto dominó, de los cuales el tanque 16 tiene la mayor probabilidad de evolución en el tiempo por el escenario de incendio a partir de la ocurrencia de un escenario primario de charco de fuego en el tanque 17.
7. La evolución en el tiempo previa al accidente disminuye a medida que avanza el tiempo, al contrario de la evolución en el tiempo con la detonación de accidente, la cual aumenta considerablemente a medida que evoluciona el tiempo.
8. La tercera variante es la más recomendada para cuantificar la probabilidad de falla y del efecto dominó, siendo la variante cuatro la única capaz de cuantificar la probabilidad por evolución en el tiempo del efecto dominó.
9. El árbol de decisiones muestra de forma objetiva la aplicación de cada técnica, además facilita el proceso de aplicación de las mismas.

Conclusiones

1. Las combinaciones de técnicas de AI con otras clásicas de análisis de riesgo permitieron determinar las probabilidades de ocurrencia del efecto dominó en el almacenamiento de hidrocarburos, con valores altos acorde a lo planteado por la literatura especializada.
2. Los accidentes de incendio pueden provocar la detonación de secuencias de efecto dominó, la secuencia más probable en el área es: charco de fuego en el tanque 17, seguido por el incendio del 16 y posterior escalado al tanque 26.
3. La combinación de técnicas de AI más real aplicada fue la lógica difusa con criterio de expertos, red Petri probabilística y red Bayesiana, de la cual se obtuvo una probabilidad conjunta del efecto dominó de $1,0055E-04$, valor considerado alto.
4. El árbol de decisiones facilita la aplicación de las técnicas de AI propuestas y propone un esquema orientativo para su aplicación en áreas de almacenamiento de hidrocarburos.

Recomendaciones

1. Mejorar los terrenos cercanos a los tanques, haciendo que cumplan con las debidas inclinaciones del suelo para evitar formaciones de charcos de combustible cerca de los tanques en caso de derrame.
2. En casos de construcción de nuevos tanques en el área, aumentar las distancias entre los mismos, así como los espesores, cumpliendo con lo que se plantea en la literatura especializada.
3. Automatizar el proceso de recolección de datos históricos, para facilitar futuros análisis de riego, haciéndolos más confiables y precisos.
4. Aumentar la frecuencia de mantenimiento a los tanques del área, así como a los sistemas de protección antincendios.
5. Aplicar la metodología con la tercera y la cuarta combinación de técnicas en otras áreas de la empresa.
6. Usar el árbol de decisión desarrollado en el marco de esta investigación para la predicción de la probabilidad del efecto dominó por incendio en un área de almacenamiento de hidrocarburos.

Referencias:

- Adedipe, T., Shafiee, M. y Zio, E. (2020). Bayesian Network Modelling for the Wind Energy Industry: An Overview. *Reliability Engineering and System Safety*, 202, Article 107053. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107053>
- Ahmadi, O., Mortazavi, S. B., Mahabadi, H. A. y Pouri, M. H. (2020). Development of a dynamic quantitative risk assessment methodology using fuzzy DEMATEL-BN and leading indicators. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.038>
- Ahn, J. y Chang, D. (2016). Fuzzy-based HAZOP Study for Process Industry. *Journal of Hazardous Materials*. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.jhazmat.2016.05.096>
- Alileche, N., Cozzani, V., Reniers, G. y Estel, L. (2015). Thresholds for domino effects and safety distances in the process industry: A review of approaches and regulations. *Reliability Engineering and System Safety*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2015.04.007>
- Alileche, N., Olivier, D., Estel, L. y Cozzani, V. (2016). Analysis of domino effect in the process industry using the event tree method. *Safety Science*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2015.12.028>
- ALOHA. (2016). *EPA Software*. In www.epa.gov/cameoaloha/software
- Amin, T., Khan, F. y Zuo, M. J. (2019). A bibliometric analysis of process system failure and reliability literature. *Engineering Failure Analysis*, 106, Article 104152. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104152>
- Atkinson, G., Coldrick, S., Gant, S. y Cusco, L. (2014). Flammable vapor cloud generation from overfilling tanks: learning the lessons from Buncefield. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.11.011>
- Aziz, A., Ahmed, S. y Khan, F. I. (2018). An Ontology-based Methodology for Hazard Identification and Causation Analysis. *Process Safety and Environment Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.12.008>

- Beuzen, T., Marshall, L. y Splinter, K. D. (2018). A comparison of methods for discretizing continuous variables in Bayesian Networks. *Environmental Modelling & Software*, 108, 61-66. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.07.007>
- Bevi. (2009). *Reference Manual Bevi Risk Assessments*. National Institute of Public Health and the Environment (RIVM). (Handleiding Risicoberekeningen Bevi versie 3.2)
- Birk, A. M. (2017). Shock Waves and Condensation Clouds from Industrial BLEVEs and VCEs. *Process Safety and Environment Protection*. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.psep.2017.06.017>
- Boral, S., Howard, I., Chaturvedi, S. K., McKee, K. y Naikan, V. N. A. (2019). An Integrated Approach for Fuzzy Failure Modes and Effects Analysis using Fuzzy AHP and Fuzzy MAIRCA. *Engineering Failure Analysis*. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104195>
- Bosch, C. J. H. v. d. y Weterings, R. A. P. M. (2005). *Methods for the calculation of physical effects. Due to releases of hazardous materials (liquids and gases)*. 'Yellow Book'. CPR 14E
- Budd, C. J. y Ugwuz, U. O. (2019). Modelling the view factor of a 'grain-like' observer near a tilted pool fire via planar approximation approach. *Applied Mathematical Modelling*, 65, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.07.037>
- Cadini, F. y Gioietta, A. (2016). A Bayesian Monte Carlo-Based Algorithm For The Estimation Of Small Failure Probabilities Of Systems Affected By Uncertainties. *Reliability Engineering and System Safety*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2016.04.003>
- CAMEO Chemicals. (2016). <https://cameochemicals.noaa.gov/>
- Casal, J., Montiel, H., Planas, E. y Vílchez, J. A. (2002). *Análisis del riesgo en instalaciones industriales* www.edicionsupc.es
- Celano, F. y Dolsek, M. z. (2020). Fatality risk estimation for industrialized urban areas considering multi-hazard domino effects triggered by earthquakes. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107287>

- Changlong, Z., Juncheng, J. y Xiongjun, Y. (2012). Study on ignition probability of flammable materials after leakage accidents. *Procedia Engineering*, 45, 435-441. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.182>
- Chen, C., Khakzad, N. y Reniers, G. (2020). Dynamic vulnerability assessment of process plants with respect to vapor cloud explosions. *Reliability Engineering and System Safety.*, 200, Article 106934. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106934>
- Chen, C., Reniers, G. y Khakzad, N. (2019). Integrating safety and security resources to protect chemical industrial parks from man-made domino effects: A dynamic graph approach. *Reliability Engineering and System Safety*, 191, Article 106470. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.04.023>
- Chen, C., Reniers, G. y Khakzad, N. (2020). A thorough classification and discussion of approaches for modeling and managing domino effects in the process industries. *Safety Science*, 125, Article 104618. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104618>
- Chen, F., Wang, C., Wang, J., Zhi, Y. y Wang, Z. (2020). Risk assessment of chemical process considering dynamic probability of near misses based on Bayesian theory and event tree analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 68, Article 104280. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104280>
- Chen, J., Zhong, P.-A., An, R., Zhu, F.-I. y Xu, B. (2018). Risk analysis for real-time flood control operation of a multi-reservoir system using a dynamic Bayesian network. *Environmental Modelling and Software*. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.007>
- Cirimello, P. G., Otegui, J. L., Ramajo, D. y Carfi, G. (2019). A major leak in a crude oil tank: Predictable and unexpected root causes. *Engineering Failure Analysis*, 100, 456-469. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.02.005>
- Cozzani, V. y Reniers, G. (2015). Special Issue: Domino effects in the process industry – Advancing the state of the art. *Reliability Engineering and System Safety*, 143, 1-2. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2015.08.001>
- Cozzani, V. y Reniers, G. (Eds.). (2021). *DYNAMIC RISK ASSESSMENT AND MANAGEMENT OF DOMINO EFFECTS AND CASCADING EVENTS IN THE PROCESS INDUSTRY*. Susan Dennis. <https://www.elsevier.com/books-and-journals>.

- Danial, S. N., Khan, F. y Veitch, B. (2018). A Generalized Stochastic Petri Net model of route learning for emergency egress situations. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 72, 170-182. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.03.024>
- Ding, L., Khan, F., Abbassi, R. y Ji, J. (2019). FSEM: An approach to model contribution of synergistic effect of fires for domino effects. *Reliability Engineering and System Safety*, 189, 271-278. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.04.041>
- Ding, L., Khan, F. y Ji, J. (2020). A Novel Approach for Domino Effects Modeling and Risk Analysis based on Synergistic Effect and Accident Evidence. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107109>
- Djelosevic, M. y Tepic, G. (2019). Identification of fragmentation mechanism and risk analysis due to explosion of cylindrical tank. *Journal of Hazardous Materials*, 362, 17-35. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.09.013>
- Duan, Z., Ding, G., Tang, W. y Ren, T. (2020). A thermodynamic model for predicting transient pressure evolution in response to venting and vaporization of liquefied gas under sudden release. *Journal of Hazardous Materials*, 395, Article 122460. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122460>
- Dueñas, J. A., Miranda, A. G., Orozco, J. L., Arana, Y. C., Lantigua, D. F. y Febles, J. S. (2020). How to Determine Individual Risk Due to Toxic, Fire, and Explosion Accidents in a Hydrocarbon Processing Area? *International Journal of Petroleum Technology*, 7, 60-73.
- Dueñas, J. A., Orozco, J. L., Furka, D., Furka, S., Boza Matos, Y. C., Febles Lantigua, D., González Miranda, A. y Barrera González, M. C. (2021). A new Fuzzy-Bayesian approach for the determination of failure probability due to thermal radiation in domino effect accidents. *Engineering Failure Analysis*, 120, Article 105106. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105106>
- Dueñas, J. A., Orozco, J. L., Lantigua, D. F., Furka, D., Furka, D. y Cruz, A. G. (2021). Using integrated Bayesian-Petri Net method for individual impact assessment of domino effect accidents. *Journal of Cleaner Production*, 294, Article 126236. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126236>
- Eldosouky, A., Saad, W. y Mandayam, N. (2021). Resilient critical infrastructure: Bayesian network analysis and contract-Based optimization. *Reliability Engineering and System Safety*, 205, Article 107243. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107243>

- Fakhravar, D., Khakzad, N., Reniers, G. y Cozzani, V. (2017). Security vulnerability assessment of gas pipelines using Discrete-time Bayesian network. *Process Safety and Environmental Protection*, 3, 714-725. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.036>
- Florido, J. A. (2009). El informe Buncefield. *Prevención de Incendios*, 41, 34-37.
- Gascard, E. y Simeu-Abazi, Z. (2018). Quantitative Analysis of Dynamic Fault Trees by means of Monte Carlo Simulations: Event-Driven Simulation Approach. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.07.011>
- Guo, C., Khan, F. y Imtiaz, S. (2019). Copula-based Bayesian Network Model for Process System Risk Assessment. *Process Safety and Environment Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.022>
- Gyenes, Z., Wood, M. H. y Struckl, M. (2017). *Handbook of Assessing Major Accident Risks Scenarios for Chemical*. Joint Research Centre (JRC). <https://ec.europa.eu/jrc>
- Hailwood, M., Gawlowski, M., Schalau, B. y Schönbacher, A. (2009). Conclusions Drawn from the Buncefield and Naples Incidents Regarding the Utilization of Consequence Models. *Chem. Eng. Technol*, 32, 207-231. <https://doi.org/10.1002/ceat.200800595>
- He, Z. y Weng, W. (2020). A dynamic and simulation-based method for quantitative risk assessment of the domino accident in chemical industr. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.014>
- Hemmatian, B., Planas, E. y Casal, J. (2015). Fire as a primary event of accident domino sequences: The case of BLEVE. *Reliability Engineering and System Safety*, 139, 141-148. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.021>
- Herbert, I. (2010). The UK Buncefield incident e The view from a UK risk assessment engineer. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23, 913-920. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.09.001>
- Hou, L., Wu, X., Wu, Z. y Wu, S. (2020). Pattern identification and risk prediction of domino effect based on data mining methods for accidents occurred in the tank farm. *Reliability Engineering and System Safety*, 193, Article 106646. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106646>

- Hu, J., Zhang, L., Tian, W. y Zhou, S. (2017). DBN based failure prognosis method considering the response of protective layers for the complex industrial systems. *Engineering Failure Analysis*.<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.04.015>
- HUGIN. (2019). (Version 8.7) <https://www.hugin.com>
- Iuliis, M. D., Kammouh, O., Cimellaro, G. P. y Tesfamariam, S. (2018). Downtime estimation of building structures using fuzzy logic. *International Journal of Disaster Risk Reduction*.<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.11.017>
- Jin, Y. y Jang, B.-S. (2020). Determination of gas cloud shape for explosion risk analysis of offshore topside process area. *Process Safety and Environmental Protection*, 133, 183-200.<https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.012>
- Johnson, D. M. (2010). The potential for vapour cloud explosions e Lessons from the Buncefield accident. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23, 921-927.<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.06.011>
- Johnson, D. M., Denton, G. N., Loughborough y Leics. (2012). VAPOUR CLOUD EXPLOSION AT THE IOC TERMINAL IN JAIPUR.
- Jujuly, M. M., Rahman, A., Ahmed, S. y Khan, F. (2015). LNG pool fire simulation for domino effect analysis. *Reliability Engineering and System Safety*.<http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2015.02.010>
- Kabir, S. y Papadopoulos, Y. (2018). A review of applications of fuzzy sets to safety and reliability engineering. *International Journal of Approximate Reasoning*.<https://doi.org/10.1016/j.ijar.2018.05.005>
- Kabir, S. y Papadopoulos, Y. (2019). Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments: A review. *Safety Science*, 115, 154-175.<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.009>
- Kamil, M. Z., Taleb-Berrouane, M., Khan, F. y Ahmed, S. (2019). Dynamic Domino Effect Risk Assessment Using Petri-nets. *Process Safety and Environment Protection*.<https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.02.019>

- Khakzad, N. (2015). Application of dynamic Bayesian network to risk analysis of domino effects in chemical infrastructures. *Reliability Engineering and System Safety*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2015.02.007>
- Khakzad, N. (2021a). Optimal firefighting to prevent domino effects: Methodologies based on dynamic influence diagram and mathematical programming. *Reliability Engineering and System Safety*, 212, Article 107577. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107577>
- Khakzad, N. (2021b). A Tutorial on Fire Domino Effect Modeling Using Bayesian Networks. *Modelling*, 2, 240-258. <https://doi.org/10.3390/modelling2020013>
- Khakzad, N., Amyotte, P., Cozzani, V., Reniers, G. y Pasman, H. (2018). How to address model uncertainty in the escalation of domino effects? *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.03.001>
- Khakzad, N., Landucci, G., Cozzani, V., Reniers, G. y Pasman, H. (2017). Cost-effective fire protection of chemical plants against domino effects. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.09.007>
- Khakzad, N. y Reniers, G. (2015). Risk-based design of process plants with regard to domino effects and land use planning. *Journal of Hazardous Materials*, 299, 289-297. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.06.020>
- Khakzad, N., Reniers, G., Abbassi, R. y Khan, F. (2016). Vulnerability analysis of process plants subject to domino effects. *Reliability Engineering and System Safety*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2016.06.004>
- Khan, F., Amyotte, P. y Adedigba, S. (2020). Process safety concerns in process system digitalization. *Education for Chemical Engineers*. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2020.11.002>
- Khan, F., Rathnayaka, S. y Ahmed, S. (2015). Methods and Models in Process Safety and Risk Management: Past, Present and Future. *Process Safety and Environment Protection*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2015.07.005>
- Landucci, G., Necci, A., Antonioni, G., Argenti, F. y Cozzani, V. (2017). Risk assessment of mitigated domino scenarios in process facilities. *Reliability Engineering and System Safety*, 160, 37-53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2016.11.023>

- Lee, S.-H., Kang, J. E., Park, C. S., Yoon, D. K. y Yoon, S. (2020). Multi-risk assessment of heat waves under intensifying climate change using Bayesian Networks. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, Article 101704. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101704>
- Lee, S.-H. y Song, J. (2016). Bayesian-network-based system identification of spatial distribution of structural parameters. *Engineering Structures*, 127, 260-277. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.08.029>
- Leite, R. M. y Centeno, F. R. (2017). Effect of tank diameter on thermal behavior of gasoline and diesel storage tanks fires. *Journal of Hazardous Materials*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.052>
- Lian, Z. y Zhang, Q. (2020). Methods for estimating fragment hazard in gas explosion. *Journal of Hazardous Materials*, 381, Article 120989. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120989>
- Liu, C., Wang, Z., Ma, C. y Wang, X. (2020). Influencing factors of the chain effect of spherical gas cloud explosion. *Process Safety and Environmental Protection*, 142, 359-369. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.06.007>
- Loy, Y. Y., Rangaiah, G. P. y Lakshminarayanan, S. (2017). Surrogate Modelling of Net Radiation Flux from Pool Fires in a Hydrocarbon Storage Facility. *Process Safety and Environment Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.12.024>
- Madsen, A. L., Jensen, F., Kjerulff, U. B. y Lang, M. (2005). THE HUGIN TOOL FOR PROBABILISTIC GRAPHICAL MODELS. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 14(3), 507-543.
- Maldonado, A. D., Uusitalo, L., Tucker, A., Blenckner, T., Aguilera, P. A. y Salmerón, A. (2019). Prediction of a complex system with few data: Evaluation of the effect of model structure and amount of data with dynamic bayesian network models. *Environmental Modelling and Software*. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.011>
- Marcot, B. G. y Penman, T. D. (2018). Advances in Bayesian network modelling: Integration of modelling technologies. *Environmental Modelling and Software*. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.09.016>
- Markowski, A. S. y Siuta, D. (2017). Selection of representative accident scenarios for major industrial accidents. *Process Safety and Environmental Protection*, 3, 652-662. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.026>

MARPLOT. (2017). <https://www.epa.gov/cameo/marplot-software>

Mashhadimoslem, H., Ghaemi, A., Palacios, A. y Behroozi, A. H. (2020). A new method for comparison thermal radiation on large-scale hydrogen and propane jet fires based on experimental and computational studies. *Fuel*, 282, Article 118864. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118864>

MatLab. (2013). <http://www.matlab.com>

Misuri, A., Landucci, G. y Cozzani, V. (2021). Assessment of safety barrier performance in the mitigation of domino scenarios caused by Natech events. *Reliability Engineering and System Safety*, 205, Article 107278. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107278>

Mittal, K., Jain, A., Vaisla, K. S., Castillo, O. y Kacprzyk, J. (2020). A comprehensive review on type 2 fuzzy logic applications: Past, present and future. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 95., Article 103916. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103916>

Mizrahi, S. (2020). Cascading disasters, information cascades and continuous time models of domino effects. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 49, Article 101672. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101672>

Mukhim, E. D., Abbasi, T., Tauseef, S. M. y Abbasi, S. A. (2017). Domino effect in chemical process industries triggered by overpressure - formulation of equipment-specific probits. *Process Safety and Environment Protection*. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.psep.2017.01.004>

Necci, A., Cozzani, V., Spadoni, G. y Khan, F. (2015). Assessment of domino effect: State of the art and research Needs. *Reliability Engineering and System Safety*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2015.05.017>

Nývlt, O., Haugen, S. y Ferkl, L. (2015). Complex accident scenarios modelled and analysed by Stochastic Petri Nets. *Reliability Engineering and System Safety*, 142, 539-555. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2015.06.015>

Purba, J. H., Tjahyani, D. T. S., Widodo, S. y Ekariansyah, A. S. (2020). Fuzzy probability based event tree analysis for calculating core damage frequency in nuclear power plant probabilistic safety assessment. *Progress in Nuclear Energy*, 125, Article 103376. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103376>

- Qazi, A., Can, M. y Simsekler, E. (2020). Assessment of humanitarian crises and disaster risk exposure using data-driven Bayesian Networks. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101938>
- Queral, C., Fernández-Cosials, K., Zugazagoitia, E., Paris, C., Magan, J., Mendizabal, R. y Posada, J. (2021). Application of Expanded Event Trees combined with uncertainty analysis methodologies. *Reliability Engineering and System Safety*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107246>
- Rajeev, K., Soman, S., Renjith, V. R. y George, P. (2019). Human vulnerability mapping of chemical accidents in major industrial units in Kerala, India for better disaster mitigation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 39, Article 101247. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101247>
- Ramírez-Camacho, J. G., Pastor, E., Casal, J., Amaya-Gómez, R. y Muñoz-Giraldo, F. (2015). Analysis of domino effect in pipelines. *Journal of Hazardous Materials*, 298, 210-220. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.05.033>
- Reniers, G. y Cozzani, V. (2013). *Domino Effects in the Process Industries. Modeling, Prevention and Managing* (G. Reniers y V. Cozzani, Eds.) <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-54323-3.00001-4>
- Rostamabadi, A., Jahangiri, M., Zarei, E., Kamalinia, M. y Alimohammadlou, M. (2019). A novel Fuzzy Bayesian Network approach for safety analysis of process systems; An application of HFACS and SHIPP methodology. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118761>
- Salvagni, R. G., Centeno, F. R. y Indrusiak, M. L. S. (2019). Burning rate, flame geometry and temperature of convection-controlled circular diesel oil pool fire under air crossflow conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 368, 560-568. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.01.087>
- Sanchez, E. Y., Represa, S., Mellado, D., Balbi, K. B., Acquesta, A. D., Colman Lerner, J. E. y Porta, A. A. (2018). Risk analysis of technological hazards: Simulation of scenarios and application of a local vulnerability index. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.03.034>
- Schüller, J. C. H., Brinkman, J. L., Gestel, P. J. V. y Otterloo, R. W. v. (2005). *Methods for determining and processing probabilities. 'Red Book'. CPR 12E. Publication Series on Dangerous Substances 4 (PGS 4).*

- Sellami, I., Nait-Said, R., Chetehouna, K., de Izarra, C. y Zidani, F. (2018). Quantitative consequence analysis using Sedov-Taylor blast wave model. Part II: Case study in an Algerian gas industry. *Process Safety and Environment Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.02.003>
- Sharma, R. K. (2020). A violent, episodic vapour cloud explosion assessment: Deflagration-to-detonation transition. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 65, Article 104086. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104086>
- Sharma, R. K., Gopaldaswami, N., Gurjar, B. R. y Agrawal, R. (2019). Assessment of Failure and Consequences Analysis of an Accident: A case study. *Engineering Failure Analysis*. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104192>
- Shi, C., Liu, W., Hong, W., Zhong, M. y Zhang, X. (2019). A modified thermal radiation model with multiple factors for investigating temperature rise around pool fire. *Journal of Hazardous Materials*, 379, Article 120801. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120801>
- Spoelstra, M., Mahesh, S., Kooi, E. y Heezen, P. (2015). Domino effects at LPG and propane storage sites in the Netherlands. *Reliability Engineering and System Safety*, 143, 85-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2015.06.018>
- Swuste, P., Nunen, K. v., Reniers, G. y Khakzad, N. (2019). Domino effects in chemical factories and clusters: An historical perspective and discussion. *Process Safety and Environment Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.015>
- Taleb-Berrouane, M., Khan, F. y Amyotte, P. (2020). Bayesian Stochastic Petri Nets (BSPN) - A new modelling tool for dynamic safety and reliability analysis. *Reliability Engineering and System Safety*., 193, Article 106587. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106587>
- Tauseef, S. M., Abbasi, T., Pompapathi, V. y Abbasi, S. A. (2018). Case studies of 28 major accidents of fires/explosions in storage tank farms in the backdrop of available codes/standards/models for safely configuring such tank farms. *Process Safety and Environment Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.09.017>
- Tran, T.-B., Bastidas-Arteaga, E. y Aoues, Y. (2020). A Dynamic Bayesian Network framework for spatial deterioration modelling and reliability updating of timber structures subjected to decay. *Engineering Structures*, 209, Article 110301. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110301>

- U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board. (2015). *Caribbean Petroleum Tank Terminal Explosion and Multiple Tank Fires. Final Investigation Report* (2010.02.I.PR).
- Uijt de Haag, P. A. M. y Ale, B. J. M. (2005). *Guidelines for quantitative risk assessment. CPR 18E. 'Purple book'*. Gevaarlijke Stoffen.
- Vileiniskis, M. y Remenyte-Prescott, R. (2017). Quantitative risk prognostics framework based on Petri Net and Bow-Tie models. *Reliability Engineering and System Safety*.<http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2017.03.026>
- Wan, H., Gao, Z., Ji, J., Zhang, Y., Li, K. y Wang, L. (2019). Effects of pool size and spacing on burning rate and flame height of two square heptane pool fires. *Journal of Hazardous Materials*, 369, 116-124.<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.01.111>
- Wang, C., Guo, J., Ding, Y., Wen, J. y Lu, S. (2015). Burning rate of merged pool fire on the hollow square tray. *Journal of Hazardous Materials*, 290, 78-86.<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.02.069>
- Wang, K., He, Y., Liu, Z. y Qian, X. (2019). Experimental study on optimization models for evaluation of fireball characteristics and thermal hazards induced by LNG vapor Cloud explosions based on colorimetric thermometry. *Journal of Hazardous Materials*, 366, 282-292.<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.10.087>
- Wang, K., Qian, X., He, Y., Shi, T. y Zhang, X. (2020). Failure analysis integrated with prediction model for LNG transport trailer and thermal hazards induced by an accidental VCE: A case study. *Engineering Failure Analysis*, 108, Article 104350.<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104350>
- Weidl, G., Madsen, A. L., Kasper, D. y Breuel, G. (2014). Optimizing Bayesian Networks for Recognition of Driving Maneuvers to Meet the Automotive Requirements. *International Symposium on Intelligent Control*.
- Wells, G. (1997). *Major Hazards and their Management*. Institution of Chemical Engineers, Davis Building, 165-189 Railway Terrace, Rugby, Warwickshire CV21 3HQ, UK.
- Wu, Z., Hou, L., Wu, S., Wu, X. y Liu, F. (2020). The time-to-failure assessment of large crude oil storage tank exposed to pool fire. *Fire Safety Journal*, 117, Article 103192.<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103192>

- Xiang, W. y Zhou, W. (2021). Bayesian network model for predicting probability of third-party damage to underground pipelines and learning model parameters from incomplete datasets. *Reliability Engineering and System Safety*, 205, Article 107262. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107262>
- Xin, P., Khan, F. y Ahmed, S. (2016). Dynamic Hazard Identification and Scenario Mapping Using Bayesian Network. *Process Safety and Environment Protection*. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.psep.2016.11.003>
- Yang, R., Khan, F., Neto, E. T., Rusli, R. y Ji, J. (2020). Could pool fire alone cause a domino effect? *Reliability Engineering and System Safety*, 202, Article 106976. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106976>
- Yang, R., Khan, F., Taleb-Berrouane, M. y Kong, D. (2019). A time-dependent probabilistic model for fire accident analysis. *Fire Safety Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102891>
- Zarei, E., Azadeh, A., Khakzad, N. y Mohammadfam, I. (2016). Dynamic safety assessment of natural gas stations using Bayesian network. *Journal of Hazardous Materials*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.09.074>
- Zarei, E., Khakzad, N., Cozzani, V. y Reniers, G. (2019). Safety analysis of process systems using Fuzzy Bayesian Network (FBN). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 57, 7-16. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.10.011>
- Zeng, T., Chen, G., Yang, Y., Chen, P. y Reniers, G. (2019). Developing an advanced dynamic risk analysis method for fire-related domino effects. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.029>
- Zhang, Y. y Weng, W. G. (2020). Bayesian network model for buried gas pipeline failure analysis caused by corrosion and external interference. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107089>
- Zhao, J., Zhu, H., Zhang, J., Huang, H. y Yang, R. (2020). Experimental study on the spread and burning behaviors of continuously discharge spill fires under different slopes. *Journal of Hazardous Materials*, 392. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122352>
- ZhiYuan, Khakzad, N., Khan, F. y Amyotte, P. (2016). Domino effect analysis of dust explosions using Bayesian networks. *Process Safety and Environment Protection*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2016.01.005>

- Zhou, J. y Reniers, G. (2017). Petri-net based cascading effect analysis of vapor cloud explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 48, 118-125.<http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2017.04.017>
- Zhou, J. y Reniers, G. (2018a). A matrix-based modeling and analysis approach for fire-induced domino effects. *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 347-353.<https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.02.014>
- Zhou, J. y Reniers, G. (2018b). Petri-net based evaluation of emergency response actions for preventing domino effects triggered by fire. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 51, 94-101.<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.12.001>
- Zhou, J. y Reniers, G. (2020). Probabilistic Petri-net addition enabling decision making depending on situational change: The case of emergency response to fuel tank farm fire. *Reliability Engineering and System Safety*, 200, Article 106880.<https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106880>
- Zhou, J., Reniers, G. y Khakzad, N. (2016). Application of event sequence diagram to evaluate emergency response actions during fire-induced domino effects. *Reliability Engineering and System Safety*.<http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2016.02.005>
- Zhou, Q., Wu, W., Liu, D., Li, K. y Qiao, Q. (2016). Estimation of corrosion failure likelihood of oil and gas pipeline based on fuzzy logic approach. *Engineering Failure Analysis*, 70, 48-55.<http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.07.014>
- Zhu, C., Zhu, J., Wang, L. y Mannan, M. S. (2017). Lessons learned from analyzing a VCE accident at a chemical plant. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 50, 397-402.<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.11.004>
- Zinke, R., Melnychuk, J., Köhler, F. y Krause, U. (2020). Quantitative risk assessment of emissions from external floating roof tanks during normal operation and in case of damages using Bayesian Networks. *Reliability Engineering and System Safety*., 197, Article 106826.<https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106826>
- Zywiec, W. J., Mazzuchi, T. A. y Sarkani, S. (2020). Analysis of process criticality accident risk using a metamodel-driven Bayesian network. *Reliability Engineering and System Safety*.<https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107322>

Anexos

Anexo 1: Clasificación de las VCE en dependencia del lugar donde se origine

Tipo de VCE	Descripción
Explosión de nube de vapor no confinada (UVCE)	La explosión ocurre en la atmósfera libre (no confinada) y no encerrada.
Explosión de nube de vapor confinada (VCE)	Hay presencia de estructuras geométricas: edificios, partes de instalaciones o filas de árboles o en un espacio cerrado: edificio o tanque vacío.

Anexo 2: Categorías del efecto dominó dependiendo del escalado.

Interno	Comienzo y final del vector de escalado que caracteriza al evento dominó está situado dentro de los límites de la misma planta química.
Externo	Comienzo y final del vector de escalado que caracteriza al evento dominó no están situado dentro de los límites de la misma planta química
Directo	Ocurre como una consecuencia directa del evento dominó anterior.
Indirecto	Ocurre como una consecuencia indirecta de un evento dominó anterior, no siendo el anterior.
Temporal	Cuando ocurre dentro de la misma área que el evento anterior, pero con un retraso.
Espacial	Ocurre fuera del área donde anteriormente tuvo lugar el evento.
Serial	Ocurre como un enlace consecuente de la única cadena de accidentes causada por el evento anterior.
Paralelo	Ocurre varias consecuencias simultaneas de cadenas accidentales causadas por el anterior.

Anexo 3: Conceptos y definiciones del efecto dominó por diferentes autores.

Autor (s)	Definiciones
Khakzad (2015)	El efecto dominó tienen lugar cuando un accidente en una unidad (unidad primaria) se propaga a otras unidades (unidades secundarias) a través del impacto de los vectores de escalado. Los vectores de escalado son efectos físicos tales como impacto de fuego, absorción de fuego y radiación de calor en caso de incendio, o sobrepresión y proyección de fragmentos en caso de explosión.
Spoelstra <i>et al.</i> (2015)	Un evento de dominó se puede definir como un accidente que implica una pérdida de contención y que es el resultado de un escalado de otro accidente que ocurrió cerca. El efecto del evento dominó suele ser más desastroso que el del evento iniciador en sí.
Ding <i>et al.</i> (2020)	El efecto dominó es una cadena de accidentes de baja frecuencia y alta consecuencia, donde ocurre un accidente primario y se propaga a unidades adyacentes, provocando accidentes secundarios y las consecuencias totales mucho más severas que la consecuencia del accidente primario.
Yang <i>et al.</i> (2020)	El término "efecto dominó" se utiliza para describir una cadena de accidentes en los que un accidente primario se convierte en accidentes de orden superior.
Zhou y Reniers (2020)	Un accidente menor inicia una secuencia de eventos que causan daños en un área mucho más grande y que conducen a consecuencias mucho más graves que el evento original, lo que se denomina "efecto dominó".
Hou <i>et al.</i> (2020)	"Un accidente en el que un evento primario no deseado se propaga dentro de un equipo (temporalmente), y/o al equipo cercano (espacialmente), secuencial o simultáneamente, desencadenando uno o más eventos secundarios no deseados, a su vez, posiblemente desencadenando más eventos no deseados (de orden superior), lo que resulta en consecuencias generales más graves que las del evento primario".

Anexo 4: Análisis de accidentes pasados relacionados a efecto dominó

Lugar/ Fecha	Buncefield UK/ 2005	Sitapura, India /2009	Naples, Italia /1985	CAPECO, Puerto Rico /2009
Fuente (s)	Atkinson et al. (2014); Cirimello et al. (2019); Florido (2009); Hailwood et al. (2009); Herbert (2010); Johnson (2010); Khakzad et al. (2016); Khan et al. (2020); Reniers y Cozzani (2013)	Johnson et al. (2012) y Sharma (2020)	Hailwood et al. (2009)	Khakzad <i>et al.</i> (2017) y U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (2015)
Sustancia involucrada	Gasolina sin plomo de grado invernal	Gasolina	Gasolina	Gasolina sin plomo
Accidente primario	UVCE	VCE	VCE	VCE
Área afectada	≈ 150 000 m ²	180 000 m ²	49 000 m ²	433 014 m ²
Orden de sucesos	-Derrame de gasolina, desarrollo de la nube de vapor, ignición, explosión de la nube de vapor e incendios y explosiones más pequeñas.	-Desbordamiento del tanque, formación de nubes de vapor en el aire en calma (baja velocidad del viento) ignición iniciada en estación de bombeo / generador y la eventual propagación del fuego a otros tanques.		
Causa (s)	-Sobrellenado del tanque 912. -Falla en el sistema de protección de sobrellenado. -Pérdida de contención. -Falla del sistema automático de medición. -Falla del sistema de parada de bombeo.	-Sobrellenado de un tanque.	-Sobrellenado de un tanque por 1,5 h	-Sobrellenado de un tanque. -Dispositivos de medición con poco mantenimiento. -Dispositivos mecánicos simples, flotador y cinta de medición métrica. -Mediciones manuales por operarios, sobre los niveles de los tanques cada hora.

<p>Consecuencias</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Explosiones e incendios por aproximadamente 4,5 días. -22 de los 41 tanques destruidos, edificios y equipos vecinos sufrieron graves daños. -Vegetación consumida por el fuego. -No hubo víctimas mortales, 43 personas resultaron heridas y se produjeron daños importantes en las propiedades comerciales y residenciales de los alrededores. -Daño generalizado por la presión en vehículos. 	<ul style="list-style-type: none"> -Explosiones que destruyeron toda la instalación y edificios en las inmediaciones sufrieron graves daños. -Onda expansiva provocó roturas de cristales de ventanas hasta 3 km. -Fuego ardiendo durante once días. -Vegetación completamente consumida por el fuego. -11 personas fallecidas -150 heridos -5 000 evacuados -Daños severos por la presión de la onda de choque a edificios y automóviles. 	<ul style="list-style-type: none"> -24 de 31 tanques fueron destruidos. -Daños graves causados a edificios y equipos. 5 muertos y 170 heridos. 	<ul style="list-style-type: none"> -Daños ≈ 300 viviendas y negocios -Derramamiento de petróleo en suelo circundante, en las vías fluviales y pantanos.
<p>Otros aspectos a destacar</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Derrame del combustible por 40 minutos antes de la ignición - Nube de vapor se produjo en condiciones de viento en calma. -Principales componentes de la nube de vapor, butano y pentano. -Sobrepresiones superiores a 2 bar. -Ignición producida probablemente, por una chispa debida a la puesta en marcha de la bomba contra incendios. -El deposito almacenaba gasolina, combustible de aviación y diésel. 	<ul style="list-style-type: none"> -Ocurrió durante la transferencia de queroseno y gasolina a través de oleoductos a otra terminal. -Liberación de combustible durante un período de 75 a 90 minutos antes de la ignición. -Las explosiones se escucharon a una distancia de 32 km. Se liberaron 1000 toneladas de gasolina antes de la ignición. 60 millones de litros de productos derivados del petróleo se consumieron en los incendios posteriores en tanques dañados. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fuente de ignición desconocida. - Onda expansiva se registró hasta 100 km desde el epicentro. 	<p>Ocurrió durante la transferencia rutinaria de más 37 854 m³ del combustible.</p>

Anexo 5: Aplicaciones de las redes Bayesianas

Autor (s)	Aplicaciones
Khakzad (2015)	Para modelar la evolución espacial de los efectos dominó y para determinar la ruta de propagación más probable dado un accidente primario.
Khakzad y Reniers (2015)	Para modelar y calcular la probabilidad del efecto dominó en plantas químicas.
<i>F. Chen et al. (2020)</i>	Utilización de la información de datos anteriores, además agregar información, como la experiencia y el juicio de los tomadores de decisiones y combina factores objetivos con factores subjetivos para analizar la ocurrencia de situaciones anormales.
Zhang y Weng (2020)	Con la construcción de dos redes Bayesianas se pudo estimar la ocurrencia y el tamaño de fugas en tuberías debido a la corrosión, con la utilización del <i>software GeNIe</i> (herramienta para el modelado de inteligencia artificial y aprendizaje automático con redes Bayesianas y otro tipo de modelos gráficos probabilísticos).

Anexo 6: Aplicaciones de la simulación de Monte Carlo

Autor (s)	Aplicaciones
Djelosevic y Tepic (2019)	Para proporcionar las probabilidades de los fragmentos generados en algún tipo de explosión, en condiciones ideales de fragmentación.
Lian y Zhang (2020)	Simular y analizar el vuelo de fragmentos de recipientes cilíndricos y el efecto de los parámetros estocásticos.
Celano y Dolsek (2020)	Simular efectos dominó e investigar el riesgo de explosiones de nubes de vapor después de una pérdida de contención de materiales peligrosos de diferentes tipos de equipos (tuberías, recipientes y válvulas)
Necci <i>et al.</i> (2015)	A través de simuladores 3D, se puede utilizar simulaciones de Monte Carlo mejoradas para evaluar la probabilidad de impacto de fragmentos en un entorno 3D, además de introducirse varias mejoras con respecto a estudios anteriores, asumiendo una probabilidad no uniforme para la dirección inicial del fragmento y aplicando un modelo de penetración de fragmentos en recipientes metálicos en función de la velocidad y masa del fragmento.

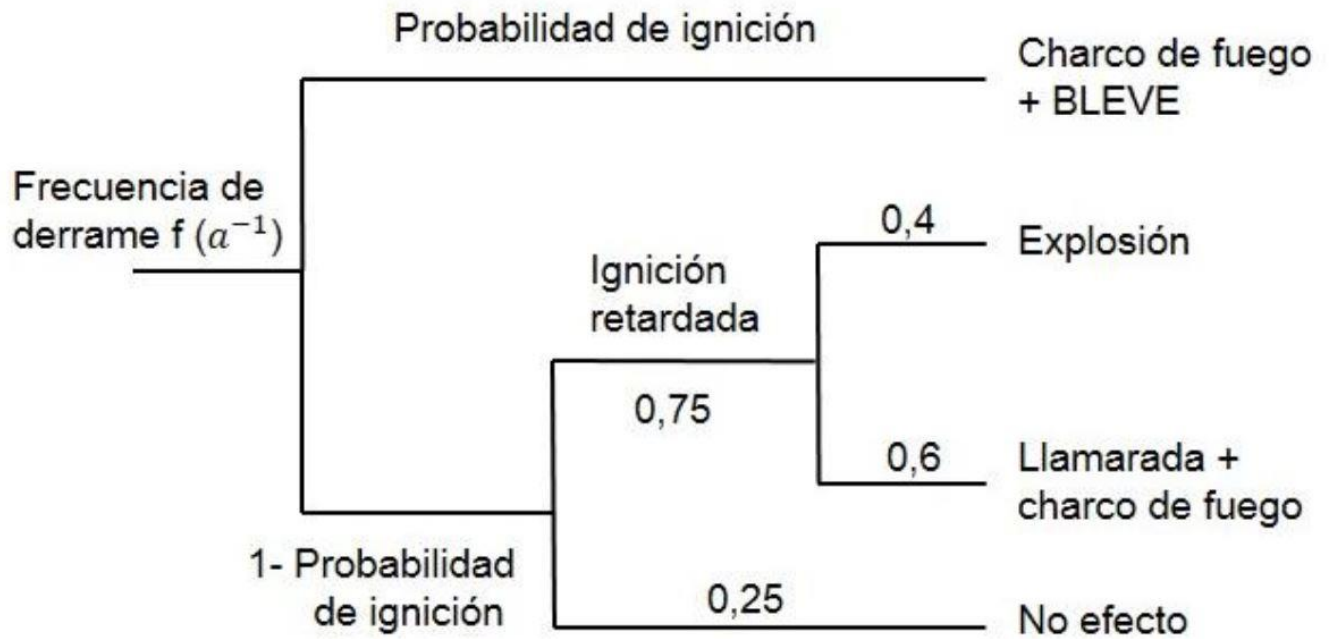
Anexo 7: Características de las unidades de proceso del área de estudio

U/P	Sustancia almacenada	Capacidad (m³)	Altura (m)	Diámetro (m)
30	<i>Fuel oil</i>	10914	11,89	34,2
38	<i>Fuel oil</i>	10919	11,89	34,2
1	Diésel	8542	8,88	35,0
4	Diésel	11334	12,34	34,2
13	Turbo combustible	11147	10,60	36,5
16	Nafta	4882	12,10	22,7
17	Nafta	4647	12,20	22,0
22	Turbo combustible	10885	11,80	34,2
23	Turbo	11524	12,50	34,2
24	Diésel	11341	12,35	34,2
25	Diésel	11411	12,40	34,2
26	Diésel	11608	12,64	34,2
18	Combustible de aviación	2316	12,27	15,5
19	Combustible de aviación	745	9,10	10,2
20	Combustible de aviación	341	7,60	7.57
21	Combustible de aviación	1068	12,60	10,4
74	Combustible de aviación	1186	12,50	11,0

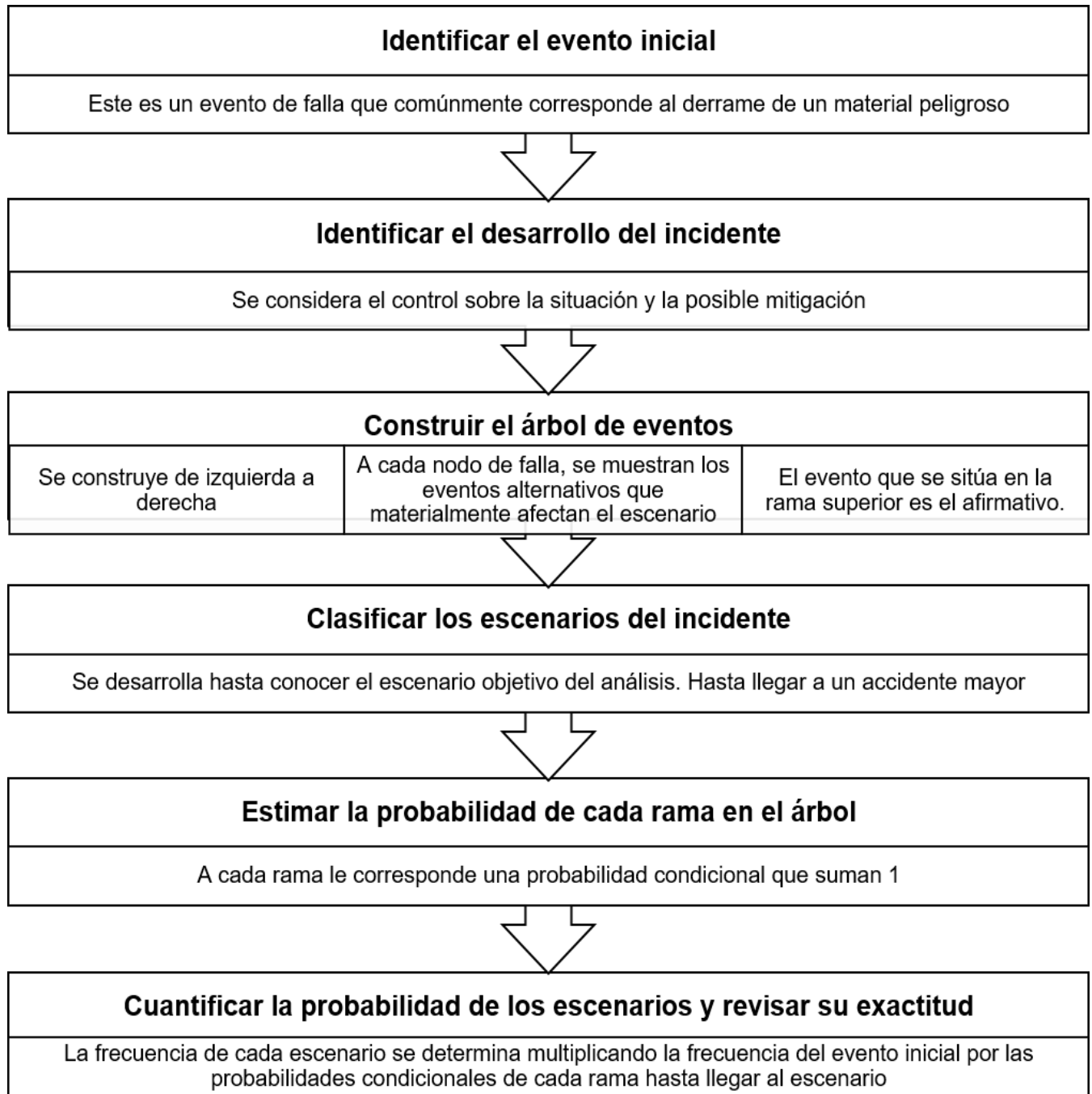
Anexo 8: Datos a introducir en ALOHA para la obtención de la intensidad de la radiación térmica emitida por charco de fuego.

Datos	Tipos y unidades
Sustancia almacenada	<i>Fuel oil</i> , nafta, diésel, turbo combustible y gasolina de aviación
Humedad ambiental	Por ciento (%)
Volumen del tanque	Metros cúbicos (m ³)
Altura del tanque	Metros (m)
Nivel de llenado del tanque	Por ciento (%)
Condiciones atmosféricas existentes en el área	Velocidad del viento (m/s), orientación del viento y temperatura ambiental (°C)
Diámetro del orificio y distancia del suelo a partir de donde se originó el charco de fuego	Metros (m)

Anexo 9: Árbol de eventos según (Bevi, 2009)



Anexo 10: Secuencia metodológica para la creación del árbol de eventos



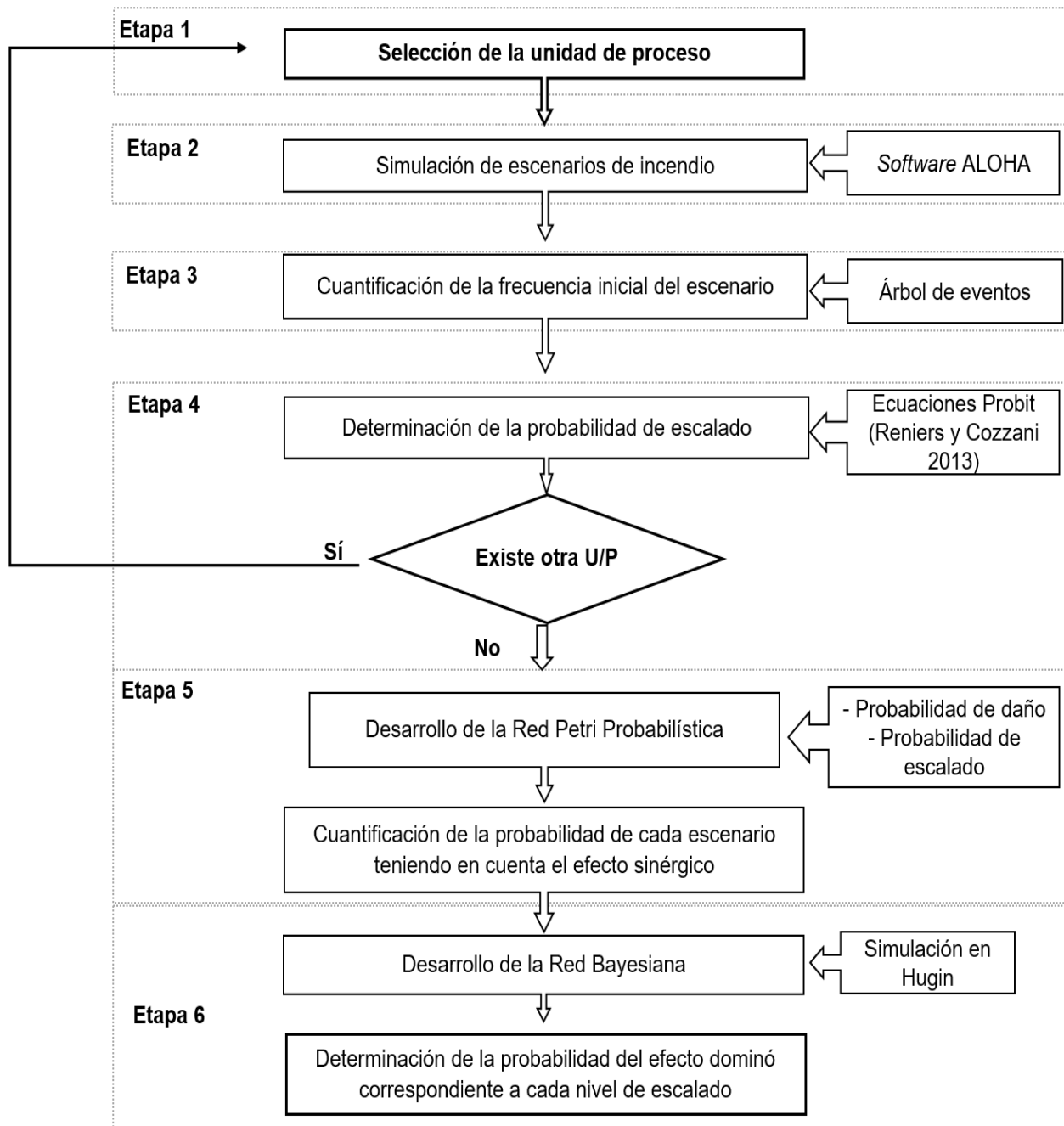
Anexo 11: Clasificación de sustancias inflamables según BEVI (2009)

Categoría de sustancia	Categoría WMS	Límites
Categoría 0	Extremadamente inflamable	Sustancias líquidas y preparaciones con un punto de inflamación inferior a 0 y un punto de ebullición menor o igual a 35 °C.
Categoría 1	Altamente inflamable	Sustancias líquidas y preparaciones con un punto de inflamación por debajo de 21 °C, los cuales, no son extremadamente inflamables.
Categoría 2	Inflamable	Sustancias líquidas y preparaciones con un punto de inflamación mayor o igual a 21 °C y menor o igual a 55 °C.
Categoría 3	Sustancias líquidas y preparaciones con un punto de inflamación mayor o igual a 55 °C y menor o igual a 100 °C.	
Categoría 4	Sustancias líquidas y preparaciones con un punto de inflamación m	

Anexo 12: Variables y su significado

Variables	Significado
P_{IP}	Probabilidad de ignición
P_{MP}	Probabilidad de ignición debido al material derramado.
P_Q	Probabilidad de ignición debido al flujo
P_{IS}	Probabilidad de ignición en función de la fuente y características de los alrededores
K_{IC}	Factor decidido por los controles de ignición
P_{ign}	Probabilidad de ignición en función del flujo
$P_{ign,lower}$	Probabilidad de ignición correspondiente al flujo inferior (0,001)
$P_{ign,upper}$	Probabilidad de ignición correspondiente al flujo superior (0,13)
Q	Flujo másico real de operación (kg/s) el cual depende del bombeo
Q_{lower}	Flujo másico inferior (0,10 kg/s)
Q_{upper}	Flujo másico superior (109,99 kg/s)
S	Probabilidad de ignición según la fuente en un minuto
t	Tiempo que dura el derrame en minutos

Anexo 13: Algoritmo para la determinación de la probabilidad del efecto dominó a diferentes niveles



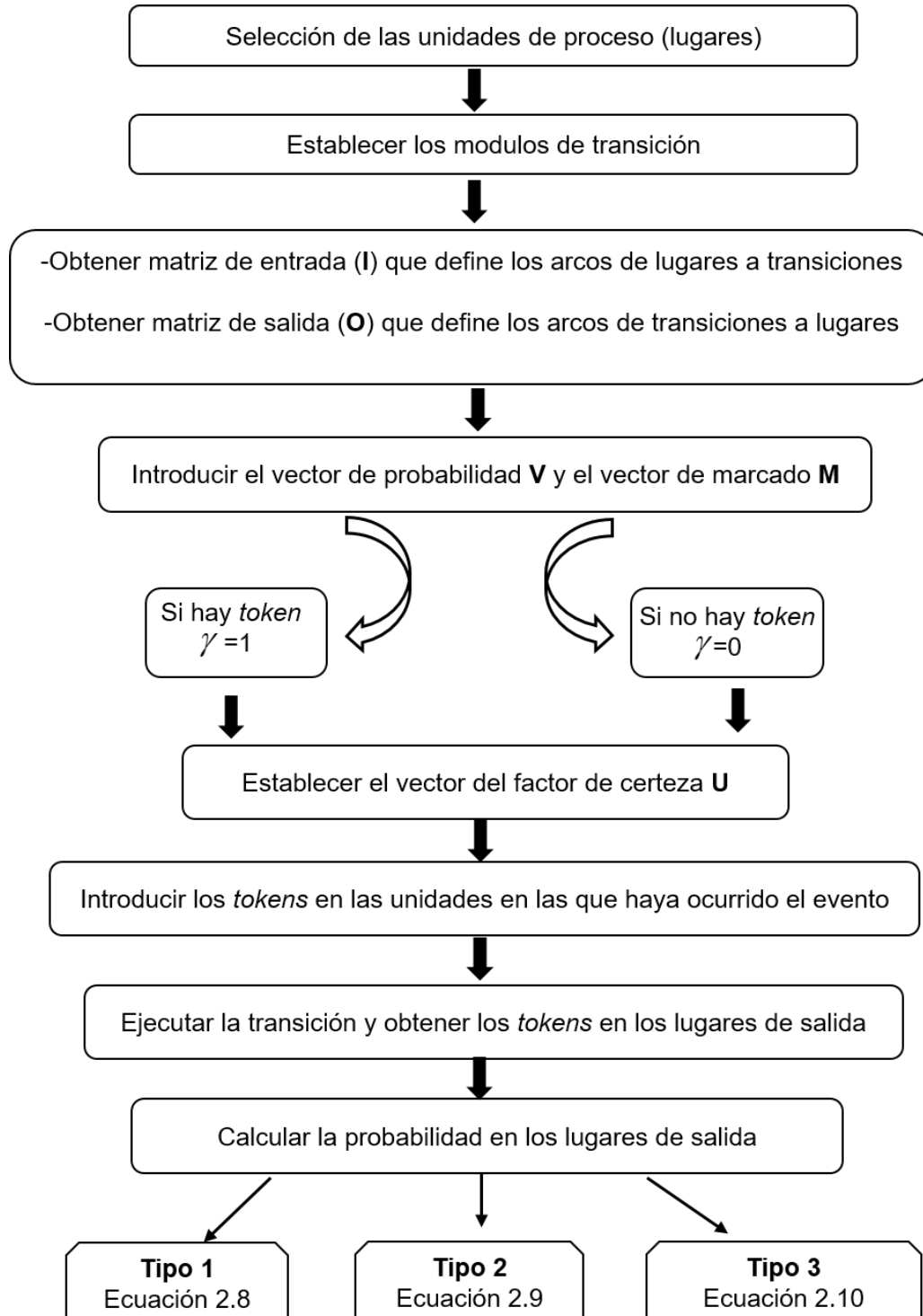
Anexo 14: Tupla de red Petri probabilística

Tupla	Significado	Condiciones
$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$	Conjunto finito de lugares	
$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$	Conjunto finito de transiciones	
$I = P \times T \rightarrow \{0, 1\}$	Matriz de entrada $n \times m$ que define arcos dirigidos desde lugares a transiciones	$I(p_i, t_j) = 1$, si hay un arco dirigido desde p_i a t_j , y $I(p_i, t_j) = 0$, si no hay arcos dirigidos desde p_i a t_j ; $i = 1, 2, \dots, n$, y $j = 1, 2, \dots, m$
$O = P \times T \rightarrow \{0, 1\}$	Matriz de salida $n \times m$ que define arcos dirigidos desde transiciones a lugares	$O(t_j, p_i) = 1$, si hay un arco dirigido de t_j a p_i , y $O(t_j, p_i) = 0$, si no hay arcos desde t_j a p_i para $i = 1, 2, \dots, n$, y $j = 1, 2, \dots, m$
V: vector de probabilidad	Probabilidad de p_i , $i = 1, 2, \dots, n$	$V = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, donde $\alpha_i \in [0, 1]$
$M: P \rightarrow \{0, 1\}$	Vector de marcado	$M = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n)$, $\gamma_i = 1$ si hay un <i>token</i> en p_i y $\gamma_i = 0$ si no hay ningún <i>token</i> en p_i . Un marcado inicial se indica con M_0
$U: T \rightarrow [0, 1]$	Vector de factor de certeza	$U = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m)$, donde $\mu_i \in [0, 1]$; valor del factor de certeza de t_i , $i = 1, 2, \dots, m$

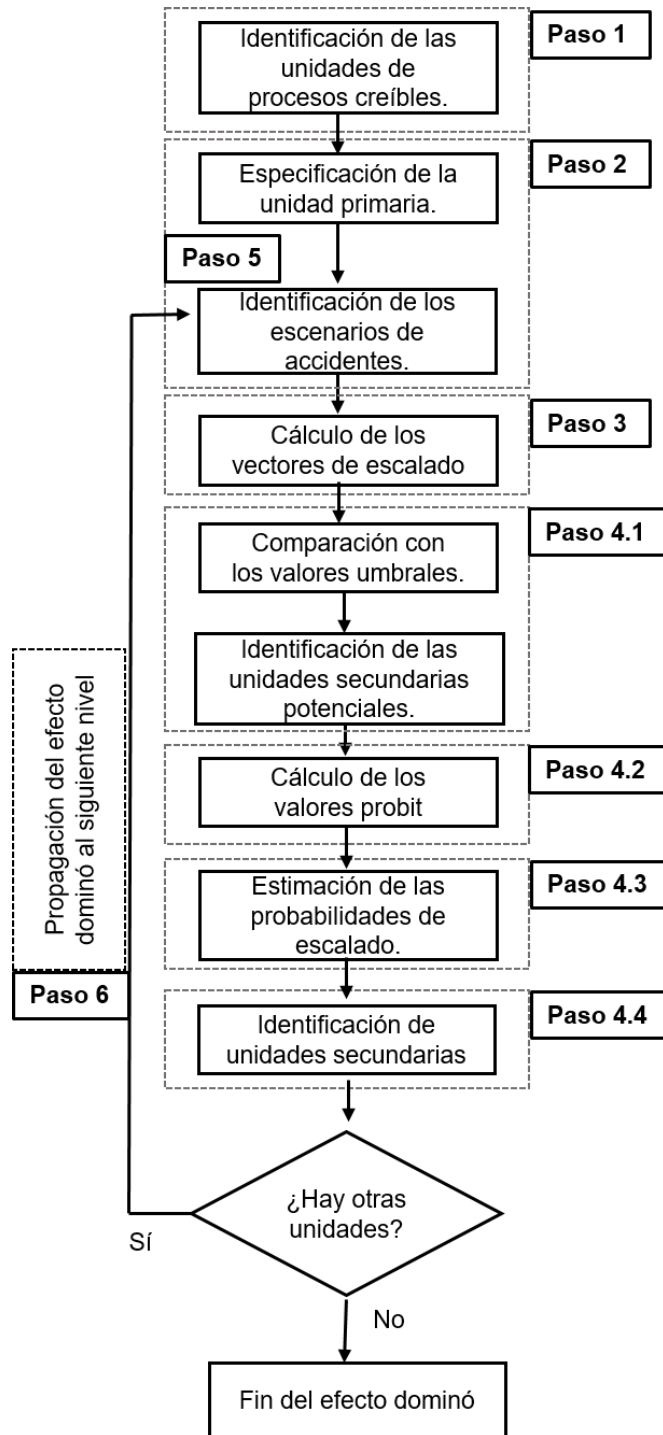
Anexo 15: Relaciones complejas entre las causas y efectos

Evento (tipos)	Condiciones
1. Varios de causa (α_{jk}) y un único evento de resultado	Siendo el valor del factor de certeza ($CF=\mu_j$) que representa la fuerza de la creencia de que la relación causal es verdadera. (ver anexo)
2. Uno de causa (α_j) y varios eventos de resultado (α_{gk})	Siendo el valor del factor de certeza $CF=\mu_j$
3. Uno u otro evento de causa (α_{j1} o α_{j2} o... α_{jk}) y solo uno de resultado (α_g)	Entonces ($CF= \mu_{j1}, \mu_{j2}, \dots \mu_{jk}$)

Anexo 16: Esquema para la creación de la red Petri probabilística



Anexo 17: Metodología para la creación de la red Bayesiana



Anexo 18: Tablas de probabilidad para definir los nodos L_i

Unidades íesimas		$P(L_i/X_{i1}, X_{i2})$	
X_{i1}	X_{i2}	Accidente	Seguro
Accidente	Accidente	1	0
Accidente	Seguro	1	0
Seguro	Accidente	1	0
Seguro	Seguro	0	1

Anexo 19: Tablas de probabilidad para definir los nodos DLi

Nodos		P(DLi/X₁,L₁)	
Unidad Primaria X ₁	L _i	Accidente	Seguro
Accidente	Accidente	1	0
Accidente	Seguro	0	1
Seguro	Accidente	0	1
Seguro	Seguro	0	1

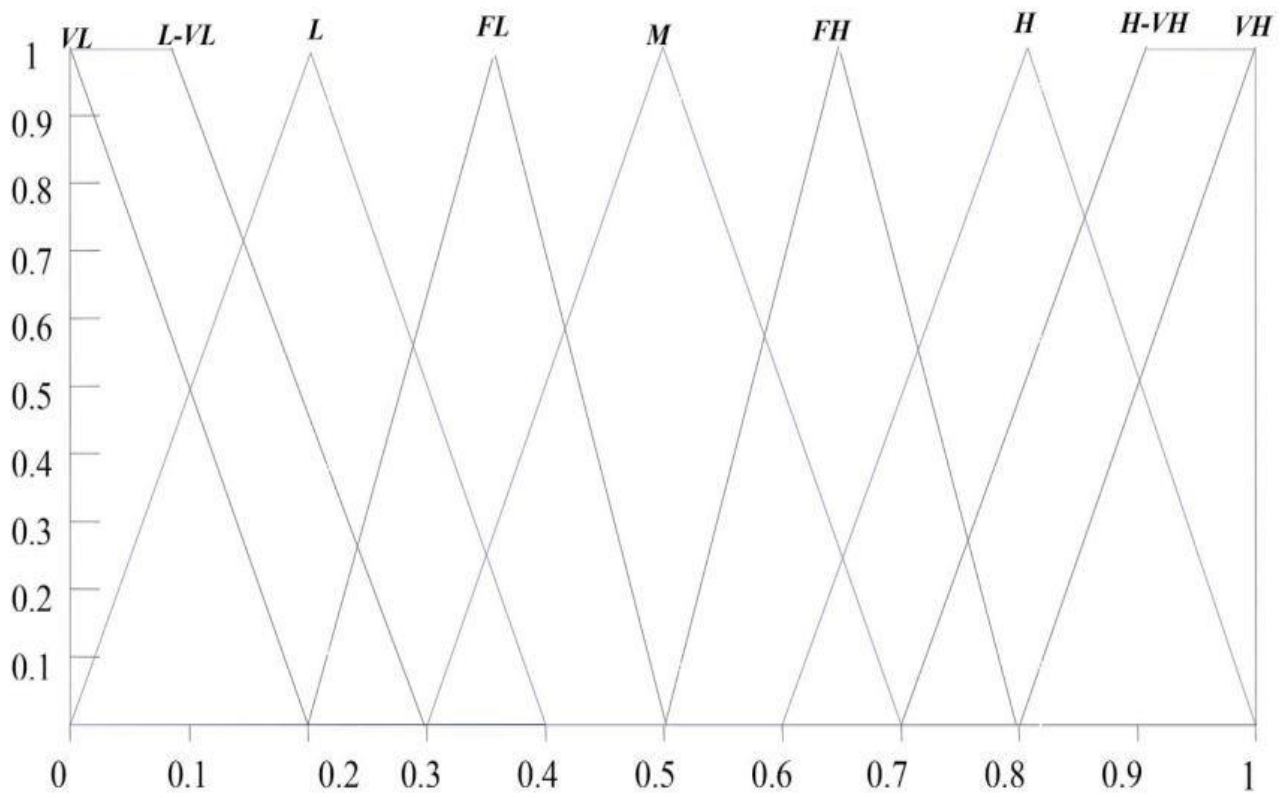
Anexo 20: Términos lingüísticos y números difusos para describir la probabilidad de un evento

Términos lingüísticos	Descripción	Conjuntos difusos (escala 7)
Muy alto (VH)	Una vez al mes	(0.8,1, 1, 1)
Alto-muy alto (HVH)	Una vez cada 1-3 meses	(0,7,0,9,1,1)
Alto (H)	Una vez cada 3-6 meses	(0.6,0.8, 0.8,1)
Bastante alto (FH)	Una vez cada 6-12 meses	(0.5, 0.65, 0.65, 0.8)
Medio (M)	Una vez cada 1 a 5 años	(0.3, 0.5, 0.5, 0.7)
Bastante bajo (FL)	Una vez cada 5-10 años	(0,2, 0,35, 0,35, 0,5)
Baja (L)	Una vez cada 10-15 años	(0,0.2,0.2, 0.4)
Bajo-muy bajo (LVL)	Una vez cada 15-20 años	(0,0,0.1,0.3)
Muy bajo	Durante el ciclo de vida del sistema no ha ocurrido/ observado	(0,0,0,0.2)

Anexo 21: Términos lingüísticos y sus correspondientes números difusos para describir la gravedad de un evento.

Términos lingüísticos	Conjuntos difusos
Muy bajo	(0, 0, 0, 0.25)
Bajo (L)	(0, 0.25, 0.25, 0.50)
Medio (M)	(0.25, 0.50, 0.50, 0.75)
Alto (H)	(0,50; 0,75; 0,75; 1,0)
Muy alto (VH)	(0,75, 1, 1, 1)

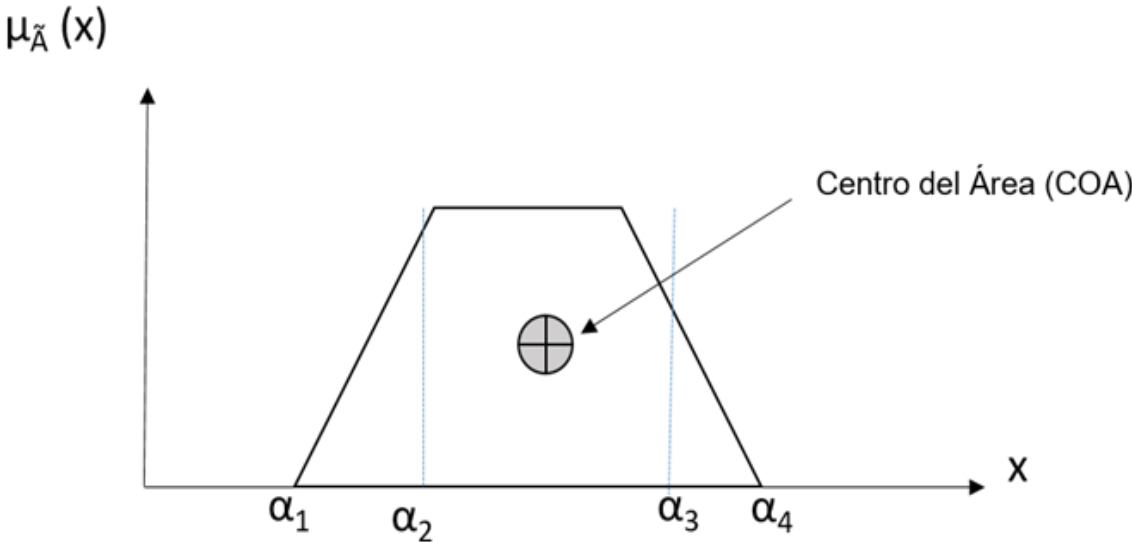
Anexo 22: Escala de conversión para estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento



Anexo 23: Factores de ponderación

Constitución	Clasificación	Puntaje	Constitución	Clasificación	Puntaje
Posición profesional	-Académico senior	5	Nivel educacional	Doctorado	5
	-Académico junior	4		Master	4
	-Ingeniero	3		Bachiller	3
	-Técnico	2		Diploma Superior Nacional (HND)	2
	-Trabajador	1		Nivel escolar	1
Tiempo de Experiencia (años)	≥30	5	Edad(años)	≥50	4
	20-29	4		40-49	3
	10-19	3		30-39	2
	6-9	2		≤30	1
	≤5	1			

Anexo 24: Número difuso trapezoidal



Anexo 25: Dirección del viento con velocidad media

Rumbos	Frecuencia (%)	Velocidad media (Km/h)	Velocidad media (m/s)
N	6,70	12,50	3,47
NNE	5,80	14,70	4,08
NE	9,40	15,00	4,17
ENE	9,10	16,90	4,69
E	15,70	15,40	4,28
ESE	4,00	14,30	3,97
SE	1,50	12,70	3,53
SSE	1,50	10,90	3,03
S	3,50	10,60	2,94
SSW	3,00	10,00	2,78
SW	1,80	8,70	2,42
WSW	2,10	8,40	2,33
W	0,70	9,90	2,75
WNW	0,70	12,00	3,33
NW	0,40	12,50	3,47
NNW	1,10	13,40	3,72

Anexo 26: Humedad del aire

Meses	Media	Coeficiente de variación (%)	Desviación estándar
Enero	78	1,2087	0,9428
Febrero	75	1,0886	0,8164
Marzo	74	1,1033	0,8164
Abril	73	1,1184	0,8164
Mayo	78	1,0467	0,8164
Junio	83	0,9837	0,8164
Julio	81	1,4255	1,1547
Agosto	82	0,9957	0,8164
Septiembre	84	0,9720	0,8164
Octubre	84	0,9720	0,8164
Noviembre	81	1,4255	1,1547
Diciembre	79	1,0335	0,8164
Total	80	4,7539	3,7714




























Anexo 27: Temperatura del aire máxima y temperatura del aire mínima respectivamente

Meses	Media	Coefficiente de variación (%)	Desviación estándar
Enero	26,25	2,6448	0,6916
Febrero	25,85	2,7808	0,7208
Marzo	28,15	1,3056	0,3681
Abril	29,70	2,3929	0,7109
Mayo	30,90	2,1177	0,6552
Junio	30,55	2,3972	0,7321
Julio	31,55	1,3668	0,4295
Agosto	31,05	1,5506	0,4853
Septiembre	30,75	2,4842	0,7656
Octubre	29,50	2,3572	0,6963
Noviembre	27,35	2,9726	0,8121
Diciembre	26,55	2,6949	0,7152
Total	29,50	7,2883	2,1161




























Meses	Media	Coefficiente de variaciónn (%)	Desviación estándar
Enero	15,80	2,4873	0,3910
Febrero	15,50	2,8347	0,4422
Marzo	17,00	3,1490	0,5400
Abril	18,50	2,8335	0,5270
Mayo	20,55	3,8223	0,7908
Junio	21,80	2,8873	0,6297
Julio	21,85	4,1467	0,9089
Agosto	21,80	2,8873	0,6297
Septiembre	21,75	2,5733	0,5586
Octubre	20,80	3,5110	0,7302
Noviembre	18,65	3,2228	0,6033
Diciembre	16,60	2,8680	0,4760
Total	19,50	12,8434	2,4737

Anexo 28: Corridas obtenidas de la simulación en el software ALOHA




Corridas de la 1-27

 001.TK24.DIESEL.WNW.Tmax.POOL FIRE
 002.TK24.DIESEL.WNW.Tmin.POOL FIRE
 003.TK24.DIESEL.CALMA.Tmax.POOL FIRE
 004.TK24.DIESEL.CALMA.Tmin.POOL FIRE
 005.TK25.DIESEL.NW.Tmax. POOL FIRE
 006.TK25.DIESEL.NW.Tmin.POOL FIRE
 007.TK25.DIESEL.CALMA.Tmax.POOL FIRE
 008.TK25.DIESEL.CALMA.Tmin.POOL FIRE
 009.TK38.FUEL OIL.N.Tmax.POOL FIRE
 010.TK38.FUEL OIL.N.Tmin.POOL FIRE
 011.TK38.FUEL OIL.CALMA.Tmax.POOL FIRE
 012.TK38.FUEL OIL.CALMA.Tmin.POOL FIRE
 013.TK13.TURBO.SE.Tmax.POOL FIRE
 014.TK13.TURBO.SE.Tmin.POOL FIRE
 015.TK13.TURBO.CALMA.Tmax.POOL FIRE
 016.TK13.TURBO.CALMA.Tmin.POOL FIRE
 017.TK17.NAFTA.ENE.Tmax.POOL FIRE
 018.TK17.NAFTA.ENE.Tmin.POOL FIRE
 019.TK17.NAFTA.CALMA.Tmax.POOL FIRE
 020.TK17.NAFTA.CALMA.Tmin.POOL FIRE
 021.TK19.AVIACION.SSE.Tmax.POOL FIRE
 022.TK19.AVIACION.SSE.Tmin.POOL FIRE
 023.TK19.AVIACION.CALMA.Tmax.POOL FIRE
 024.TK19.AVIACION.CALMA.Tmin.POOL FIRE
 025.TK22.TURBO.SW.Tmax.POOL FIRE
 026.TK22.TURBO.SW.Tmin.POOL FIRE
 027.TK22.TURBO.CALMA.Tmax.POOL FIRE

Corridas de la 28-54

 028.TK22.TURBO.CALMA.Tmin.POOL FIRE
 029.TK74.AVIACION.SW.Tmax.POOL FIRE
 030.TK74.AVIACION.SW.Tmin.POOL FIRE
 031.TK74.AVIACION.CALMA.Tmax.POOL FIRE
 032.TK74.AVIACION.CALMA.Tmin.POOL FIRE
 033.TK18.AVIACION.SE.Tmax.POOL FIRE
 034.TK18.AVIACION.SE.Tmin.POOL FIRE
 035.TK18.AVIACION.CALMA.Tmax.POOL FIRE
 036.TK18.AVIACION.CALMA.Tmin.POOL FIRE
 037.TK23.TURBO.W.Tmax.POOL FIRE
 038.TK23.TURBO.W.Tmin.POOL FIRE
 039.TK23.TURBO.CALMA.Tmax.POOL FIRE
 040.TK23.TURBO.CALMA.Tmin.POOL FIRE
 041.TK16.NAFTA.ESE.Tmax.POOL FIRE
 042.TK16.NAFTA.ESE.Tmin.POOL FIRE
 043.TK16.NAFTA.CALMA.Tmax.POOL FIRE
 044.TK16.NAFTA.CALMA.Tmin.POOL FIRE
 045.TK20.AVIACION.SSE.Tmax.POOL FIRE
 046.TK20.AVIACION.SSE.Tmin.POOL FIRE
 047.TK20.AVIACION.CALMA.Tmax.POOL FIRE
 048.TK20.AVIACION.CALMA.Tmin.POOL FIRE
 049.TK21.AVIACION.SSE.Tmax.POOL FIRE
 050.TK21.AVIACION.SSE.Tmin.POOL FIRE
 051.TK21.AVIACION.CALMA.Tmax.POOL FIRE
 052.TK21.AVIACION.CALMA.Tmin.POOL FIRE
 053.TK26.DIESEL.ENE.Tmax.POOL FIRE
 054.TK26.DIESEL.ENE.Tmin.POOL FIRE

Corridas de la 55-68

 055.TK26.DIESEL.CALMA.Tmax.POOL FIRE
 056.TK26.DIESEL.CALMA.Tmin.POOL FIRE
 057.TK1.DIESEL.E.Tmax.POOL FIRE
 058.TK1.DIESEL.E.Tmin.POOL FIRE
 059.TK1.DIESEL.CALMA.Tmax.POOL FIRE
 060.TK1.DIESEL.CALMA.Tmin.POOL FIRE
 061.TK4.DIESEL.E.Tmax.POOL FIRE
 062.TK4.DIESEL.E.Tmin.POOL FIRE
 063.TK4.DIESEL.CALMA.Tmax.POOL FIRE
 064.TK4.DIESEL.CALMA.Tmin.POOL FIRE
 065.TK30.FUEL OIL.NE.Tmax.POOL FIRE
 066.TK30.FUEL OIL.NE.Tmin.POOL FIRE
 067.TK30.FUEL OIL.CALMA.Tmax.POOL FIRE
 068.TK30.FUEL OIL.NE.Tmax.POOL FIRE

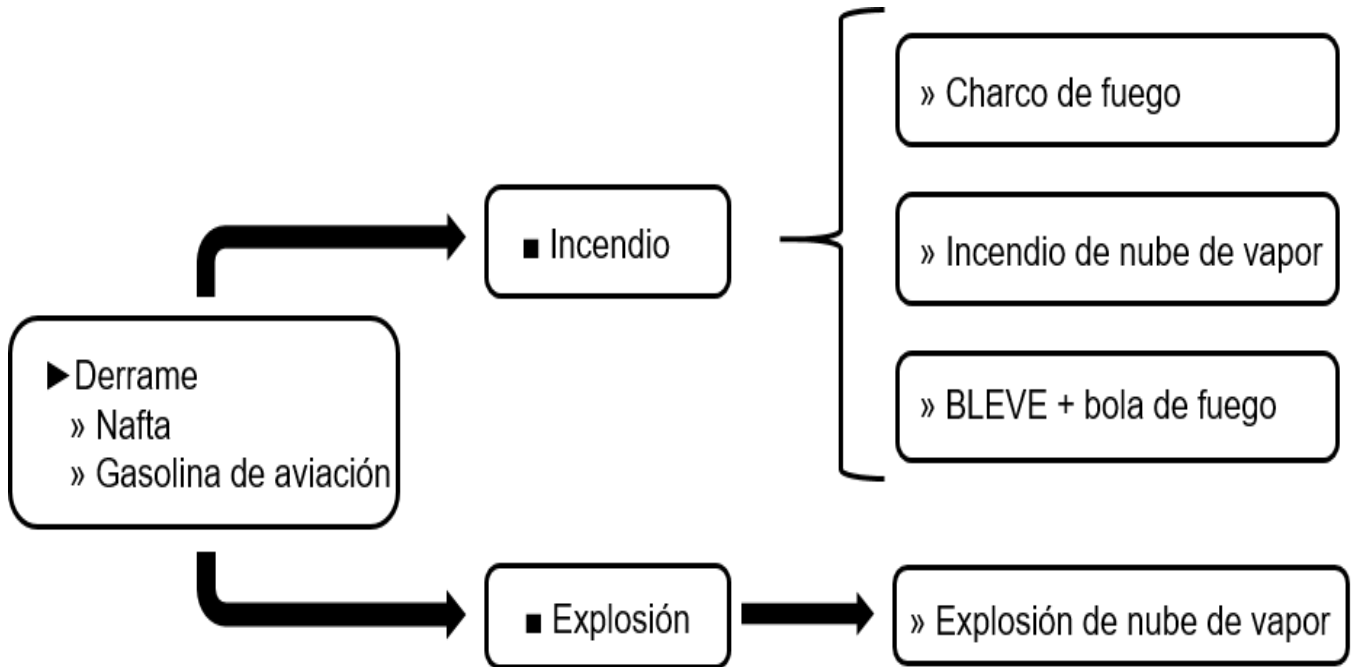
Anexo 29: Sustancias, equivalentes y temperaturas flash

Sustancia	Equivalente	Temperatura flash (°C)
Diésel	n-octano	13,34
Turbo combustible	n-nonano	31,11
Nafta	n-hexano	-23,00
Fuel oil	n-nonano	31,11
Combustible de aviación	n-heptano	-3,89

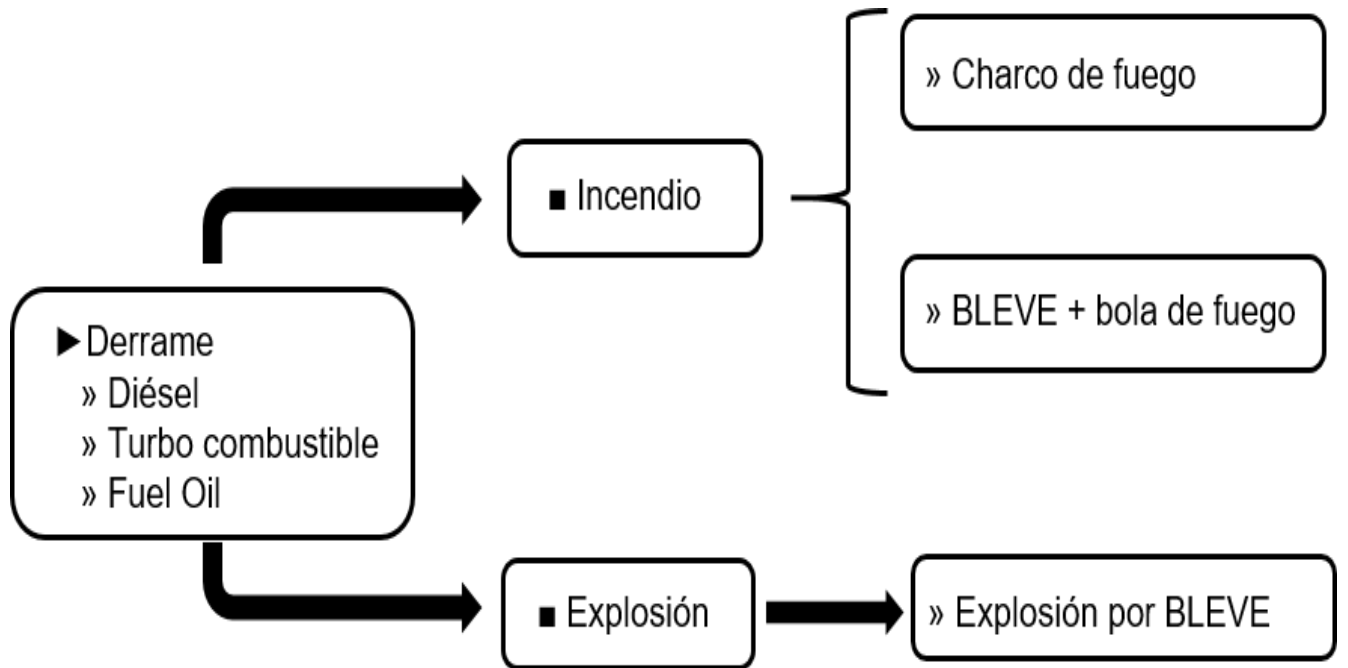
Anexo 30: Área de almacenamiento de hidrocarburos a evaluar



Anexo 31: Derrame de nafta o gasolina de aviación.



Anexo 32: Derrame de diésel; turbo combustible o *fuel oil*.



Anexo 33: Distancias entre las unidades de proceso

distancia (m)	TK 16	TK 17	TK 18	TK 19	TK 20	TK 21	TK 22	TK 23	TK 24	TK 25	TK 26	TK 30	TK 38	TK 74
TK 18	63	120		29	25	45	129	177	210	170	141	221	226	78
TK 19	90	149	29		28	51	143	188	228	194	166	250	251	70
TK 20	72	130	25	28		18	108	153	187	159	135	231	226	52
TK 21	75	131	45	51	18		90	136	179	149	129	238	221	38
TK 22	110	134	129	143	108	90		51	86	68	89	211	169	92
TK 23	161	181	177	188	153	136	51		68	86	130	249	194	136
TK 24	175	172	210	228	187	179	86	68		54	110	210	145	177
TK 25	123	119	170	194	159	149	78	86	54		57	265	110	146
TK 26	81	62	141	166	135	129	89	130	110	57		122	91	130
TK 30	161	101	221	250	231	238	211	249	210	165	122		78	230
TK 38	161	115	226	251	226	221	169	194	145	110	91	78		220
TK 74	107	131	78	70	52	38	92	136	177	146	130	230	220	

Anexo 34: Resultados del vector de escalado de radiación térmica, entre otros datos

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 1								
U/P secundaria afectada	Volumen (m3)	Distancia entre U/P (m)	Condición meteorológica (pool fire)	Intensidad de la radiación térmica (kw/m2)	Tiempo accidente (s)	ln(ttf)	tff (s)	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)
				Pool fire	Pool fire	Pool fire	Pool fire	Intensidad de la radiación (Pool fire)
Tanque 4	11334	83	E.Tmax	7,55	3600	7,29	1.466,12	3,35
	11334		E.Tmin	8,02	3600	7,22	1.369,41	3,47
	11334		CALMA.Tmax	5,88	3600	7,57	1.944,70	2,83
	11334		CALMA.Tmin	6,25	3600	7,50	1.815,12	2,95
Tanque 13	10653	171	E.Tmax	1,43	3600	9,19	9.786,04	- 0,16
	10653		E.Tmin	1,51	3600	9,13	9.202,23	- 0,05
	10653		CALMA.Tmax	1,34	3600	9,26	10.531,94	- 0,29
	10653		CALMA.Tmin	1,42	3600	9,20	9.863,95	- 0,17
Tanque 16	4882	122	E.Tmax	3,12	3600	8,46	4.727,00	1,18
	4882		E.Tmin	3,28	3600	8,40	4.467,28	1,29
	4882		CALMA.Tmax	2,7	3600	8,62	5.565,95	0,88
	4882		CALMA.Tmin	2,86	3600	8,56	5.215,39	1,00
Tanque 17	4647	90	E.Tmax	6,27	3600	7,68	2.161,67	2,63
	4647		E.Tmin	6,65	3600	7,61	2.022,62	2,75
	4647		CALMA.Tmax	5	3600	7,93	2.791,68	2,16
	4647		CALMA.Tmin	5,32	3600	7,86	2.602,69	2,29
Tanque 18	2316	167	E.Tmax	1,51	3600	9,35	11.493,63	- 0,46
	2316		E.Tmin	1,59	3600	9,29	10.842,33	- 0,35
	2316		CALMA.Tmax	1,4	3600	9,44	12.519,20	- 0,61
	2316		CALMA.Tmin	1,49	3600	9,36	11.668,12	- 0,48
Tanque 19	745	192	E.Tmax	1,1	3600	9,75	17.144,46	- 1,19
	745		E.Tmin	1,16	3600	9,69	16.145,82	- 1,08
	745		CALMA.Tmax	1,05	3600	9,80	18.069,81	- 1,29
	745		CALMA.Tmin	1,11	3600	9,74	16.970,03	- 1,18
Tanque 20	341	190	E.Tmax	1,13	3600	9,73	16.811,18	- 1,16
	341		E.Tmin	1,19	3600	9,67	15.856,56	- 1,05
	341		CALMA.Tmax	1,07	3600	9,79	17.880,24	- 1,27
	341		CALMA.Tmin	1,13	3600	9,73	16.811,18	- 1,16
Tanque 21	1068	195	E.Tmax	1,06	3600	9,78	17.723,96	- 1,26
	1068		E.Tmin	1,12	3600	9,72	16.654,82	- 1,14
	1068		CALMA.Tmax	1,01	3600	9,84	18.718,59	- 1,36
	1068		CALMA.Tmin	1,07	3600	9,77	17.536,89	- 1,24
Tanque 22	10885	221	E.Tmax	0,802	3600	9,84	18.695,31	- 1,35
	10885		E.Tmin	0,843	3600	9,78	17.671,14	- 1,25
	10885		CALMA.Tmax	0,777	3600	9,87	19.376,44	- 1,42
	10885		CALMA.Tmin	0,824	3600	9,81	18.132,26	- 1,30
Tanque 23	11524	271	E.Tmax	0,507	3600	10,34	30.859,53	- 2,28
	11524		E.Tmin	0,534	3600	10,28	29.102,26	- 2,17
	11524		CALMA.Tmax	0,504	3600	10,34	31.067,18	- 2,29
	11524		CALMA.Tmin	0,535	3600	10,28	29.040,80	- 2,17
Tanque 24	11341	260	E.Tmax	0,557	3600	10,24	27.883,78	- 2,09
	11341		E.Tmin	0,585	3600	10,18	26.380,43	- 1,99
	11341		CALMA.Tmax	0,551	3600	10,25	28.227,12	- 2,12
	11341		CALMA.Tmin	0,584	3600	10,18	26.431,48	- 1,99
Tanque 25	11411	210	E.Tmax	0,9	3600	9,69	16.183,15	- 1,09
	11411		E.Tmin	0,946	3600	9,64	15.296,79	- 0,98
	11411		CALMA.Tmax	0,866	3600	9,74	16.902,93	- 1,17
	11411		CALMA.Tmin	0,918	3600	9,67	15.825,04	- 1,05
Tanque 26	11608	150	E.Tmax	1,94	3600	8,82	6.758,64	0,52
	11608		E.Tmin	2,04	3600	8,76	6.385,48	0,63
	11608		CALMA.Tmax	1,76	3600	8,93	7.544,77	0,32
	11608		CALMA.Tmin	1,86	3600	8,87	7.088,03	0,44
Tanque 30	10914	107	E.Tmax	4,22	3600	7,96	2.860,95	2,11
	10914		E.Tmin	4,45	3600	7,90	2.694,43	2,22
	10914		CALMA.Tmax	3,53	3600	8,16	3.500,49	1,74
	10914		CALMA.Tmin	3,75	3600	8,09	3.269,33	1,87
Tanque 38	10919	167	E.Tmax	1,51	3600	9,12	9.137,17	- 0,03
	10919		E.Tmin	1,59	3600	9,06	8.619,40	- 0,08
	10919		CALMA.Tmax	1,4	3600	9,21	9.952,48	- 0,19
	10919		CALMA.Tmin	1,49	3600	9,14	9.275,88	- 0,06
Tanque 74	1186	196	E.Tmax	1,05	3600	9,79	17.858,53	- 1,27
	1186		E.Tmin	1,11	3600	9,73	16.771,61	- 1,15
	1186		CALMA.Tmax	1	3600	9,85	18.870,77	- 1,37
	1186		CALMA.Tmin	1,06	3600	9,78	17.668,27	- 1,25

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 4								
U/P secundaria afectada	Volumen (m3)	Distancia entre U/P (m)	Condición meteorológica (pool fire)	Intensidad de la radiación térmica (kw/m2)	Tiempo accidente (s)	In(ttf)	tff (s)	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)
				Pool fire	Pool fire	Pool fire	Pool fire	Intensidad de la radiación (Pool fire)
Tanque 1	8542	83	E.Tmax	7,55	3600	7,36	1.579,46	3,21
	8542		E.Tmin	8,02	3600	7,30	1.475,27	3,34
	8542		CALMA.Tmax	5,88	3600	7,65	2.095,04	2,69
	8542		CALMA.Tmin	6,25	3600	7,58	1.955,43	2,82
Tanque 13	10653	152	E.Tmax	1,88	3600	8,88	7.183,54	0,41
	10653		E.Tmin	1,98	3600	8,82	6.774,94	0,52
	10653		CALMA.Tmax	1,71	3600	8,99	7.995,60	0,21
	10653		CALMA.Tmin	1,81	3600	8,92	7.498,25	0,33
Tanque 16	4882	100	E.Tmax	4,93	3600	7,94	2.818,79	2,14
	4882		E.Tmin	5,21	3600	7,88	2.648,22	2,25
	4882		CALMA.Tmax	4,05	3600	8,17	3.520,11	1,73
	4882		CALMA.Tmin	4,3	3600	8,10	3.289,73	1,85
Tanque 17	4647	107	E.Tmax	4,22	3600	8,13	3.381,42	1,80
	4647		E.Tmin	4,45	3600	8,07	3.184,60	1,91
	4647		CALMA.Tmax	3,53	3600	8,33	4.137,30	1,43
	4647		CALMA.Tmin	3,75	3600	8,26	3.864,09	1,56
Tanque 18	2316	110	E.Tmax	3,96	3600	8,26	3.866,39	1,56
	2316		E.Tmin	4,18	3600	8,20	3.637,24	1,67
	2316		CALMA.Tmax	3,34	3600	8,45	4.686,71	1,20
	2316		CALMA.Tmin	3,54	3600	8,39	4.388,62	1,32
Tanque 19	745	127	E.Tmax	2,84	3600	8,68	5.870,13	0,78
	745		E.Tmin	2,99	3600	8,62	5.538,46	0,89
	745		CALMA.Tmax	2,49	3600	8,83	6.810,71	0,51
	745		CALMA.Tmin	2,64	3600	8,76	6.375,07	0,63
Tanque 20	341	135	E.Tmax	2,47	3600	8,85	6.947,51	0,47
	341		E.Tmin	2,6	3600	8,79	6.556,27	0,58
	341		CALMA.Tmax	2,19	3600	8,98	7.959,30	0,22
	341		CALMA.Tmin	2,32	3600	8,92	7.457,19	0,34
Tanque 21	1068	153	E.Tmax	1,85	3600	9,15	9.446,09	0,09
	1068		E.Tmin	1,95	3600	9,09	8.900,56	0,02
	1068		CALMA.Tmax	1,69	3600	9,26	10.462,71	0,28
	1068		CALMA.Tmin	1,79	3600	9,19	9.804,66	0,16
Tanque 22	10885	206	E.Tmax	0,939	3600	9,66	15.643,63	1,03
	10885		E.Tmin	0,988	3600	9,60	14.769,79	0,92
	10885		CALMA.Tmax	0,902	3600	9,70	16.370,66	1,11
	10885		CALMA.Tmin	0,956	3600	9,64	15.329,65	0,99
Tanque 23	11524	260	E.Tmax	0,557	3600	10,23	27.748,02	2,08
	11524		E.Tmin	0,585	3600	10,18	26.251,99	1,98
	11524		CALMA.Tmax	0,551	3600	10,24	28.089,69	2,11
	11524		CALMA.Tmin	0,584	3600	10,18	26.302,79	1,99
Tanque 24	11341	270	E.Tmax	0,512	3600	10,33	30.668,53	2,27
	11341		E.Tmin	0,538	3600	10,28	28.999,06	2,17
	11341		CALMA.Tmax	0,508	3600	10,34	30.941,54	2,29
	11341		CALMA.Tmin	0,539	3600	10,27	28.938,28	2,16
Tanque 25	11411	218	E.Tmax	0,827	3600	9,79	17.806,39	1,26
	11411		E.Tmin	0,869	3600	9,73	16.837,00	1,16
	11411		CALMA.Tmax	0,8	3600	9,82	18.486,96	1,33
	11411		CALMA.Tmin	0,848	3600	9,76	17.308,92	1,21
Tanque 26	11608	164	E.Tmax	1,58	3600	9,05	8.523,01	0,10
	11608		E.Tmin	1,66	3600	8,99	8.060,34	0,20
	11608		CALMA.Tmax	1,46	3600	9,14	9.318,73	0,07
	11608		CALMA.Tmin	1,55	3600	9,07	8.709,65	0,06
Tanque 30	10914	176	E.Tmax	1,34	3600	9,26	10.458,88	0,28
	10914		E.Tmin	1,41	3600	9,20	9.874,07	0,18
	10914		CALMA.Tmax	1,26	3600	9,32	11.212,31	0,41
	10914		CALMA.Tmin	1,33	3600	9,26	10.547,79	0,30
Tanque 38	10919	217	E.Tmax	0,835	3600	9,79	17.846,38	1,27
	10919		E.Tmin	0,878	3600	9,73	16.861,92	1,16
	10919		CALMA.Tmax	0,808	3600	9,83	18.521,71	1,34
	10919		CALMA.Tmin	0,856	3600	9,76	17.352,44	1,22
Tanque 74	1186	149	E.Tmax	1,97	3600	9,08	8.770,87	0,04
	1186		E.Tmin	2,07	3600	9,02	8.293,60	0,15
	1186		CALMA.Tmax	1,78	3600	9,19	9.835,92	0,17
	1186		CALMA.Tmin	1,89	3600	9,13	9.191,53	0,04

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 13								
U/P secundaria afectada	Volumen (m3)	Distancia entre U/P (m)	Condición meteorológica (pool fire)	Intensidad de la radiación térmica (kw/m2)	Tiempo accidente (s)	In(ttf)	tff (s)	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)
				Pool fire	Pool fire	Pool fire	Pool fire	Intensidad de la radiación (Pool fire)
Tanque 1	8542	171	SE.Tmax	1,36	3600	9,30	10.956,93	- 0,37
	8542		SE.Tmin	1,42	3600	9,25	10.435,23	- 0,28
	8542		CALMA.Tmax	1,34	3600	9,32	11.141,90	- 0,40
	8542		CALMA.Tmin	1,42	3600	9,25	10.435,23	- 0,28
Tanque 4	11334	152	SE.Tmax	1,74	3600	8,95	7.698,89	0,28
	11334		SE.Tmin	1,82	3600	8,90	7.317,59	0,38
	11334		CALMA.Tmax	1,72	3600	8,96	7.800,13	0,26
	11334		CALMA.Tmin	1,82	3600	8,90	7.317,59	0,38
Tanque 16	4882	57	SE.Tmax	12,6	3600	6,88	976,25	4,10
	4882		SE.Tmin	12,9	3600	6,86	950,64	4,15
	4882		CALMA.Tmax	12,1	3600	6,93	1.021,96	4,01
	4882		CALMA.Tmin	12,9	3600	6,86	950,64	4,15
Tanque 17	4647	86	SE.Tmax	5,69	3600	7,79	2.412,27	2,43
	4647		SE.Tmin	5,88	3600	7,75	2.324,37	2,50
	4647		CALMA.Tmax	5,53	3600	7,82	2.491,28	2,37
	4647		CALMA.Tmin	5,88	3600	7,75	2.324,37	2,50
Tanque 18	2316	86	SE.Tmax	5,69	3600	7,85	2.566,99	2,31
	2316		SE.Tmin	5,88	3600	7,81	2.473,46	2,38
	2316		CALMA.Tmax	5,53	3600	7,88	2.651,07	2,25
	2316		CALMA.Tmin	5,88	3600	7,81	2.473,46	2,38
Tanque 19	745	108	SE.Tmax	3,57	3600	8,42	4.532,97	1,26
	745		SE.Tmin	3,7	3600	8,38	4.353,41	1,34
	745		CALMA.Tmax	3,49	3600	8,44	4.650,56	1,21
	745		CALMA.Tmin	3,7	3600	8,38	4.353,41	1,34
Tanque 20	341	69	SE.Tmax	8,81	3600	7,41	1.651,03	3,13
	341		SE.Tmin	9,07	3600	7,38	1.597,65	3,19
	341		CALMA.Tmax	8,52	3600	7,45	1.714,67	3,06
	341		CALMA.Tmin	9,07	3600	7,38	1.597,65	3,19
Tanque 21	1068	65	SE.Tmax	9,88	3600	7,26	1.422,59	3,40
	1068		SE.Tmin	10,2	3600	7,22	1.372,27	3,47
	1068		CALMA.Tmax	9,53	3600	7,30	1.481,77	3,33
	1068		CALMA.Tmin	10,2	3600	7,22	1.372,27	3,47
Tanque 22	10885	53	SE.Tmax	14,4	3600	6,57	715,32	4,67
	10885		SE.Tmin	14,7	3600	6,55	698,85	4,72
	10885		CALMA.Tmax	13,8	3600	6,62	750,56	4,58
	10885		CALMA.Tmin	14,7	3600	6,55	698,85	4,72
Tanque 23	11524	105	SE.Tmax	3,78	3600	8,07	3.187,74	1,91
	11524		SE.Tmin	3,92	3600	8,03	3.059,39	1,99
	11524		CALMA.Tmax	3,7	3600	8,09	3.265,73	1,87
	11524		CALMA.Tmin	3,92	3600	8,03	3.059,39	1,99
Tanque 24	11341	124	SE.Tmax	2,68	3600	8,46	4.724,72	1,19
	11341		SE.Tmin	2,78	3600	8,42	4.533,12	1,26
	11341		CALMA.Tmax	2,63	3600	8,48	4.826,34	1,15
	11341		CALMA.Tmin	2,78	3600	8,42	4.533,12	1,26
Tanque 25	11411	85	SE.Tmax	5,83	3600	7,58	1.959,53	2,81
	11411		SE.Tmin	6,02	3600	7,54	1.889,79	2,88
	11411		CALMA.Tmax	5,67	3600	7,61	2.022,13	2,75
	11411		CALMA.Tmin	6,02	3600	7,54	1.889,79	2,88
Tanque 26	11608	67	SE.Tmax	9,33	3600	7,04	1.145,80	3,80
	11608		SE.Tmin	9,59	3600	7,01	1.110,76	3,86
	11608		CALMA.Tmax	9	3600	7,08	1.193,39	3,73
	11608		CALMA.Tmin	9,59	3600	7,01	1.110,76	3,86
Tanque 30	10914	178	SE.Tmax	1,25	3600	9,33	11.313,72	- 0,43
	10914		SE.Tmin	1,3	3600	9,29	10.823,25	- 0,35
	10914		CALMA.Tmax	1,23	3600	9,35	11.521,82	- 0,46
	10914		CALMA.Tmin	1,3	3600	9,29	10.823,25	- 0,35
Tanque 38	10919	155	SE.Tmax	1,67	3600	9,01	8.154,29	0,18
	10919		SE.Tmin	1,74	3600	8,96	7.784,58	0,26
	10919		CALMA.Tmax	1,65	3600	9,02	8.266,07	0,15
	10919		CALMA.Tmin	1,74	3600	8,96	7.784,58	0,26
Tanque 74	1186	66	SE.Tmax	9,6	3600	7,29	1.464,95	3,35
	1186		SE.Tmin	9,87	3600	7,26	1.419,75	3,41
	1186		CALMA.Tmax	9,26	3600	7,33	1.525,88	3,27
	1186		CALMA.Tmin	9,87	3600	7,26	1.419,75	3,41

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 16								
U/P secundaria afectada	Volumen (m3)	Distancia entre U/P (m)	Condición meteorológica (pool fire)	Intensidad de la radiación térmica (kw/m2)	Tiempo accidente (s)	ln(ttf)	tff (s)	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)
				Pool fire	Pool fire	Pool fire	Pool fire	Intensidad de la radiación (Pool fire)
Tanque 1	8542	122	ESE.Tmax	1,85	3600	8,95	7.738,98	0,27
	8542		ESE.Tmin	1,96	3600	8,89	7.250,01	0,39
	8542		CALMA.Tmax	1,85	3600	8,95	7.738,98	0,27
	8542		CALMA.Tmin	1,96	3600	8,89	7.250,01	0,39
Tanque 4	11334	100	ESE.Tmax	2,77	3600	8,42	4.552,47	1,25
	11334		ESE.Tmin	2,95	3600	8,35	4.239,85	1,39
	11334		CALMA.Tmax	2,77	3600	8,42	4.552,47	1,25
	11334		CALMA.Tmin	2,95	3600	8,35	4.239,85	1,39
Tanque 13	10653	57	ESE.Tmax	8,16	3600	7,22	1.367,50	3,48
	10653		ESE.Tmin	8,74	3600	7,14	1.265,40	3,62
	10653		CALMA.Tmax	8,16	3600	7,22	1.367,50	3,48
	10653		CALMA.Tmin	8,74	3600	7,14	1.265,40	3,62
Tanque 17	4647	55	ESE.Tmax	8,7	3600	7,31	1.492,95	3,31
	4647		ESE.Tmin	9,33	3600	7,23	1.379,54	3,46
	4647		CALMA.Tmax	8,7	3600	7,31	1.492,95	3,31
	4647		CALMA.Tmin	9,33	3600	7,23	1.379,54	3,46
Tanque 18	2316	63	ESE.Tmax	6,79	3600	7,65	2.102,27	2,68
	2316		ESE.Tmin	7,26	3600	7,58	1.949,14	2,82
	2316		CALMA.Tmax	6,79	3600	7,65	2.102,27	2,68
	2316		CALMA.Tmin	7,26	3600	7,58	1.949,14	2,82
Tanque 19	745	90	ESE.Tmax	3,42	3600	8,47	4.758,26	1,17
	745		ESE.Tmin	3,64	3600	8,40	4.434,58	1,30
	745		CALMA.Tmax	3,42	3600	8,47	4.758,26	1,17
	745		CALMA.Tmin	3,64	3600	8,40	4.434,58	1,30
Tanque 20	341	72	ESE.Tmax	5,28	3600	7,99	2.944,43	2,06
	341		ESE.Tmin	5,64	3600	7,91	2.732,95	2,20
	341		CALMA.Tmax	5,28	3600	7,99	2.944,43	2,06
	341		CALMA.Tmin	5,64	3600	7,91	2.732,95	2,20
Tanque 21	1068	75	ESE.Tmax	4,89	3600	8,05	3.149,47	1,93
	1068		ESE.Tmin	5,21	3600	7,98	2.931,77	2,07
	1068		CALMA.Tmax	4,89	3600	8,05	3.149,47	1,93
	1068		CALMA.Tmin	5,21	3600	7,98	2.931,77	2,07
Tanque 22	10885	110	ESE.Tmax	2,28	3600	8,66	5.740,94	0,83
	10885		ESE.Tmin	2,43	3600	8,58	5.342,13	0,96
	10885		CALMA.Tmax	2,28	3600	8,66	5.740,94	0,83
	10885		CALMA.Tmin	2,43	3600	8,58	5.342,13	0,96
Tanque 23	11524	161	ESE.Tmax	1,04	3600	9,53	13.702,53	0,78
	11524		ESE.Tmin	1,1	3600	9,46	12.861,00	0,66
	11524		CALMA.Tmax	1,04	3600	9,53	13.702,53	0,78
	11524		CALMA.Tmin	1,1	3600	9,46	12.861,00	0,66
Tanque 24	11341	175	ESE.Tmax	0,874	3600	9,73	16.759,46	1,15
	11341		ESE.Tmin	0,927	3600	9,66	15.680,79	1,03
	11341		CALMA.Tmax	0,874	3600	9,73	16.759,46	1,15
	11341		CALMA.Tmin	0,927	3600	9,66	15.680,79	1,03
Tanque 25	11411	123	ESE.Tmax	1,82	3600	8,90	7.302,58	0,38
	11411		ESE.Tmin	1,93	3600	8,83	6.834,04	0,50
	11411		CALMA.Tmax	1,82	3600	8,90	7.302,58	0,38
	11411		CALMA.Tmin	1,93	3600	8,83	6.834,04	0,50
Tanque 26	11608	81	ESE.Tmax	4,21	3600	7,94	2.816,03	2,14
	11608		ESE.Tmin	4,48	3600	7,87	2.625,01	2,27
	11608		CALMA.Tmax	4,21	3600	7,94	2.816,03	2,14
	11608		CALMA.Tmin	4,48	3600	7,87	2.625,01	2,27
Tanque 30	10914	161	ESE.Tmax	1,04	3600	9,54	13.927,27	0,81
	10914		ESE.Tmin	1,1	3600	9,48	13.071,94	0,69
	10914		CALMA.Tmax	1,04	3600	9,54	13.927,27	0,81
	10914		CALMA.Tmin	1,1	3600	9,48	13.071,94	0,69
Tanque 38	10919	161	ESE.Tmax	1,04	3600	9,54	13.925,41	0,81
	10919		ESE.Tmin	1,1	3600	9,48	13.070,20	0,69
	10919		CALMA.Tmax	1,04	3600	9,54	13.925,41	0,81
	10919		CALMA.Tmin	1,1	3600	9,48	13.070,20	0,69
Tanque 74	1186	107	ESE.Tmax	2,42	3600	8,85	6.951,50	0,47
	1186		ESE.Tmin	2,57	3600	8,78	6.494,79	0,60
	1186		CALMA.Tmax	2,42	3600	8,85	6.951,50	0,47
	1186		CALMA.Tmin	2,57	3600	8,78	6.494,79	0,60

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 17								
U/P secundaria afectada	Volumen (m3)	Distancia entre U/P (m)	Condición meteorológica (pool fire)	Intensidad de la radiación térmica (kw/m2)	Tiempo accidente (s)	ln(ttf)	tff (s)	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)
				Pool fire	Pool fire	Pool fire	Pool fire	Intensidad de la radiación (Pool fire)
Tanque 1	8542	90	ENE.Tmax	6,31	3600	7,57	1.934,44	2,83
	8542		ENE.Tmin	6,68	3600	7,50	1.813,80	2,95
	8542		CALMA.Tmax	4,85	3600	7,86	2.604,35	2,29
	8542		CALMA.Tmin	5,17	3600	7,79	2.422,94	2,42
Tanque 4	11334	107	ENE.Tmax	4,22	3600	7,95	2.829,08	2,13
	11334		ENE.Tmin	4,45	3600	7,89	2.664,42	2,24
	11334		CALMA.Tmax	3,44	3600	8,18	3.564,00	1,71
	11334		CALMA.Tmin	3,66	3600	8,11	3.322,89	1,84
Tanque 13	10653	86	ENE.Tmax	7,01	3600	7,39	1.623,59	3,16
	10653		ENE.Tmin	7,43	3600	7,33	1.520,27	3,28
	10653		CALMA.Tmax	5,3	3600	7,71	2.226,92	2,57
	10653		CALMA.Tmin	5,65	3600	7,64	2.071,68	2,71
Tanque 16	4882	55	ENE.Tmax	18,6	3600	6,44	628,68	4,91
	4882		ENE.Tmin	20,2	3600	6,35	572,71	5,08
	4882		CALMA.Tmax	12,1	3600	6,93	1.021,96	4,01
	4882		CALMA.Tmin	12,9	3600	6,86	950,64	4,15
Tanque 18	2316	120	ENE.Tmax	3,23	3600	8,49	4.867,46	1,13
	2316		ENE.Tmin	3,4	3600	8,43	4.593,36	1,24
	2316		CALMA.Tmax	2,73	3600	8,68	5.886,23	0,78
	2316		CALMA.Tmin	2,9	3600	8,61	5.497,83	0,91
Tanque 19	745	149	ENE.Tmax	1,95	3600	9,10	8.977,56	- 0,00
	745		ENE.Tmin	2,05	3600	9,05	8.484,29	0,10
	745		CALMA.Tmax	1,75	3600	9,22	10.145,29	- 0,23
	745		CALMA.Tmin	1,86	3600	9,16	9.469,95	- 0,10
Tanque 20	341	130	ENE.Tmax	2,68	3600	8,75	6.335,55	0,644
	341		ENE.Tmin	2,81	3600	8,70	6.005,36	0,743
	341		CALMA.Tmax	2,32	3600	8,92	7.457,19	0,34
	341		CALMA.Tmin	2,46	3600	8,85	6.979,43	0,46
Tanque 21	1068	131	ENE.Tmax	2,63	3600	8,76	6.347,55	0,640
	1068		ENE.Tmin	2,76	3600	8,70	6.010,76	0,741
	1068		CALMA.Tmax	2,28	3600	8,92	7.459,16	0,34
	1068		CALMA.Tmin	2,43	3600	8,85	6.940,99	0,48
Tanque 22	10885	134	ENE.Tmax	2,49	3600	8,56	5.196,90	1,01
	10885		ENE.Tmin	2,62	3600	8,50	4.906,47	1,12
	10885		CALMA.Tmax	2,18	3600	8,71	6.039,40	0,73
	10885		CALMA.Tmin	2,31	3600	8,64	5.656,76	0,85
Tanque 23	11524	181	ENE.Tmax	1,24	3600	9,33	11.232,64	- 0,41
	11524		ENE.Tmin	1,3	3600	9,27	10.648,60	- 0,32
	11524		CALMA.Tmax	1,17	3600	9,39	11.994,95	- 0,54
	11524		CALMA.Tmin	1,24	3600	9,33	11.232,64	- 0,41
Tanque 24	11341	172	ENE.Tmax	1,4	3600	9,19	9.841,09	- 0,17
	11341		ENE.Tmin	1,47	3600	9,14	9.313,21	- 0,07
	11341		CALMA.Tmax	1,3	3600	9,28	10.700,69	- 0,32
	11341		CALMA.Tmin	1,38	3600	9,21	10.002,41	- 0,20
Tanque 25	11411	119	ENE.Tmax	3,29	3600	8,23	3.740,47	1,62
	11411		ENE.Tmin	3,46	3600	8,17	3.533,47	1,72
	11411		CALMA.Tmax	2,78	3600	8,42	4.524,67	1,27
	11411		CALMA.Tmin	2,95	3600	8,35	4.231,15	1,39
Tanque 26	11608	62	ENE.Tmax	14,6	3600	6,54	690,81	4,74
	11608		ENE.Tmin	15,7	3600	6,46	636,37	4,89
	11608		CALMA.Tmax	9,77	3600	6,99	1.087,66	3,90
	11608		CALMA.Tmin	10,5	3600	6,91	1.002,61	4,05
Tanque 30	10914	101	ENE.Tmax	4,83	3600	7,81	2.456,14	2,39
	10914		ENE.Tmin	5,1	3600	7,74	2.309,72	2,51
	10914		CALMA.Tmax	3,86	3600	8,06	3.164,24	1,93
	10914		CALMA.Tmin	4,11	3600	7,99	2.947,63	2,06
Tanque 38	10919	115	ENE.Tmax	3,56	3600	8,15	3.466,71	1,76
	10919		ENE.Tmin	3,75	3600	8,09	3.268,89	1,87
	10919		CALMA.Tmax	2,98	3600	8,35	4.238,30	1,39
	10919		CALMA.Tmin	3,17	3600	8,28	3.952,38	1,52
Tanque 74	1186	131	ENE.Tmax	2,63	3600	8,75	6.327,61	0,65
	1186		ENE.Tmin	2,76	3600	8,70	5.991,87	0,75
	1186		CALMA.Tmax	2,28	3600	8,91	7.435,72	0,35
	1186		CALMA.Tmin	2,43	3600	8,84	6.919,18	0,48

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 18								
U/P secundaria afectada	Volumen (m3)	Distancia entre U/P (m)	Condición meteorológica (pool fire)	Intensidad de la radiación térmica (kw/m2)	Tiempo accidente (s)	ln(ttf)	tff (s)	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)
				Pool fire	Pool fire	Pool fire	Pool fire	Intensidad de la radiación (Pool fire)
Tanque 1	8542	167	SE.Tmax	0,654	3600	10,13	25.060,22	1,90
	8542		SE.Tmin	0,689	3600	10,07	23.626,53	1,79
	8542		CALMA.Tmax	0,625	3600	10,18	26.378,09	1,99
	8542		CALMA.Tmin	0,662	3600	10,12	24.718,28	1,87
Tanque 4	11334	110	SE.Tmax	1,65	3600	9,01	8.175,08	0,17
	11334		SE.Tmin	1,75	3600	8,94	7.649,20	0,30
	11334		CALMA.Tmax	1,49	3600	9,12	9.173,78	0,04
	11334		CALMA.Tmin	1,58	3600	9,06	8.585,52	0,08
Tanque 13	10653	86	SE.Tmax	2,85	3600	8,41	4.489,13	1,28
	10653		SE.Tmin	3,03	3600	8,34	4.188,96	1,41
	10653		CALMA.Tmax	2,47	3600	8,57	5.277,03	0,98
	10653		CALMA.Tmin	2,62	3600	8,50	4.936,92	1,10
Tanque 16	4882	63	SE.Tmax	5,63	3600	7,79	2.426,08	2,42
	4882		SE.Tmin	6,02	3600	7,72	2.249,24	2,56
	4882		CALMA.Tmax	4,57	3600	8,03	3.070,97	1,98
	4882		CALMA.Tmin	4,87	3600	7,96	2.858,07	2,11
Tanque 17	4647	120	SE.Tmax	1,36	3600	9,41	12.156,35	0,56
	4647		SE.Tmin	1,44	3600	9,34	11.396,00	0,44
	4647		CALMA.Tmax	1,25	3600	9,50	13.371,92	0,74
	4647		CALMA.Tmin	1,32	3600	9,44	12.573,42	0,62
Tanque 19	745	29	SE.Tmax	24,1	3600	6,26	523,86	5,25
	745		SE.Tmin	26,6	3600	6,15	468,58	5,45
	745		CALMA.Tmax	17,5	3600	6,62	752,08	4,58
	745		CALMA.Tmin	18,8	3600	6,54	693,58	4,73
Tanque 20	341	25	SE.Tmax	30	3600	6,02	413,46	5,68
	341		SE.Tmin	33,2	3600	5,91	368,72	5,90
	341		CALMA.Tmax	21,8	3600	6,39	593,09	5,02
	341		CALMA.Tmin	23,5	3600	6,30	544,84	5,18
Tanque 21	1068	45	SE.Tmax	11,3	3600	7,11	1.222,30	3,68
	1068		SE.Tmin	12,2	3600	7,02	1.120,91	3,84
	1068		CALMA.Tmax	8,54	3600	7,42	1.677,29	3,10
	1068		CALMA.Tmin	9,14	3600	7,35	1.553,41	3,24
Tanque 22	10885	129	SE.Tmax	1,16	3600	9,42	12.320,04	0,58
	10885		SE.Tmin	1,22	3600	9,36	11.637,59	0,48
	10885		CALMA.Tmax	1,07	3600	9,51	13.497,27	0,75
	10885		CALMA.Tmin	1,14	3600	9,44	12.564,56	0,62
Tanque 23	11524	177	SE.Tmax	0,575	3600	10,19	26.768,48	2,02
	11524		SE.Tmin	0,606	3600	10,14	25.226,34	1,91
	11524		CALMA.Tmax	0,553	3600	10,24	27.974,92	2,10
	11524		CALMA.Tmin	0,586	3600	10,17	26.201,37	1,98
Tanque 24	11341	210	SE.Tmax	0,395	3600	10,62	41.116,22	2,81
	11341		SE.Tmin	0,416	3600	10,57	38.778,63	2,70
	11341		CALMA.Tmax	0,386	3600	10,65	42.201,15	2,86
	11341		CALMA.Tmin	0,409	3600	10,58	39.529,44	2,74
Tanque 25	11411	170	SE.Tmax	0,628	3600	10,10	24.303,16	1,84
	11411		SE.Tmin	0,662	3600	10,04	22.897,48	1,73
	11411		CALMA.Tmax	0,602	3600	10,15	25.492,54	1,93
	11411		CALMA.Tmin	0,638	3600	10,08	23.873,15	1,81
Tanque 26	11608	141	SE.Tmax	0,951	3600	9,62	15.126,25	0,96
	11608		SE.Tmin	1	3600	9,57	14.291,42	0,86
	11608		CALMA.Tmax	0,891	3600	9,70	16.282,22	1,10
	11608		CALMA.Tmin	0,944	3600	9,63	15.253,06	0,98
Tanque 30	10914	221	SE.Tmax	0,353	3600	10,76	47.220,25	3,07
	10914		SE.Tmin	0,372	3600	10,70	44.504,12	2,96
	10914		CALMA.Tmax	0,346	3600	10,79	48.301,18	3,11
	10914		CALMA.Tmin	0,367	3600	10,72	45.189,87	2,99
Tanque 38	10919	226	SE.Tmax	0,336	3600	10,82	49.922,05	3,17
	10919		SE.Tmin	0,354	3600	10,76	47.063,27	3,06
	10919		CALMA.Tmax	0,33	3600	10,84	50.948,93	3,21
	10919		CALMA.Tmin	0,35	3600	10,77	47.671,51	3,08
Tanque 74	1186	78	SE.Tmax	3,54	3600	8,42	4.522,89	1,27
	1186		SE.Tmin	3,76	3600	8,35	4.225,01	1,39
	1186		CALMA.Tmax	3,01	3600	8,60	5.432,62	0,93
	1186		CALMA.Tmin	3,19	3600	8,53	5.087,52	1,05

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 19								
U/P secundaria afectada	Volumen (m3)	Distancia entre U/P (m)	Condición meteorológica (pool fire)	Intensidad de la radiación térmica (kw/m2)	Tiempo accidente (s)	ln(ttf)	tff (s)	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)
				Pool fire	Pool fire	Pool fire	Pool fire	Intensidad de la radiación (Pool fire)
Tanque 1	8542	192	SSE.Tmax	0,27	3600	11,13	68.099,93	- 3,74
	8542		SSE.Tmin	0,327	3600	10,91	54.846,48	- 3,34
	8542		CALMA.Tmax	0,263	3600	11,16	70.151,63	- 3,80
	8542		CALMA.Tmin	0,279	3600	11,09	65.622,84	- 3,67
Tanque 4	11334	127	SSE.Tmax	0,66	3600	10,04	23.023,13	- 1,74
	11334		SSE.Tmin	0,803	3600	9,82	18.446,78	- 1,33
	11334		CALMA.Tmax	0,628	3600	10,10	24.353,12	- 1,84
	11334		CALMA.Tmin	0,665	3600	10,04	22.827,62	- 1,72
Tanque 13	10653	108	SSE.Tmax	0,938	3600	9,67	15.759,69	- 1,04
	10653		SSE.Tmin	1,14	3600	9,44	12.642,54	- 0,63
	10653		CALMA.Tmax	0,88	3600	9,74	16.938,36	- 1,17
	10653		CALMA.Tmin	0,932	3600	9,67	15.874,38	- 1,05
Tanque 16	4882	90	SSE.Tmax	1,39	3600	9,37	11.786,19	- 0,50
	4882		SSE.Tmin	1,71	3600	9,14	9.325,98	- 0,07
	4882		CALMA.Tmax	1,28	3600	9,47	12.936,98	- 0,67
	4882		CALMA.Tmin	1,36	3600	9,40	12.080,40	- 0,55
Tanque 17	4647	149	SSE.Tmax	0,467	3600	10,61	40.679,35	- 2,79
	4647		SSE.Tmin	0,567	3600	10,39	32.670,31	- 2,39
	4647		CALMA.Tmax	0,449	3600	10,66	42.526,90	- 2,87
	4647		CALMA.Tmin	0,476	3600	10,59	39.811,29	- 2,75
Tanque 18	2316	29	SSE.Tmax	13,5	3600	6,87	966,99	- 4,12
	2316		SSE.Tmin	18,3	3600	6,53	685,70	- 4,75
	2316		CALMA.Tmax	10,9	3600	7,12	1.231,43	- 3,67
	2316		CALMA.Tmin	11,7	3600	7,04	1.136,71	- 3,82
Tanque 20	341	28	SSE.Tmax	14,3	3600	6,86	955,10	- 4,14
	341		SSE.Tmin	19,4	3600	6,52	676,65	- 4,78
	341		CALMA.Tmax	11,5	3600	7,11	1.221,77	- 3,68
	341		CALMA.Tmin	12,4	3600	7,02	1.122,05	- 3,84
Tanque 21	1068	51	SSE.Tmax	4,64	3600	8,11	3.341,88	- 1,83
	1068		SSE.Tmin	5,9	3600	7,84	2.547,38	- 2,33
	1068		CALMA.Tmax	3,99	3600	8,28	3.963,30	- 1,51
	1068		CALMA.Tmin	4,24	3600	8,22	3.700,27	- 1,64
Tanque 22	10885	143	SSE.Tmax	0,51	3600	10,35	31.181,38	- 2,30
	10885		SSE.Tmin	0,62	3600	10,13	25.006,16	- 1,89
	10885		CALMA.Tmax	0,49	3600	10,39	32.623,31	- 2,38
	10885		CALMA.Tmin	0,519	3600	10,33	30.571,06	- 2,26
Tanque 23	11524	188	SSE.Tmax	0,282	3600	11,00	59.877,94	- 3,50
	11524		SSE.Tmin	0,342	3600	10,78	48.150,28	- 3,10
	11524		CALMA.Tmax	0,275	3600	11,03	61.603,07	- 3,56
	11524		CALMA.Tmin	0,292	3600	10,96	57.565,95	- 3,43
Tanque 24	11341	228	SSE.Tmax	0,186	3600	11,48	96.298,23	- 4,38
	11341		SSE.Tmin	0,226	3600	11,26	77.272,58	- 3,98
	11341		CALMA.Tmax	0,183	3600	11,49	98.084,01	- 4,42
	11341		CALMA.Tmin	0,195	3600	11,42	91.291,18	- 4,28
Tanque 25	11411	194	SSE.Tmax	0,264	3600	11,08	64.706,03	- 3,65
	11411		SSE.Tmin	0,32	3600	10,86	52.064,02	- 3,25
	11411		CALMA.Tmax	0,258	3600	11,10	66.408,99	- 3,70
	11411		CALMA.Tmin	0,273	3600	11,04	62.300,76	- 3,58
Tanque 26	11608	166	SSE.Tmax	0,369	3600	10,69	44.089,54	- 2,94
	11608		SSE.Tmin	0,448	3600	10,47	35.410,43	- 2,53
	11608		CALMA.Tmax	0,358	3600	10,73	45.623,39	- 3,00
	11608		CALMA.Tmin	0,379	3600	10,66	42.777,27	- 2,88
Tanque 30	10914	250	SSE.Tmax	0,153	3600	11,71	121.454,17	- 4,81
	10914		SSE.Tmin	0,185	3600	11,49	97.996,30	- 4,41
	10914		CALMA.Tmax	0,151	3600	11,72	123.273,52	- 4,84
	10914		CALMA.Tmin	0,16	3600	11,66	115.467,07	- 4,72
Tanque 38	10919	251	SSE.Tmax	0,151	3600	11,72	123.257,08	- 4,84
	10919		SSE.Tmin	0,184	3600	11,50	98.585,19	- 4,43
	10919		CALMA.Tmax	0,15	3600	11,73	124.186,02	- 4,85
	10919		CALMA.Tmin	0,159	3600	11,66	116.272,52	- 4,73
Tanque 74	1186	70	SSE.Tmax	2,39	3600	8,86	7.050,18	- 0,45
	1186		SSE.Tmin	2,97	3600	8,62	5.515,37	- 0,90
	1186		CALMA.Tmax	2,14	3600	8,99	7.987,71	- 0,22
	1186		CALMA.Tmin	2,27	3600	8,92	7.472,75	- 0,34

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 20								
U/P secundaria afectada	Volumen (m3)	Distancia entre U/P (m)	Condición meteorológica (pool fire)	Intensidad de la radiación térmica (kw/m2)	Tiempo accidente (s)	ln(ttf)	tff (s)	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)
				Pool fire	Pool fire	Pool fire	Pool fire	Intensidad de la radiación (Pool fire)
Tanque 1	8542	190	SSE.Tmax	0,269	3600	11,13	68.386,07	- 3,75
	8542		SSE.Tmin	0,291	3600	11,04	62.573,24	- 3,59
	8542		CALMA.Tmax	0,269	3600	11,13	68.386,07	- 3,75
	8542		CALMA.Tmin	0,286	3600	11,06	63.810,79	- 3,62
Tanque 4	11334	135	SSE.Tmax	0,552	3600	10,25	28.174,61	- 2,11
	11334		SSE.Tmin	0,612	3600	10,13	25.073,79	- 1,90
	11334		CALMA.Tmax	0,552	3600	10,25	28.174,61	- 2,11
	11334		CALMA.Tmin	0,585	3600	10,18	26.385,35	- 1,99
Tanque 13	10653	69	SSE.Tmax	2,2	3600	8,70	6.014,50	- 0,74
	10653		SSE.Tmin	2,64	3600	8,50	4.894,68	- 1,12
	10653		CALMA.Tmax	2,2	3600	8,70	6.014,50	- 0,74
	10653		CALMA.Tmin	2,34	3600	8,63	5.609,48	- 0,87
Tanque 16	4882	72	SSE.Tmax	2,02	3600	8,95	7.725,62	- 0,28
	4882		SSE.Tmin	2,4	3600	8,76	6.358,31	- 0,64
	4882		CALMA.Tmax	2,02	3600	8,95	7.725,62	- 0,28
	4882		CALMA.Tmin	2,15	3600	8,88	7.199,87	- 0,41
Tanque 17	4647	130	SSE.Tmax	0,598	3600	10,33	30.763,08	- 2,27
	4647		SSE.Tmin	0,664	3600	10,22	27.330,79	- 2,06
	4647		CALMA.Tmax	0,598	3600	10,33	30.763,08	- 2,27
	4647		CALMA.Tmin	0,633	3600	10,27	28.848,01	- 2,16
Tanque 18	2316	25	SSE.Tmax	13,7	3600	6,86	951,06	- 4,15
	2316		SSE.Tmin	19	3600	6,49	657,22	- 4,83
	2316		CALMA.Tmax	13,7	3600	6,86	951,06	- 4,15
	2316		CALMA.Tmin	14,8	3600	6,77	871,58	- 4,31
Tanque 19	745	28	SSE.Tmax	11,5	3600	7,10	1.208,67	- 3,70
	745		SSE.Tmin	15,8	3600	6,74	844,14	- 4,37
	745		CALMA.Tmax	11,5	3600	7,10	1.208,67	- 3,70
	745		CALMA.Tmin	12,4	3600	7,01	1.110,02	- 3,86
Tanque 21	1068	18	SSE.Tmax	22	3600	6,36	575,73	- 5,07
	1068		SSE.Tmin	30,6	3600	5,98	396,54	- 5,76
	1068		CALMA.Tmax	22	3600	6,36	575,73	- 5,07
	1068		CALMA.Tmin	23,7	3600	6,27	529,29	- 5,23
Tanque 22	10885	108	SSE.Tmax	0,88	3600	9,73	16.833,88	- 1,16
	10885		SSE.Tmin	0,995	3600	9,59	14.652,43	- 0,90
	10885		CALMA.Tmax	0,88	3600	9,73	16.833,88	- 1,16
	10885		CALMA.Tmin	0,933	3600	9,67	15.757,36	- 1,04
Tanque 23	11524	153	SSE.Tmax	0,425	3600	10,54	37.667,68	- 2,65
	11524		SSE.Tmin	0,466	3600	10,43	33.944,72	- 2,46
	11524		CALMA.Tmax	0,425	3600	10,54	37.667,68	- 2,65
	11524		CALMA.Tmin	0,45	3600	10,47	35.311,66	- 2,53
Tanque 24	11341	187	SSE.Tmax	0,279	3600	11,02	60.902,51	- 3,54
	11341		SSE.Tmin	0,302	3600	10,93	55.687,81	- 3,37
	11341		CALMA.Tmax	0,279	3600	11,02	60.902,51	- 3,54
	11341		CALMA.Tmin	0,295	3600	10,95	57.183,28	- 3,42
Tanque 25	11411	159	SSE.Tmax	0,392	3600	10,63	41.394,62	- 2,82
	11411		SSE.Tmin	0,429	3600	10,53	37.383,54	- 2,63
	11411		CALMA.Tmax	0,392	3600	10,63	41.394,62	- 2,82
	11411		CALMA.Tmin	0,415	3600	10,57	38.811,71	- 2,70
Tanque 26	11608	135	SSE.Tmax	0,552	3600	10,24	27.969,47	- 2,10
	11608		SSE.Tmin	0,612	3600	10,12	24.891,23	- 1,88
	11608		CALMA.Tmax	0,552	3600	10,24	27.969,47	- 2,10
	11608		CALMA.Tmin	0,585	3600	10,17	26.193,24	- 1,98
Tanque 30	10914	231	SSE.Tmax	0,178	3600	11,54	102.362,09	- 4,50
	10914		SSE.Tmin	0,191	3600	11,46	94.524,86	- 4,35
	10914		CALMA.Tmax	0,178	3600	11,54	102.362,09	- 4,50
	10914		CALMA.Tmin	0,189	3600	11,47	95.655,93	- 4,37
Tanque 38	10919	226	SSE.Tmax	0,187	3600	11,48	96.799,88	- 4,39
	10919		SSE.Tmin	0,2	3600	11,40	89.720,55	- 4,25
	10919		CALMA.Tmax	0,187	3600	11,48	96.799,88	- 4,39
	10919		CALMA.Tmin	0,198	3600	11,42	90.745,30	- 4,27
Tanque 74	1186	52	SSE.Tmax	3,84	3600	8,32	4.125,68	- 1,44
	1186		SSE.Tmin	4,82	3600	8,07	3.191,14	- 1,91
	1186		CALMA.Tmax	3,84	3600	8,32	4.125,68	- 1,44
	1186		CALMA.Tmin	4,09	3600	8,25	3.841,87	- 1,57

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 21									
U/P secundaria afectada	Volumen (m3)	Distancia entre U/P (m)	Condición meteorológica (pool fire)	Intensidad de la radiación térmica (kw/m2)	Tiempo accidente (s)	In(ttf)	tff (s)	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)	
				Pool fire	Pool fire	Pool fire	Pool fire	Intensidad de la radiación (Pool fire)	
Tanque 1	8542	195	SSE.Tmax	0,261	3600	11,17	70.759,37	-	3,81
	8542		SSE.Tmin	0,275	3600	11,11	66.702,45	-	3,70
	8542		CALMA.Tmax	0,255	3600	11,19	72.643,60	-	3,86
	8542		CALMA.Tmin	0,27	3600	11,13	68.099,93	-	3,74
Tanque 4	11334	153	SSE.Tmax	0,441	3600	10,50	36.310,60	-	2,58
	11334		SSE.Tmin	0,466	3600	10,44	34.117,17	-	2,47
	11334		CALMA.Tmax	0,425	3600	10,54	37.859,03	-	2,66
	11334		CALMA.Tmin	0,45	3600	10,48	35.491,05	-	2,54
Tanque 13	10653	65	SSE.Tmax	2,8	3600	8,43	4.579,82	-	1,24
	10653		SSE.Tmin	3	3600	8,35	4.236,33	-	1,39
	10653		CALMA.Tmax	2,48	3600	8,57	5.252,99	-	0,99
	10653		CALMA.Tmin	2,64	3600	8,50	4.894,68	-	1,12
Tanque 16	4882	75	SSE.Tmax	2,06	3600	8,93	7.556,32	-	0,32
	4882		SSE.Tmin	2,2	3600	8,86	7.015,24	-	0,46
	4882		CALMA.Tmax	1,86	3600	9,05	8.480,68	-	0,11
	4882		CALMA.Tmin	1,98	3600	8,97	7.902,21	-	0,24
Tanque 17	4647	131	SSE.Tmax	0,617	3600	10,30	29.694,76	-	2,21
	4647		SSE.Tmin	0,653	3600	10,23	27.851,60	-	2,09
	4647		CALMA.Tmax	0,588	3600	10,35	31.354,92	-	2,31
	4647		CALMA.Tmin	0,623	3600	10,29	29.371,80	-	2,19
Tanque 18	2316	45	SSE.Tmax	5,98	3600	7,79	2.426,77	-	2,42
	2316		SSE.Tmin	6,49	3600	7,70	2.212,41	-	2,59
	2316		CALMA.Tmax	5,05	3600	7,99	2.937,53	-	2,06
	2316		CALMA.Tmin	5,38	3600	7,91	2.734,75	-	2,20
Tanque 19	745	51	SSE.Tmax	4,64	3600	8,12	3.370,79	-	1,81
	745		SSE.Tmin	5,02	3600	8,03	3.083,91	-	1,97
	745		CALMA.Tmax	3,99	3600	8,29	3.997,59	-	1,49
	745		CALMA.Tmin	4,24	3600	8,22	3.732,28	-	1,62
Tanque 20	341	18	SSE.Tmax	27,4	3600	6,13	458,06	-	5,50
	341		SSE.Tmin	30,6	3600	6,00	404,31	-	5,73
	341		CALMA.Tmax	22	3600	6,38	587,00	-	5,04
	341		CALMA.Tmin	23,7	3600	6,29	539,65	-	5,19
Tanque 22	10885	90	SSE.Tmax	1,39	3600	9,21	10.042,52	-	0,21
	10885		SSE.Tmin	1,48	3600	9,14	9.355,22	-	0,08
	10885		CALMA.Tmax	1,28	3600	9,31	11.023,06	-	0,38
	10885		CALMA.Tmin	1,36	3600	9,24	10.293,21	-	0,25
Tanque 23	11524	136	SSE.Tmax	0,569	3600	10,21	27.087,66	-	2,04
	11524		SSE.Tmin	0,602	3600	10,14	25.415,83	-	1,92
	11524		CALMA.Tmax	0,544	3600	10,26	28.498,47	-	2,13
	11524		CALMA.Tmin	0,576	3600	10,19	26.715,97	-	2,01
Tanque 24	11341	179	SSE.Tmax	0,314	3600	10,88	53.288,98	-	3,29
	11341		SSE.Tmin	0,331	3600	10,82	50.206,77	-	3,18
	11341		CALMA.Tmax	0,305	3600	10,92	55.069,25	-	3,35
	11341		CALMA.Tmin	0,324	3600	10,85	51.434,21	-	3,22
Tanque 25	11411	149	SSE.Tmax	0,467	3600	10,43	33.964,80	-	2,46
	11411		SSE.Tmin	0,493	3600	10,37	31.947,74	-	2,34
	11411		CALMA.Tmax	0,449	3600	10,48	35.507,39	-	2,54
	11411		CALMA.Tmin	0,476	3600	10,41	33.240,02	-	2,42
Tanque 26	11608	129	SSE.Tmax	0,638	3600	10,08	23.748,05	-	1,80
	11608		SSE.Tmin	0,675	3600	10,01	22.282,41	-	1,68
	11608		CALMA.Tmax	0,608	3600	10,13	25.076,35	-	1,90
	11608		CALMA.Tmin	0,644	3600	10,06	23.498,19	-	1,78
Tanque 30	10914	238	SSE.Tmax	0,17	3600	11,59	107.821,77	-	4,59
	10914		SSE.Tmin	0,179	3600	11,53	101.716,13	-	4,48
	10914		CALMA.Tmax	0,167	3600	11,61	110.013,03	-	4,63
	10914		CALMA.Tmin	0,178	3600	11,54	102.362,09	-	4,50
Tanque 38	10919	221	SSE.Tmax	0,199	3600	11,41	90.230,18	-	4,26
	10919		SSE.Tmin	0,21	3600	11,35	84.907,88	-	4,15
	10919		CALMA.Tmax	0,196	3600	11,43	91.792,34	-	4,29
	10919		CALMA.Tmin	0,208	3600	11,36	85.831,02	-	4,17
Tanque 74	1186	38	SSE.Tmax	8,31	3600	7,45	1.724,41	-	3,05
	1186		SSE.Tmin	9,08	3600	7,35	1.560,10	-	3,23
	1186		CALMA.Tmax	6,87	3600	7,67	2.138,10	-	2,65
	1186		CALMA.Tmin	7,34	3600	7,59	1.984,05	-	2,79

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 22								
U/P secundaria afectada	Volumen (m3)	Distancia entre U/P (m)	Condición meteorológica (pool fire)	Intensidad de la radiación térmica (kw/m2)	Tiempo accidente (s)	ln(ttf)	tff (s)	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)
				Pool fire	Pool fire	Pool fire	Pool fire	Intensidad de la radiación (Pool fire)
Tanque 1	8542	221	SW.Tmax	0,778	3600	9,93	20.595,90	- 1,53
	8542		SW.Tmin	0,825	3600	9,87	19.275,02	- 1,41
	8542		CALMA.Tmax	0,778	3600	9,93	20.595,90	- 1,53
	8542		CALMA.Tmin	0,825	3600	9,87	19.275,02	- 1,41
Tanque 4	11334	206	SW.Tmax	0,903	3600	9,69	16.155,55	- 1,09
	11334		SW.Tmin	0,957	3600	9,62	15.129,29	- 0,96
	11334		CALMA.Tmax	0,903	3600	9,69	16.155,55	- 1,09
	11334		CALMA.Tmin	0,957	3600	9,62	15.129,29	- 0,96
Tanque 13	10653	53	SW.Tmax	13,8	3600	6,63	755,22	- 4,57
	10653		SW.Tmin	14,7	3600	6,56	703,18	- 4,70
	10653		CALMA.Tmax	13,8	3600	6,63	755,22	- 4,57
	10653		CALMA.Tmin	14,7	3600	6,56	703,18	- 4,70
Tanque 16	4882	110	SW.Tmax	3,36	3600	8,38	4.347,27	- 1,34
	4882		SW.Tmin	3,56	3600	8,31	4.072,32	- 1,46
	4882		CALMA.Tmax	3,36	3600	8,38	4.347,27	- 1,34
	4882		CALMA.Tmin	3,56	3600	8,31	4.072,32	- 1,46
Tanque 17	4647	134	SW.Tmax	2,23	3600	8,85	6.952,13	- 0,47
	4647		SW.Tmin	2,37	3600	8,78	6.489,88	- 0,60
	4647		CALMA.Tmax	2,23	3600	8,85	6.952,13	- 0,47
	4647		CALMA.Tmin	2,37	3600	8,78	6.489,88	- 0,60
Tanque 18	2316	129	SW.Tmax	2,42	3600	8,82	6.745,12	- 0,53
	2316		SW.Tmin	2,56	3600	8,75	6.329,80	- 0,65
	2316		CALMA.Tmax	2,42	3600	8,82	6.745,12	- 0,53
	2316		CALMA.Tmin	2,56	3600	8,75	6.329,80	- 0,65
Tanque 19	745	143	SW.Tmax	1,95	3600	9,10	8.977,56	- 0,00
	745		SW.Tmin	2,07	3600	9,04	8.391,72	- 0,12
	745		CALMA.Tmax	1,95	3600	9,10	8.977,56	- 0,00
	745		CALMA.Tmin	2,07	3600	9,04	8.391,72	- 0,12
Tanque 20	341	108	SW.Tmax	3,49	3600	8,46	4.700,93	- 1,19
	341		SW.Tmin	3,7	3600	8,39	4.400,57	- 1,32
	341		CALMA.Tmax	3,49	3600	8,46	4.700,93	- 1,19
	341		CALMA.Tmin	3,7	3600	8,39	4.400,57	- 1,32
Tanque 21	1068	90	SW.Tmax	5,05	3600	8,02	3.036,95	- 2,00
	1068		SW.Tmin	5,36	3600	7,95	2.839,23	- 2,13
	1068		CALMA.Tmax	5,05	3600	8,02	3.036,95	- 2,00
	1068		CALMA.Tmin	5,36	3600	7,95	2.839,23	- 2,13
Tanque 23	11524	51	SW.Tmax	14,7	3600	6,53	687,04	- 4,75
	11524		SW.Tmin	15,8	3600	6,45	633,24	- 4,90
	11524		CALMA.Tmax	14,7	3600	6,53	687,04	- 4,75
	11524		CALMA.Tmin	15,8	3600	6,45	633,24	- 4,90
Tanque 24	11341	86	SW.Tmax	5,53	3600	7,64	2.083,96	- 2,70
	11341		SW.Tmin	5,88	3600	7,57	1.944,34	- 2,83
	11341		CALMA.Tmax	5,53	3600	7,64	2.083,96	- 2,70
	11341		CALMA.Tmin	5,88	3600	7,57	1.944,34	- 2,83
Tanque 25	11411	78	SW.Tmax	6,72	3600	7,42	1.668,90	- 3,11
	11411		SW.Tmin	7,14	3600	7,35	1.558,40	- 3,23
	11411		CALMA.Tmax	6,72	3600	7,42	1.668,90	- 3,11
	11411		CALMA.Tmin	7,14	3600	7,35	1.558,40	- 3,23
Tanque 26	11608	89	SW.Tmax	5,17	3600	7,71	2.232,70	- 2,57
	11608		SW.Tmin	5,49	3600	7,64	2.086,21	- 2,70
	11608		CALMA.Tmax	5,17	3600	7,71	2.232,70	- 2,57
	11608		CALMA.Tmin	5,49	3600	7,64	2.086,21	- 2,70
Tanque 30	10914	211	SW.Tmax	0,859	3600	9,76	17.286,28	- 1,21
	10914		SW.Tmin	0,91	3600	9,69	16.195,60	- 1,09
	10914		CALMA.Tmax	0,859	3600	9,76	17.286,28	- 1,21
	10914		CALMA.Tmin	0,91	3600	9,69	16.195,60	- 1,09
Tanque 38	10919	169	SW.Tmax	1,37	3600	9,23	10.199,09	- 0,24
	10919		SW.Tmin	1,45	3600	9,17	9.565,55	- 0,12
	10919		CALMA.Tmax	1,37	3600	9,23	10.199,09	- 0,24
	10919		CALMA.Tmin	1,45	3600	9,17	9.565,55	- 0,12
Tanque 74	1186	92	SW.Tmax	4,83	3600	8,07	3.183,68	- 1,91
	1186		SW.Tmin	5,13	3600	8,00	2.974,11	- 2,04
	1186		CALMA.Tmax	4,83	3600	8,07	3.183,68	- 1,91
	1186		CALMA.Tmin	5,13	3600	8,00	2.974,11	- 2,04

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 23								
U/P secundaria afectada	Volumen (m3)	Distancia entre U/P (m)	Condición meteorológica (pool fire)	Intensidad de la radiación térmica (kw/m2)	Tiempo accidente (s)	ln(ttf)	tff (s)	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)
				Pool fire	Pool fire	Pool fire	Pool fire	Intensidad de la radiación (Pool fire)
Tanque 1	8542	271	W.Tmax	0,505	3600	10,42	33.563,60	- 2,44
	8542		W.Tmin	0,535	3600	10,36	31.444,74	- 2,32
	8542		CALMA.Tmax	0,505	3600	10,42	33.563,60	- 2,44
	8542		CALMA.Tmin	0,535	3600	10,36	31.444,74	- 2,32
Tanque 4	11334	260	W.Tmax	0,551	3600	10,25	28.232,39	- 2,12
	11334		W.Tmin	0,584	3600	10,18	26.436,41	- 1,99
	11334		CALMA.Tmax	0,551	3600	10,25	28.232,39	- 2,12
	11334		CALMA.Tmin	0,584	3600	10,18	26.436,41	- 1,99
Tanque 13	10653	105	W.Tmax	3,7	3600	8,11	3.342,48	- 1,82
	10653		W.Tmin	3,92	3600	8,05	3.131,29	- 1,95
	10653		CALMA.Tmax	3,7	3600	8,11	3.342,48	- 1,82
	10653		CALMA.Tmin	3,92	3600	8,05	3.131,29	- 1,95
Tanque 16	4882	161	W.Tmax	1,52	3600	9,27	10.653,61	- 0,32
	4882		W.Tmin	1,61	3600	9,21	9.983,13	- 0,20
	4882		CALMA.Tmax	1,52	3600	9,27	10.653,61	- 0,32
	4882		CALMA.Tmin	1,61	3600	9,21	9.983,13	- 0,20
Tanque 17	4647	181	W.Tmax	1,19	3600	9,56	14.136,24	- 0,84
	4647		W.Tmin	1,26	3600	9,49	13.252,06	- 0,72
	4647		CALMA.Tmax	1,19	3600	9,56	14.136,24	- 0,84
	4647		CALMA.Tmin	1,26	3600	9,49	13.252,06	- 0,72
Tanque 18	2316	177	W.Tmax	1,25	3600	9,56	14.229,61	- 0,85
	2316		W.Tmin	1,32	3600	9,50	13.379,89	- 0,74
	2316		CALMA.Tmax	1,25	3600	9,56	14.229,61	- 0,85
	2316		CALMA.Tmin	1,32	3600	9,50	13.379,89	- 0,74
Tanque 19	745	188	W.Tmax	1,1	3600	9,75	17.144,46	- 1,19
	745		W.Tmin	1,16	3600	9,69	16.145,82	- 1,08
	745		CALMA.Tmax	1,1	3600	9,75	17.144,46	- 1,19
	745		CALMA.Tmin	1,16	3600	9,69	16.145,82	- 1,08
Tanque 20	341	153	W.Tmax	1,69	3600	9,27	10.667,56	- 0,32
	341		W.Tmin	1,79	3600	9,21	9.996,62	- 0,20
	341		CALMA.Tmax	1,69	3600	9,27	10.667,56	- 0,32
	341		CALMA.Tmin	1,79	3600	9,21	9.996,62	- 0,20
Tanque 21	1068	136	W.Tmax	2,17	3600	8,97	7.887,82	- 0,24
	1068		W.Tmin	2,3	3600	8,91	7.385,91	- 0,36
	1068		CALMA.Tmax	2,17	3600	8,97	7.887,82	- 0,24
	1068		CALMA.Tmin	2,3	3600	8,91	7.385,91	- 0,36
Tanque 22	10885	51	W.Tmax	14,7	3600	6,55	698,85	- 4,72
	10885		W.Tmin	15,8	3600	6,47	644,12	- 4,87
	10885		CALMA.Tmax	14,7	3600	6,55	698,85	- 4,72
	10885		CALMA.Tmin	15,8	3600	6,47	644,12	- 4,87
Tanque 24	11341	68	W.Tmax	8,75	3600	7,12	1.240,79	- 3,66
	11341		W.Tmin	9,33	3600	7,05	1.153,99	- 3,79
	11341		CALMA.Tmax	8,75	3600	7,12	1.240,79	- 3,66
	11341		CALMA.Tmin	9,33	3600	7,05	1.153,99	- 3,79
Tanque 25	11411	86	W.Tmax	5,53	3600	7,64	2.080,07	- 2,70
	11411		W.Tmin	5,88	3600	7,57	1.940,71	- 2,83
	11411		CALMA.Tmax	5,53	3600	7,64	2.080,07	- 2,70
	11411		CALMA.Tmin	5,88	3600	7,57	1.940,71	- 2,83
Tanque 26	11608	130	W.Tmax	2,38	3600	8,59	5.364,68	- 0,95
	11608		W.Tmin	2,52	3600	8,52	5.029,13	- 1,07
	11608		CALMA.Tmax	2,38	3600	8,59	5.364,68	- 0,95
	11608		CALMA.Tmin	2,52	3600	8,52	5.029,13	- 1,07
Tanque 30	10914	249	W.Tmax	0,604	3600	10,16	25.736,06	- 1,95
	10914		W.Tmin	1,9	3600	8,86	7.048,91	- 0,45
	10914		CALMA.Tmax	0,604	3600	10,16	25.736,06	- 1,95
	10914		CALMA.Tmin	1,9	3600	8,86	7.048,91	- 0,45
Tanque 38	10919	194	W.Tmax	1,03	3600	9,55	14.078,29	- 0,83
	10919		W.Tmin	1,09	3600	9,49	13.205,77	- 0,71
	10919		CALMA.Tmax	1,03	3600	9,55	14.078,29	- 0,83
	10919		CALMA.Tmin	1,09	3600	9,49	13.205,77	- 0,71
Tanque 74	1186	136	W.Tmax	2,17	3600	8,97	7.863,03	- 0,24
	1186		W.Tmin	2,3	3600	8,90	7.362,70	- 0,37
	1186		CALMA.Tmax	2,17	3600	8,97	7.863,03	- 0,24
	1186		CALMA.Tmin	2,3	3600	8,90	7.362,70	- 0,37

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 24								
U/P secundaria afectada	Volumen (m3)	Distancia entre U/P (m)	Condición meteorológica (pool fire)	Intensidad de la radiación térmica (kw/m2)	Tiempo accidente (s)	ln(ttf)	tff (s)	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)
				Pool fire	Pool fire	Pool fire	Pool fire	Intensidad de la radiación (Pool fire)
Tanque 1	8542	260	WNW.Tmax	0,551	3600	10,32	30.414,90	- 2,25
	8542		WNW.Tmin	0,584	3600	10,26	28.480,08	- 2,13
	8542		CALMA.Tmax	0,551	3600	10,32	30.414,90	- 2,25
	8542		CALMA.Tmin	0,584	3600	10,26	28.480,08	- 2,13
Tanque 4	11334	270	WNW.Tmax	0,508	3600	10,34	30.947,32	- 2,29
	11334		WNW.Tmin	0,539	3600	10,27	28.943,68	- 2,16
	11334		CALMA.Tmax	0,508	3600	10,34	30.947,32	- 2,29
	11334		CALMA.Tmin	0,539	3600	10,27	28.943,68	- 2,16
Tanque 13	10653	124	WNW.Tmax	2,61	3600	8,51	4.958,30	- 1,10
	10653		WNW.Tmin	2,77	3600	8,44	4.635,91	- 1,22
	10653		CALMA.Tmax	2,61	3600	8,51	4.958,30	- 1,10
	10653		CALMA.Tmin	2,77	3600	8,44	4.635,91	- 1,22
Tanque 16	4882	175	WNW.Tmax	1,27	3600	9,48	13.052,15	- 0,69
	4882		WNW.Tmin	1,35	3600	9,41	12.181,56	- 0,56
	4882		CALMA.Tmax	1,27	3600	9,48	13.052,15	- 0,69
	4882		CALMA.Tmin	1,35	3600	9,41	12.181,56	- 0,56
Tanque 17	4647	172	WNW.Tmax	1,32	3600	9,44	12.573,42	- 0,62
	4647		WNW.Tmin	1,4	3600	9,37	11.764,61	- 0,50
	4647		CALMA.Tmax	1,32	3600	9,44	12.573,42	- 0,62
	4647		CALMA.Tmin	1,4	3600	9,37	11.764,61	- 0,50
Tanque 18	2316	210	WNW.Tmax	0,866	3600	9,98	21.542,99	- 1,62
	2316		WNW.Tmin	0,918	3600	9,91	20.169,21	- 1,50
	2316		CALMA.Tmax	0,866	3600	9,98	21.542,99	- 1,62
	2316		CALMA.Tmin	0,918	3600	9,91	20.169,21	- 1,50
Tanque 19	745	228	WNW.Tmax	0,728	3600	10,22	27.333,11	- 2,06
	745		WNW.Tmin	0,771	3600	10,15	25.616,87	- 1,94
	745		CALMA.Tmax	0,728	3600	10,22	27.333,11	- 2,06
	745		CALMA.Tmin	0,771	3600	10,15	25.616,87	- 1,94
Tanque 20	341	187	WNW.Tmax	1,1	3600	9,76	17.330,18	- 1,21
	341		WNW.Tmin	1,17	3600	9,69	16.163,18	- 1,09
	341		CALMA.Tmax	1,1	3600	9,76	17.330,18	- 1,21
	341		CALMA.Tmin	1,17	3600	9,69	16.163,18	- 1,09
Tanque 21	1068	179	WNW.Tmax	1,21	3600	9,63	15.261,91	- 0,98
	1068		WNW.Tmin	1,29	3600	9,56	14.196,78	- 0,85
	1068		CALMA.Tmax	1,21	3600	9,63	15.261,91	- 0,98
	1068		CALMA.Tmin	1,29	3600	9,56	14.196,78	- 0,85
Tanque 22	10885	86	WNW.Tmax	5,48	3600	7,66	2.131,22	- 2,66
	10885		WNW.Tmin	5,83	3600	7,59	1.987,21	- 2,79
	10885		CALMA.Tmax	5,48	3600	7,66	2.131,22	- 2,66
	10885		CALMA.Tmin	5,83	3600	7,59	1.987,21	- 2,79
Tanque 23	11524	68	WNW.Tmax	8,63	3600	7,13	1.254,17	- 3,64
	11524		WNW.Tmin	9,21	3600	7,06	1.165,29	- 3,77
	11524		CALMA.Tmax	8,63	3600	7,13	1.254,17	- 3,64
	11524		CALMA.Tmin	9,21	3600	7,06	1.165,29	- 3,77
Tanque 25	11411	54	WNW.Tmax	13,1	3600	6,67	784,95	- 4,50
	11411		WNW.Tmin	14	3600	6,59	728,17	- 4,64
	11411		CALMA.Tmax	13,1	3600	6,67	784,95	- 4,50
	11411		CALMA.Tmin	14	3600	6,59	728,17	- 4,64
Tanque 26	11608	110	WNW.Tmax	3,34	3600	8,20	3.657,98	- 1,66
	11608		WNW.Tmin	3,54	3600	8,14	3.425,32	- 1,78
	11608		CALMA.Tmax	3,34	3600	8,20	3.657,98	- 1,66
	11608		CALMA.Tmin	3,54	3600	8,14	3.425,32	- 1,78
Tanque 30	10914	210	WNW.Tmax	0,866	3600	9,75	17.128,47	- 1,19
	10914		WNW.Tmin	0,918	3600	9,68	16.036,20	- 1,07
	10914		CALMA.Tmax	0,866	3600	9,75	17.128,47	- 1,19
	10914		CALMA.Tmin	0,918	3600	9,68	16.036,20	- 1,07
Tanque 38	10919	145	WNW.Tmax	1,89	3600	8,87	7.090,13	- 0,44
	10919		WNW.Tmin	2	3600	8,80	6.651,08	- 0,55
	10919		CALMA.Tmax	1,89	3600	8,87	7.090,13	- 0,44
	10919		CALMA.Tmin	2	3600	8,80	6.651,08	- 0,55
Tanque 74	1186	177	WNW.Tmax	1,24	3600	9,60	14.798,68	- 0,92
	1186		WNW.Tmin	1,32	3600	9,53	13.789,26	- 0,79
	1186		CALMA.Tmax	1,24	3600	9,60	14.798,68	- 0,92
	1186		CALMA.Tmin	1,32	3600	9,53	13.789,26	- 0,79

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 25								
U/P secundaria afectada	Volumen (m3)	Distancia entre U/P (m)	Condición meteorológica (pool fire)	Intensidad de la radiación térmica (kw/m2)	Tiempo accidente (s)	In(ttf)	tff (s)	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)
				Pool fire	Pool fire	Pool fire	Pool fire	Intensidad de la radiación (Pool fire)
Tanque 1	8542	210	NW.Tmax	0,905	3600	9,76	17.361,00	- 1,22
	8542		NW.Tmin	0,959	3600	9,70	16.260,46	- 1,10
	8542		CALMA.Tmax	0,866	3600	9,81	18.247,04	- 1,31
	8542		CALMA.Tmin	0,918	3600	9,75	17.083,45	- 1,19
Tanque 4	11334	218	NW.Tmax	0,834	3600	9,78	17.673,86	- 1,25
	11334		NW.Tmin	0,884	3600	9,71	16.548,47	- 1,13
	11334		CALMA.Tmax	0,8	3600	9,83	18.524,96	- 1,34
	11334		CALMA.Tmin	0,848	3600	9,76	17.344,50	- 1,22
Tanque 13	10653	85	NW.Tmax	6,43	3600	7,49	1.790,02	2,98
	10653		NW.Tmin	6,64	3600	7,45	1.726,18	3,05
	10653		CALMA.Tmax	5,61	3600	7,64	2.088,38	2,69
	10653		CALMA.Tmin	5,96	3600	7,58	1.950,33	2,82
Tanque 16	4882	123	NW.Tmax	2,91	3600	8,54	5.114,24	1,04
	4882		NW.Tmin	3,11	3600	8,46	4.744,18	1,18
	4882		CALMA.Tmax	2,66	3600	8,64	5.660,62	0,85
	4882		CALMA.Tmin	2,82	3600	8,58	5.299,06	0,97
Tanque 17	4647	119	NW.Tmax	3,13	3600	8,46	4.739,55	1,18
	4647		NW.Tmin	3,34	3600	8,39	4.404,22	1,32
	4647		CALMA.Tmax	2,84	3600	8,57	5.289,96	0,98
	4647		CALMA.Tmin	3,02	3600	8,50	4.935,08	1,11
Tanque 18	2316	170	NW.Tmax	1,44	3600	9,40	12.126,95	- 0,56
	2316		NW.Tmin	1,53	3600	9,33	11.324,00	- 0,43
	2316		CALMA.Tmax	1,35	3600	9,48	13.044,40	- 0,69
	2316		CALMA.Tmin	1,43	3600	9,41	12.222,82	- 0,57
Tanque 19	745	194	NW.Tmax	1,08	3600	9,77	17.503,65	- 1,23
	745		NW.Tmin	1,14	3600	9,71	16.466,26	- 1,12
	745		CALMA.Tmax	1,02	3600	9,83	18.671,51	- 1,35
	745		CALMA.Tmin	1,09	3600	9,76	17.322,30	- 1,21
Tanque 20	341	159	NW.Tmax	1,66	3600	9,30	10.885,66	- 0,36
	341		NW.Tmin	1,77	3600	9,22	10.124,35	- 0,22
	341		CALMA.Tmax	1,56	3600	9,37	11.677,40	- 0,49
	341		CALMA.Tmin	1,65	3600	9,30	10.960,24	- 0,37
Tanque 21	1068	149	NW.Tmax	1,92	3600	9,11	9.057,87	- 0,02
	1068		NW.Tmin	2,04	3600	9,04	8.458,13	0,11
	1068		CALMA.Tmax	1,78	3600	9,20	9.866,92	- 0,17
	1068		CALMA.Tmin	1,89	3600	9,13	9.220,50	- 0,05
Tanque 22	10885	68	NW.Tmax	10,2	3600	6,96	1.056,16	3,95
	10885		NW.Tmin	11,1	3600	6,87	959,92	4,13
	10885		CALMA.Tmax	8,63	3600	7,15	1.275,73	3,60
	10885		CALMA.Tmin	9,21	3600	7,08	1.185,32	3,74
Tanque 23	11524	86	NW.Tmax	6,27	3600	7,50	1.799,43	2,97
	11524		NW.Tmin	6,77	3600	7,41	1.650,00	3,13
	11524		CALMA.Tmax	5,48	3600	7,65	2.095,20	2,69
	11524		CALMA.Tmin	5,83	3600	7,58	1.953,63	2,82
Tanque 24	11341	54	NW.Tmax	15,8	3600	6,46	636,33	4,89
	11341		NW.Tmin	17,4	3600	6,35	570,62	5,09
	11341		CALMA.Tmax	13,1	3600	6,67	786,41	4,50
	11341		CALMA.Tmin	14	3600	6,59	729,53	4,64
Tanque 26	11608	57	NW.Tmax	14,3	3600	6,56	707,21	4,69
	11608		NW.Tmin	15,7	3600	6,46	636,37	4,89
	11608		CALMA.Tmax	11,9	3600	6,77	870,38	4,31
	11608		CALMA.Tmin	12,7	3600	6,70	808,68	4,45
Tanque 30	10914	165	NW.Tmax	1,53	3600	9,11	9.003,52	- 0,01
	10914		NW.Tmin	1,63	3600	9,03	8.381,89	0,13
	10914		CALMA.Tmax	1,44	3600	9,17	9.641,93	- 0,13
	10914		CALMA.Tmin	1,53	3600	9,11	9.003,52	- 0,01
Tanque 38	10919	110	NW.Tmax	3,71	3600	8,10	3.308,75	1,84
	10919		NW.Tmin	3,97	3600	8,03	3.064,94	1,98
	10919		CALMA.Tmax	3,34	3600	8,22	3.725,82	1,62
	10919		CALMA.Tmin	3,54	3600	8,16	3.488,85	1,75
Tanque 74	1186	146	NW.Tmax	2	3600	9,06	8.622,35	0,07
	1186		NW.Tmin	2,13	3600	8,99	8.030,09	0,21
	1186		CALMA.Tmax	1,86	3600	9,14	9.359,23	- 0,08
	1186		CALMA.Tmin	1,97	3600	9,08	8.770,87	0,04

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 26								
U/P secundaria afectada	Volumen (m3)	Distancia entre U/P (m)	Condición meteorológica (pool fire)	Intensidad de la radiación térmica (kw/m2)	Tiempo accidente (s)	In(ttf)	tff (s)	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)
				Pool fire	Pool fire	Pool fire	Pool fire	Intensidad de la radiación (Pool fire)
Tanque 1	8542	150	ENE.Tmax	1,92	3600	8,91	7.420,91	0,35
	8542		ENE.Tmin	2,02	3600	8,85	7.007,14	0,46
	8542		CALMA.Tmax	1,76	3600	9,01	8.187,63	0,17
	8542		CALMA.Tmin	1,86	3600	8,95	7.691,98	0,29
Tanque 4	11334	164	ENE.Tmax	1,56	3600	9,07	8.710,00	0,06
	11334		ENE.Tmin	1,64	3600	9,02	8.231,43	0,16
	11334		CALMA.Tmax	1,46	3600	9,15	9.387,08	0,08
	11334		CALMA.Tmin	1,55	3600	9,08	8.773,53	0,04
Tanque 13	10653	67	ENE.Tmax	12,9	3600	6,70	815,02	4,43
	10653		ENE.Tmin	13,8	3600	6,63	755,22	4,57
	10653		CALMA.Tmax	8,88	3600	7,13	1.242,88	3,65
	10653		CALMA.Tmin	9,47	3600	7,05	1.155,74	3,79
Tanque 16	4882	81	ENE.Tmax	8,32	3600	7,35	1.560,42	3,23
	4882		ENE.Tmin	8,79	3600	7,29	1.466,47	3,35
	4882		CALMA.Tmax	6,17	3600	7,69	2.187,55	2,61
	4882		CALMA.Tmin	6,56	3600	7,62	2.041,17	2,74
Tanque 17	4647	62	ENE.Tmax	15,4	3600	6,66	783,08	4,51
	4647		ENE.Tmin	16,5	3600	6,59	724,34	4,65
	4647		CALMA.Tmax	10,2	3600	7,13	1.247,34	3,65
	4647		CALMA.Tmin	10,9	3600	7,05	1.157,20	3,78
Tanque 18	2316	141	ENE.Tmax	2,22	3600	8,91	7.435,71	0,35
	2316		ENE.Tmin	2,33	3600	8,86	7.040,27	0,45
	2316		CALMA.Tmax	2	3600	9,03	8.366,37	0,13
	2316		CALMA.Tmin	2,12	3600	8,97	7.833,24	0,25
Tanque 19	745	166	ENE.Tmax	1,52	3600	9,38	11.896,37	0,52
	745		ENE.Tmin	1,59	3600	9,33	11.306,26	0,43
	745		CALMA.Tmax	1,42	3600	9,46	12.847,30	0,66
	745		CALMA.Tmin	1,51	3600	9,39	11.985,43	0,53
Tanque 20	341	135	ENE.Tmax	2,46	3600	8,85	6.979,43	0,46
	341		ENE.Tmin	2,58	3600	8,80	6.613,73	0,56
	341		CALMA.Tmax	2,19	3600	8,98	7.959,30	0,22
	341		CALMA.Tmin	2,32	3600	8,92	7.457,19	0,34
Tanque 21	1068	129	ENE.Tmax	2,74	3600	8,71	6.060,36	0,73
	1068		ENE.Tmin	2,88	3600	8,65	5.728,53	0,83
	1068		CALMA.Tmax	2,41	3600	8,85	7.006,11	0,46
	1068		CALMA.Tmin	2,55	3600	8,79	6.573,03	0,58
Tanque 22	10885	89	ENE.Tmax	6,64	3600	7,45	1.715,54	3,06
	10885		ENE.Tmin	7,01	3600	7,39	1.613,57	3,17
	10885		CALMA.Tmax	5,12	3600	7,74	2.301,31	2,51
	10885		CALMA.Tmin	5,44	3600	7,67	2.148,93	2,64
Tanque 23	11524	130	ENE.Tmax	2,69	3600	8,45	4.681,97	1,20
	11524		ENE.Tmin	2,83	3600	8,39	4.421,09	1,31
	11524		CALMA.Tmax	2,37	3600	8,59	5.402,35	0,94
	11524		CALMA.Tmin	2,51	3600	8,53	5.063,11	1,06
Tanque 24	11341	110	ENE.Tmax	4,01	3600	8,01	2.996,50	2,03
	11341		ENE.Tmin	4,21	3600	7,95	2.836,15	2,13
	11341		CALMA.Tmax	3,34	3600	8,21	3.684,13	1,65
	11341		CALMA.Tmin	3,54	3600	8,15	3.449,80	1,77
Tanque 25	11411	57	ENE.Tmax	18,5	3600	6,28	531,44	5,22
	11411		ENE.Tmin	19,8	3600	6,20	492,18	5,36
	11411		CALMA.Tmax	11,9	3600	6,77	874,96	4,30
	11411		CALMA.Tmin	12,7	3600	6,70	812,94	4,44
Tanque 30	10914	122	ENE.Tmax	3,13	3600	8,30	4.010,04	1,49
	10914		ENE.Tmin	3,29	3600	8,24	3.790,38	1,59
	10914		CALMA.Tmax	2,7	3600	8,46	4.738,85	1,18
	10914		CALMA.Tmin	2,86	3600	8,40	4.440,38	1,30
Tanque 38	10919	91	ENE.Tmax	6,3	3600	7,51	1.818,87	2,95
	10919		ENE.Tmin	6,64	3600	7,45	1.713,98	3,06
	10919		CALMA.Tmax	4,89	3600	7,79	2.421,79	2,42
	10919		CALMA.Tmin	5,2	3600	7,72	2.259,29	2,55
Tanque 74	1186	130	ENE.Tmax	2,69	3600	8,73	6.168,36	0,69
	1186		ENE.Tmin	2,83	3600	8,67	5.824,66	0,80
	1186		CALMA.Tmax	2,37	3600	8,87	7.117,44	0,43
	1186		CALMA.Tmin	2,51	3600	8,81	6.670,50	0,55

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 30								
U/P secundaria afectada	Volumen (m3)	Distancia entre U/P (m)	Condición meteorológica (pool fire)	Intensidad de la radiación térmica (kw/m2)	Tiempo accidente (s)	ln(ttf)	tff (s)	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)
				Pool fire	Pool fire	Pool fire	Pool fire	Intensidad de la radiación (Pool fire)
Tanque 1	8542	107	NE.Tmax	13,6	3600	6,70	812,25	4,44
	8542		NE.Tmin	14,6	3600	6,62	749,67	4,59
	8542		CALMA.Tmax	13,6	3600	6,70	812,25	4,44
	8542		CALMA.Tmin	14,6	3600	6,62	749,67	4,59
Tanque 4	11334	176	NE.Tmax	4,99	3600	7,76	2.340,97	2,48
	11334		NE.Tmin	5,3	3600	7,69	2.186,84	2,61
	11334		CALMA.Tmax	4,99	3600	7,76	2.340,97	2,48
	11334		CALMA.Tmin	5,3	3600	7,69	2.186,84	2,61
Tanque 13	10653	178	NE.Tmax	4,87	3600	7,80	2.450,36	2,40
	10653		NE.Tmin	5,17	3600	7,74	2.290,30	2,52
	10653		CALMA.Tmax	4,87	3600	7,80	2.450,36	2,40
	10653		CALMA.Tmin	5,17	3600	7,74	2.290,30	2,52
Tanque 16	4882	161	NE.Tmax	6,01	3600	7,72	2.253,47	2,55
	4882		NE.Tmin	6,39	3600	7,65	2.102,64	2,68
	4882		CALMA.Tmax	6,01	3600	7,72	2.253,47	2,55
	4882		CALMA.Tmin	6,39	3600	7,65	2.102,64	2,68
Tanque 17	4647	101	NE.Tmax	15,2	3600	6,68	794,73	4,48
	4647		NE.Tmin	16,3	3600	6,60	734,40	4,62
	4647		CALMA.Tmax	15,2	3600	6,68	794,73	4,48
	4647		CALMA.Tmin	16,3	3600	6,60	734,40	4,62
Tanque 18	2316	221	NE.Tmax	3,09	3600	8,54	5.117,39	1,04
	2316		NE.Tmin	3,28	3600	8,47	4.783,70	1,16
	2316		CALMA.Tmax	3,09	3600	8,54	5.117,39	1,04
	2316		CALMA.Tmin	3,28	3600	8,47	4.783,70	1,16
Tanque 19	745	250	NE.Tmax	2,38	3600	8,88	7.167,46	0,42
	745		NE.Tmin	2,52	3600	8,81	6.719,16	0,54
	745		CALMA.Tmax	2,38	3600	8,88	7.167,46	0,42
	745		CALMA.Tmin	2,52	3600	8,81	6.719,16	0,54
Tanque 20	341	231	NE.Tmax	2,81	3600	8,70	6.005,36	0,74
	341		NE.Tmin	2,98	3600	8,63	5.619,69	0,87
	341		CALMA.Tmax	2,81	3600	8,70	6.005,36	0,74
	341		CALMA.Tmin	2,98	3600	8,63	5.619,69	0,87
Tanque 21	1068	238	NE.Tmax	2,64	3600	8,75	6.320,39	0,65
	1068		NE.Tmin	2,8	3600	8,69	5.913,82	0,77
	1068		CALMA.Tmax	2,64	3600	8,75	6.320,39	0,65
	1068		CALMA.Tmin	2,8	3600	8,69	5.913,82	0,77
Tanque 22	10885	211	NE.Tmax	3,41	3600	8,20	3.642,82	1,67
	10885		NE.Tmin	3,61	3600	8,14	3.415,60	1,78
	10885		CALMA.Tmax	3,41	3600	8,20	3.642,82	1,67
	10885		CALMA.Tmin	3,61	3600	8,14	3.415,60	1,78
Tanque 23	11524	249	NE.Tmax	2,4	3600	8,58	5.326,10	0,96
	11524		NE.Tmin	2,54	3600	8,52	4.995,58	1,08
	11524		CALMA.Tmax	2,4	3600	8,58	5.326,10	0,96
	11524		CALMA.Tmin	2,54	3600	8,52	4.995,58	1,08
Tanque 24	11341	210	NE.Tmax	3,44	3600	8,18	3.563,34	1,71
	11341		NE.Tmin	3,65	3600	8,11	3.332,55	1,83
	11341		CALMA.Tmax	3,44	3600	8,18	3.563,34	1,71
	11341		CALMA.Tmin	3,65	3600	8,11	3.332,55	1,83
Tanque 25	11411	165	NE.Tmax	5,71	3600	7,60	2.006,13	2,77
	11411		NE.Tmin	6,07	3600	7,53	1.872,21	2,90
	11411		CALMA.Tmax	5,71	3600	7,60	2.006,13	2,77
	11411		CALMA.Tmin	6,07	3600	7,53	1.872,21	2,90
Tanque 26	11608	122	NE.Tmax	10,6	3600	6,90	991,93	4,07
	11608		NE.Tmin	11,3	3600	6,83	922,78	4,20
	11608		CALMA.Tmax	10,6	3600	6,90	991,93	4,07
	11608		CALMA.Tmin	11,3	3600	6,83	922,78	4,20
Tanque 38	10919	78	NE.Tmax	24,3	3600	5,98	395,66	5,77
	10919		NE.Tmin	26,1	3600	5,90	364,97	5,92
	10919		CALMA.Tmax	24,3	3600	5,98	395,66	5,77
	10919		CALMA.Tmin	26,1	3600	5,90	364,97	5,92
Tanque 74	1186	320	NE.Tmax	1,4	3600	9,47	12.902,23	-
	1186		NE.Tmin	1,49	3600	9,39	12.025,11	-
	1186		CALMA.Tmax	1,4	3600	9,47	12.902,23	-
	1186		CALMA.Tmin	1,49	3600	9,39	12.025,11	-

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 38								
U/P secundaria afectada	Volumen (m3)	Distancia entre U/P (m)	Condición meteorológica (pool fire)	Intensidad de la radiación térmica (kw/m2)	Tiempo accidente (s)	In(ttf)	tff (s)	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)
				Pool fire	Pool fire	Pool fire	Pool fire	Intensidad de la radiación (Pool fire)
Tanque 1	8542	167	N.Tmax	1,91	3600	8,92	7.464,83	0,34
	8542		N.Tmin	2,03	3600	8,85	6.968,15	0,47
	8542		CALMA.Tmax	1,91	3600	8,92	7.464,83	0,34
	8542		CALMA.Tmin	2,03	3600	8,85	6.968,15	0,47
Tanque 4	11334	217	N.Tmax	1,1	3600	9,47	12.926,33	- 0,67
	11334		N.Tmin	1,16	3600	9,41	12.173,39	- 0,56
	11334		CALMA.Tmax	1,1	3600	9,47	12.926,33	- 0,67
	11334		CALMA.Tmin	1,16	3600	9,41	12.173,39	- 0,56
Tanque 13	10653	155	N.Tmax	2,24	3600	8,68	5.893,27	0,78
	10653		N.Tmin	2,37	3600	8,62	5.529,31	0,90
	10653		CALMA.Tmax	2,24	3600	8,68	5.893,27	0,78
	10653		CALMA.Tmin	2,37	3600	8,62	5.529,31	0,90
Tanque 16	4882	161	N.Tmax	2,06	3600	8,93	7.556,32	0,32
	4882		N.Tmin	2,19	3600	8,86	7.051,45	0,45
	4882		CALMA.Tmax	2,06	3600	8,93	7.556,32	0,32
	4882		CALMA.Tmin	2,19	3600	8,86	7.051,45	0,45
Tanque 17	4647	115	N.Tmax	4,15	3600	8,14	3.445,94	1,77
	4647		N.Tmin	4,4	3600	8,08	3.225,53	1,89
	4647		CALMA.Tmax	4,15	3600	8,14	3.445,94	1,77
	4647		CALMA.Tmin	4,4	3600	8,08	3.225,53	1,89
Tanque 18	2316	226	N.Tmax	1,01	3600	9,80	18.105,81	- 1,30
	2316		N.Tmin	1,07	3600	9,74	16.962,80	- 1,18
	2316		CALMA.Tmax	1,01	3600	9,80	18.105,81	- 1,30
	2316		CALMA.Tmin	1,07	3600	9,74	16.962,80	- 1,18
Tanque 19	745	251	N.Tmax	0,807	3600	10,10	24.329,35	- 1,84
	745		N.Tmin	0,855	3600	10,03	22.791,65	- 1,72
	745		CALMA.Tmax	0,807	3600	10,10	24.329,35	- 1,84
	745		CALMA.Tmin	0,855	3600	10,03	22.791,65	- 1,72
Tanque 20	341	226	N.Tmax	1,01	3600	9,86	19.085,07	- 1,39
	341		N.Tmin	1,07	3600	9,79	17.880,24	- 1,27
	341		CALMA.Tmax	1,01	3600	9,86	19.085,07	- 1,39
	341		CALMA.Tmin	1,07	3600	9,79	17.880,24	- 1,27
Tanque 21	1068	221	N.Tmax	1,01	3600	9,84	18.718,59	- 1,36
	1068		N.Tmin	1,07	3600	9,77	17.536,89	- 1,24
	1068		CALMA.Tmax	1,01	3600	9,84	18.718,59	- 1,36
	1068		CALMA.Tmin	1,07	3600	9,77	17.536,89	- 1,24
Tanque 22	10885	169	N.Tmax	1,86	3600	8,89	7.226,03	0,40
	10885		N.Tmin	1,98	3600	8,81	6.733,14	0,53
	10885		CALMA.Tmax	1,86	3600	8,89	7.226,03	0,40
	10885		CALMA.Tmin	1,98	3600	8,81	6.733,14	0,53
Tanque 23	11524	194	N.Tmax	1,39	3600	9,20	9.872,83	- 0,18
	11524		N.Tmin	1,48	3600	9,13	9.197,14	- 0,04
	11524		CALMA.Tmax	1,39	3600	9,20	9.872,83	- 0,18
	11524		CALMA.Tmin	1,48	3600	9,13	9.197,14	- 0,04
Tanque 24	11341	145	N.Tmax	2,57	3600	8,51	4.953,86	1,10
	11341		N.Tmin	2,72	3600	8,44	4.646,28	1,22
	11341		CALMA.Tmax	2,57	3600	8,51	4.953,86	1,10
	11341		CALMA.Tmin	2,72	3600	8,44	4.646,28	1,22
Tanque 25	11411	110	N.Tmax	4,54	3600	7,86	2.599,47	2,29
	11411		N.Tmin	4,82	3600	7,80	2.429,48	2,41
	11411		CALMA.Tmax	4,54	3600	7,86	2.599,47	2,29
	11411		CALMA.Tmin	4,82	3600	7,80	2.429,48	2,41
Tanque 26	11608	91	N.Tmax	6,67	3600	7,42	1.674,22	3,10
	11608		N.Tmin	7,09	3600	7,35	1.562,59	3,23
	11608		CALMA.Tmax	6,67	3600	7,42	1.674,22	3,10
	11608		CALMA.Tmin	7,09	3600	7,35	1.562,59	3,23
Tanque 30	10914	78	N.Tmax	9,01	3600	7,10	1.214,16	3,70
	10914		N.Tmin	9,6	3600	7,03	1.130,18	3,83
	10914		CALMA.Tmax	9,01	3600	7,10	1.214,16	3,70
	10914		CALMA.Tmin	9,6	3600	7,03	1.130,18	3,83
Tanque 74	1186	220	N.Tmax	1,07	3600	9,77	17.481,79	- 1,23
	1186		N.Tmin	1,13	3600	9,71	16.436,56	- 1,12
	1186		CALMA.Tmax	1,07	3600	9,77	17.481,79	- 1,23
	1186		CALMA.Tmin	1,13	3600	9,71	16.436,56	- 1,12

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 74								
U/P secundaria afectada	Volumen (m3)	Distancia entre U/P (m)	Condición meteorológica (pool fire)	Intensidad de la radiación térmica (kw/m2)	Tiempo accidente (s)	In(ttf)	tff (s)	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)
				Pool fire	Pool fire	Pool fire	Pool fire	Intensidad de la radiación (Pool fire)
Tanque 1	8542	196	SW.Tmax	0,252	3600	11,21	73.621,58	- 3,89
	8542		SW.Tmin	0,267	3600	11,14	68.965,20	- 3,77
	8542		CALMA.Tmax	0,252	3600	11,21	73.621,58	- 3,89
	8542		CALMA.Tmin	0,267	3600	11,14	68.965,20	- 3,77
Tanque 4	11334	149	SW.Tmax	0,449	3600	10,48	35.580,39	- 2,54
	11334		SW.Tmin	0,476	3600	10,41	33.308,35	- 2,42
	11334		CALMA.Tmax	0,449	3600	10,48	35.580,39	- 2,54
	11334		CALMA.Tmin	0,476	3600	10,41	33.308,35	- 2,42
Tanque 13	10653	66	SW.Tmax	2,41	3600	8,60	5.425,72	- 0,93
	10653		SW.Tmin	2,56	3600	8,53	5.067,87	- 1,06
	10653		CALMA.Tmax	2,41	3600	8,60	5.425,72	- 0,93
	10653		CALMA.Tmin	2,56	3600	8,53	5.067,87	- 1,06
Tanque 16	4882	107	SW.Tmax	0,898	3600	9,87	19.309,81	- 1,41
	4882		SW.Tmin	0,951	3600	9,80	18.098,23	- 1,29
	4882		CALMA.Tmax	0,898	3600	9,87	19.309,81	- 1,41
	4882		CALMA.Tmin	0,951	3600	9,80	18.098,23	- 1,29
Tanque 17	4647	131	SW.Tmax	0,588	3600	10,35	31.354,92	- 2,31
	4647		SW.Tmin	0,623	3600	10,29	29.371,80	- 2,19
	4647		CALMA.Tmax	0,588	3600	10,35	31.354,92	- 2,31
	4647		CALMA.Tmin	0,623	3600	10,29	29.371,80	- 2,19
Tanque 18	2316	78	SW.Tmax	1,72	3600	9,20	9.920,97	- 0,18
	2316		SW.Tmin	1,82	3600	9,14	9.307,23	- 0,07
	2316		CALMA.Tmax	1,72	3600	9,20	9.920,97	- 0,18
	2316		CALMA.Tmin	1,82	3600	9,14	9.307,23	- 0,07
Tanque 19	745	70	SW.Tmax	2,14	3600	9,00	8.082,21	- 0,19
	745		SW.Tmin	2,27	3600	8,93	7.561,16	- 0,32
	745		CALMA.Tmax	2,14	3600	9,00	8.082,21	- 0,19
	745		CALMA.Tmin	2,27	3600	8,93	7.561,16	- 0,32
Tanque 20	341	52	SW.Tmax	3,84	3600	8,35	4.219,71	- 1,39
	341		SW.Tmin	4,09	3600	8,28	3.929,43	- 1,53
	341		CALMA.Tmax	3,84	3600	8,35	4.219,71	- 1,39
	341		CALMA.Tmin	4,09	3600	8,28	3.929,43	- 1,53
Tanque 21	1068	38	SW.Tmax	6,87	3600	7,67	2.144,84	- 2,64
	1068		SW.Tmin	7,34	3600	7,60	1.990,31	- 2,78
	1068		CALMA.Tmax	6,87	3600	7,67	2.144,84	- 2,64
	1068		CALMA.Tmin	7,34	3600	7,60	1.990,31	- 2,78
Tanque 22	10885	92	SW.Tmax	1,23	3600	9,35	11.530,73	- 0,46
	10885		SW.Tmin	1,3	3600	9,29	10.831,63	- 0,35
	10885		CALMA.Tmax	1,23	3600	9,35	11.530,73	- 0,46
	10885		CALMA.Tmin	1,3	3600	9,29	10.831,63	- 0,35
Tanque 23	11524	136	SW.Tmax	0,544	3600	10,26	28.498,47	- 2,13
	11524		SW.Tmin	0,576	3600	10,19	26.715,97	- 2,01
	11524		CALMA.Tmax	0,544	3600	10,26	28.498,47	- 2,13
	11524		CALMA.Tmin	0,576	3600	10,19	26.715,97	- 2,01
Tanque 24	11341	177	SW.Tmax	0,313	3600	10,89	53.481,41	- 3,30
	11341		SW.Tmin	0,331	3600	10,82	50.206,77	- 3,18
	11341		CALMA.Tmax	0,313	3600	10,89	53.481,41	- 3,30
	11341		CALMA.Tmin	0,331	3600	10,82	50.206,77	- 3,18
Tanque 25	11411	146	SW.Tmax	0,469	3600	10,43	33.801,18	- 2,45
	11411		SW.Tmin	0,497	3600	10,36	31.657,34	- 2,33
	11411		CALMA.Tmax	0,469	3600	10,43	33.801,18	- 2,45
	11411		CALMA.Tmin	0,497	3600	10,36	31.657,34	- 2,33
Tanque 26	11608	130	SW.Tmax	0,598	3600	10,15	25.550,71	- 1,93
	11608		SW.Tmin	0,633	3600	10,08	23.960,13	- 1,81
	11608		CALMA.Tmax	0,598	3600	10,15	25.550,71	- 1,93
	11608		CALMA.Tmin	0,633	3600	10,08	23.960,13	- 1,81
Tanque 30	10914	230	SW.Tmax	0,18	3600	11,52	100.709,96	- 4,47
	10914		SW.Tmin	0,191	3600	11,46	94.524,86	- 4,35
	10914		CALMA.Tmax	0,18	3600	11,52	101.077,80	- 4,47
	10914		CALMA.Tmin	0,191	3600	11,46	94.524,86	- 4,35
Tanque 38	10919	220	SW.Tmax	0,198	3600	11,42	90.745,30	- 4,27
	10919		SW.Tmin	0,21	3600	11,35	84.907,88	- 4,15
	10919		CALMA.Tmax	0,198	3600	11,42	90.745,30	- 4,27
	10919		CALMA.Tmin	0,21	3600	11,35	84.907,88	- 4,15

Anexo 35: Tanques atmosféricos con intensidad de radiación térmica mayor o igual a 15 kW/m²

	Tanque	Distancia (m)	Tanque afectado	Intensidad (kW/m ²)
Subárea 1	30	101	17	16,3
		78	38	26,1
		107	1	15,0
Subárea 2	17	55	16	20,2
		62	26	15,7
	22	51	23	15,8
	23	51	22	15,8
	25	54	24	17,4
		57	26	15,7
	26	62	17	16,5
		57	25	19,8
	Subárea 3	18	29	19
25			20	33,2
19		29	18	18,3
		28	20	19,4
20		28	19	15,8
		25	18	19,0
		18	21	30,6
21		18	20	30,6

Anexo 36: Registro histórico de accidentes

Sustancia	Derrames	Cantidad de tanques	Valor inicial
Crudo	42	13	3,231
Fuel Oil	16	8	2,000
Gasolina	2	5	0,400
Diesel	3	9	0,333
Nafta	3	5	0,600
Turbo combustible	1	3	0,333

Anexo 37: Resultados del análisis histórico de accidentes por derrame de sustancia

Sustancias	Derrames	Cant. Tanques	Frecuencia (a⁻¹)
Diésel	3	9	0,0333
Turbo combustible	1	3	0,0333
Nafta	3	5	0,0600
<i>Fuel oil</i>	16	8	0,2000
Combustible de aviación	2	5	0,0400

Anexo 38: Valores de probabilidad de escalado y su valor Probit para cada tanque

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 1		
U/P secundaria afectada	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)	Probabilidad (MatLab 2013)
	Intensidad de la radiación (Pool fire)	Radiación
Tanque 4	3,47	6,3008E-02
Tanque 13	-	-
Tanque 16	1,29	1,0363E-04
Tanque 17	2,75	1,2224E-02
Tanque 18	-	-
Tanque 19	-	-
Tanque 20	-	-
Tanque 21	-	-
Tanque 22	-	-
Tanque 23	-	-
Tanque 24	-	-
Tanque 25	-	-
Tanque 26	0,63	6,2123E-06
Tanque 30	2,22	1,9262E-03
Tanque 38	0,08	4,3272E-07
Tanque 74	-	-

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 4

U/P secundaria afectada	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)	Probabilidad (MatLab 2013)
	Intensidad de la radiación (Pool fire)	Radiación
Tanque 1	3,34	4,8457E-02
Tanque 13	0,52	3,7322E-06
Tanque 16	2,25	2,9798E-03
Tanque 17	1,91	1,0008E-03
Tanque 18	1,67	4,3423E-04
Tanque 19	0,89	1,9783E-05
Tanque 20	0,58	4,9350E-06
Tanque 21	0,02	3,1792E-07
Tanque 22	-	-
Tanque 23	-	-
Tanque 24	-	-
Tanque 25	-	-
Tanque 26	0,20	7,9333E-07
Tanque 30	-	-
Tanque 38	-	-
Tanque 74	0,15	6,1731E-07

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 13

U/P secundaria afectada	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)	Probabilidad (MatLab 2013)
	Intensidad de la radiación (Pool fire)	Radiación
Tanque 1	-	-
Tanque 4	0,38	1,9187E-06
Tanque 16	4,15	1,9766E-01
Tanque 17	2,50	6,2097E-03
Tanque 18	2,38	4,3965E-03
Tanque 19	1,34	1,2611E-04
Tanque 20	3,19	3,5148E-02
Tanque 21	3,47	6,3008E-02
Tanque 22	4,72	3,8974E-01
Tanque 23	1,99	1,3062E-03
Tanque 24	1,26	9,2010E-05
Tanque 25	2,88	1,7003E-02
Tanque 26	3,86	1,2714E-01
Tanque 30	-	-
Tanque 38	0,26	1,0686E-06
Tanque 74	3,41	5,5917E-02

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 16

U/P secundaria afectada	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)	Probabilidad (MatLab 2013)
	Intensidad de la radiación (Pool fire)	Radiación
Tanque 1	0,39	2,013E-06
Tanque 4	1,39	1,531E-04
Tanque 13	3,62	8,379E-02
Tanque 17	3,46	6,178E-02
Tanque 18	2,82	1,463E-02
Tanque 19	1,30	1,078E-04
Tanque 20	2,20	2,555E-03
Tanque 21	2,07	1,695E-03
Tanque 22	0,96	2,673E-05
Tanque 23	-	-
Tanque 24	-	-
Tanque 25	0,50	3,398E-06
Tanque 26	2,27	3,167E-03
Tanque 30	-	-
Tanque 38	-	-
Tanque 74	0,60	5,4125E-06

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 17

U/P secundaria afectada	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)	Probabilidad (MatLab 2013)
	Intensidad de la radiación (Pool fire)	Radiación
Tanque 1	2,95	2,0182E-02
Tanque 4	2,24	2,8901E-03
Tanque 13	3,28	4,2716E-02
Tanque 16	5,08	5,3188E-01
Tanque 18	1,24	8,4957E-05
Tanque 19	0,10	4,7918E-07
Tanque 20	0,74	1,0359E-05
Tanque 21	0,74	1,0267E-05
Tanque 22	1,12	5,2228E-05
Tanque 23	-	-
Tanque 24	-	-
Tanque 25	1,72	5,1904E-04
Tanque 26	4,89	4,5620E-01
Tanque 30	2,51	6,3872E-03
Tanque 38	1,87	8,7403E-04
Tanque 74	0,75	1,0689E-05

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 18

U/P secundaria afectada	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)	Probabilidad (MatLab 2013)
	Intensidad de la radiación (Pool fire)	Radiación
Tanque 1	-	-
Tanque 4	0,30	1,3008E-06
Tanque 13	1,41	1,6534E-04
Tanque 16	2,56	7,3436E-03
Tanque 17	-	-
Tanque 19	5,45	6,7364E-01
Tanque 20	5,90	8,1594E-01
Tanque 21	3,84	1,2302E-01
Tanque 22	-	-
Tanque 23	-	-
Tanque 24	-	-
Tanque 25	-	-
Tanque 26	-	-
Tanque 30	-	-
Tanque 38	-	-
Tanque 74	1,39	1,5310E-04

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 19

U/P secundaria afectada	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)	Probabilidad (MatLab 2013)
	Intensidad de la radiación (Pool fire)	Radiación
Tanque 1	-	-
Tanque 4	-	-
Tanque 13	-	-
Tanque 16	-	-
Tanque 17	-	-
Tanque 18	4,75	4,0129E-01
Tanque 20	4,78	4,1294E-01
Tanque 21	2,33	3,7926E-03
Tanque 22	-	-
Tanque 23	-	-
Tanque 24	-	-
Tanque 25	-	-
Tanque 26	-	-
Tanque 30	-	-
Tanque 38	-	-
Tanque 74	0,9	2,0658E-05

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 20

U/P secundaria afectada	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)	Probabilidad (MatLab 2013)
	Intensidad de la radiación (Pool fire)	Radiación
Tanque 1	-	-
Tanque 4	-	-
Tanque 13	1,12	5,2228E-05
Tanque 16	0,64	6,5031E-06
Tanque 17	-	-
Tanque 18	4,83	4,3251E-01
Tanque 19	4,37	2,6435E-01
Tanque 21	5,76	7,7637E-01
Tanque 22	-	-
Tanque 23	-	-
Tanque 24	-	-
Tanque 25	-	-
Tanque 26	-	-
Tanque 30	-	-
Tanque 38	-	-
Tanque 74	1,91	1,0008E-03

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 21

U/P secundaria afectada	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)	Probabilidad (MatLab 2013)
	Intensidad de la radiación (Pool fire)	Radiación
Tanque 1	-	-
Tanque 4	-	-
Tanque 13	1,39	1,5310E-04
Tanque 16	0,46	2,8127E-06
Tanque 17	-	-
Tanque 18	2,59	7,9763E-03
Tanque 19	1,97	1,2228E-03
Tanque 20	5,73	7,6730E-01
Tanque 22	-	-
Tanque 23	-	-
Tanque 24	-	-
Tanque 25	-	-
Tanque 26	-	-
Tanque 30	-	-
Tanque 38	-	-
Tanque 74	3,23	3,8364E-02

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 22

U/P secundaria afectada	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)	Probabilidad (MatLab 2013)
	Intensidad de la radiación (Pool fire)	Radiación
Tanque 1	-	-
Tanque 4	-	-
Tanque 13	4,70	3,8209E-01
Tanque 16	1,46	2,0006E-04
Tanque 17	0,60	2,0778E-04
Tanque 18	0,65	6,8069E-06
Tanque 19	0,12	5,3043E-07
Tanque 20	1,32	1,1662E-04
Tanque 21	2,13	2,0524E-03
Tanque 23	4,90	4,6017E-01
Tanque 24	2,83	1,5003E-02
Tanque 25	3,23	3,8364E-02
Tanque 26	2,70	1,0724E-02
Tanque 30	-	-
Tanque 38	-	-
Tanque 74	2,04	1,5382E-03

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 23

U/P secundaria afectada	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)	Probabilidad (MatLab 2013)
	Intensidad de la radiación (Pool fire)	Radiación
Tanque 1	-	-
Tanque 4	-	-
Tanque 13	1,95	1,1442E-03
Tanque 16	-	-
Tanque 17	-	-
Tanque 18	-	-
Tanque 19	-	-
Tanque 20	-	-
Tanque 21	0,36	1,7420E-06
Tanque 22	4,87	4,4828E-01
Tanque 24	3,79	1,1314E-01
Tanque 25	2,83	1,5003E-02
Tanque 26	1,07	4,2473E-05
Tanque 30	-	-
Tanque 38	-	-
Tanque 74	0,37	1,8283E-06

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 24

U/P secundaria afectada	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)	Probabilidad (MatLab 2013)
	Intensidad de la radiación (Pool fire)	Radiación
Tanque 1	-	-
Tanque 4	-	-
Tanque 13	1,22	7,8414E-05
Tanque 16	-	-
Tanque 17	-	-
Tanque 18	-	-
Tanque 19	-	-
Tanque 20	-	-
Tanque 21	-	-
Tanque 22	2,79	1,3553E-02
Tanque 23	3,77	1,0935E-01
Tanque 25	4,64	3,5942E-01
Tanque 26	1,78	6,4095E-04
Tanque 30	-	-
Tanque 38	0,55	4,2935E-06
Tanque 74	-	-

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 25

U/P secundaria afectada	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)	Probabilidad (MatLab 2013)
	Intensidad de la radiación (Pool fire)	Radiación
Tanque 1	-	-
Tanque 4	-	-
Tanque 13	3,05	2,5588E-02
Tanque 16	1,18	6,6726E-05
Tanque 17	1,32	1,1662E-04
Tanque 18	-	-
Tanque 19	-	-
Tanque 20	-	-
Tanque 21	0,11	5,0418E-07
Tanque 22	4,13	1,9215E-01
Tanque 23	3,13	3,0742E-02
Tanque 24	5,09	5,3586E-01
Tanque 26	4,89	4,5620E-01
Tanque 30	0,13	5,5799E-07
Tanque 38	1,98	1,2639E-03
Tanque 74	0,21	8,3391E-07

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 26

U/P secundaria afectada	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)	Probabilidad (MatLab 2013)
	Intensidad de la radiación (Pool fire)	Radiación
Tanque 1	0,46	2,8127E-06
Tanque 4	0,16	6,4920E-07
Tanque 13	4,57	3,3360E-01
Tanque 16	3,35	4,9471E-02
Tanque 17	4,65	3,6317E-01
Tanque 18	0,45	2,6823E-06
Tanque 19	-	-
Tanque 20	0,56	4,4979E-06
Tanque 21	0,83	1,5230E-05
Tanque 22	3,17	3,3625E-02
Tanque 23	1,31	1,1213E-04
Tanque 24	2,13	2,0524E-03
Tanque 25	5,36	6,4058E-01
Tanque 30	1,59	3,2481E-04
Tanque 38	3,06	2,6190E-02
Tanque 74	0,80	1,3346E-05

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 30

U/P secundaria afectada	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)	Probabilidad (MatLab 2013)
	Intensidad de la radiación (Pool fire)	Radiación
Tanque 1	4,59	3,4090E-01
Tanque 4	2,61	8,4242E-03
Tanque 13	2,52	6,5691E-03
Tanque 16	2,68	1,0170E-02
Tanque 17	4,62	3,5197E-01
Tanque 18	1,16	6,1517E-05
Tanque 19	0,54	4,0980E-06
Tanque 20	0,87	1,8138E-05
Tanque 21	0,77	1,1685E-05
Tanque 22	1,78	6,4095E-04
Tanque 23	1,08	4,4274E-05
Tanque 24	1,83	7,6219E-04
Tanque 25	2,90	1,7864E-02
Tanque 26	4,20	2,1186E-01
Tanque 38	5,92	8,2121E-01
Tanque 74	-	-

Unidad de Proceso Primaria: Tanque 38

U/P secundaria afectada	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)	Probabilidad (MatLab 2013)
	Intensidad de la radiación (Pool fire)	Radiación
Tanque 1	0,47	2,9492E-06
Tanque 4	-	-
Tanque 13	0,90	2,0658E-05
Tanque 16	0,45	2,6823E-06
Tanque 17	1,89	9,3544E-04
Tanque 18	-	-
Tanque 19	-	-
Tanque 20	-	-
Tanque 21	-	-
Tanque 22	0,53	3,9110E-06
Tanque 23	-	-
Tanque 24	1,22	7,8414E-05
Tanque 25	2,41	4,7988E-03
Tanque 26	3,23	3,8364E-02
Tanque 30	3,83	1,2100E-01
Tanque 74	-	-

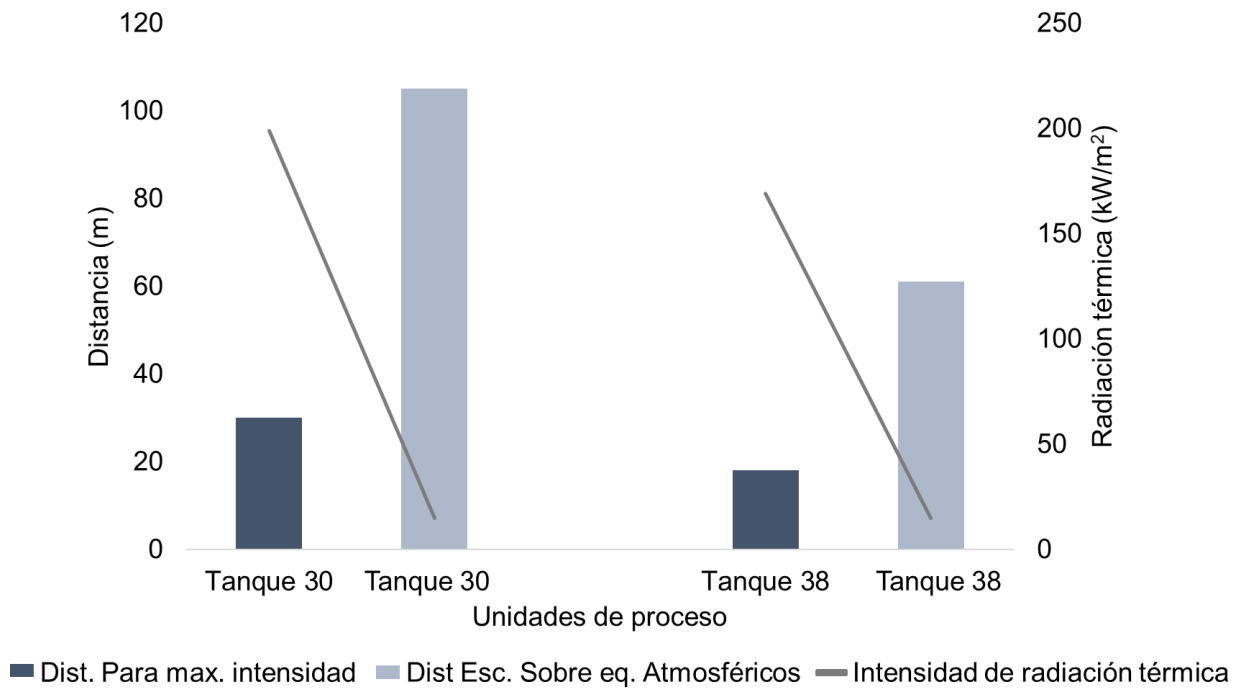
Unidad de Proceso Primaria: Tanque 74

U/P secundaria afectada	Probit (Y) (Reniers y Cozzani, 2013)	Probabilidad (MatLab 2013)
	Intensidad de la radiación (Pool fire)	Escalado
Tanque 1	-	-
Tanque 4	-	-
Tanque 13	1,06	4,0741E-05
Tanque 16	-	-
Tanque 17	-	-
Tanque 18	-	-
Tanque 19	0,32	1,4344E-06
Tanque 20	1,53	2,6023E-04
Tanque 21	2,78	1,3209E-02
Tanque 22	-	-
Tanque 23	-	-
Tanque 24	-	-
Tanque 25	-	-
Tanque 26	-	-
Tanque 30	-	-
Tanque 38	-	-

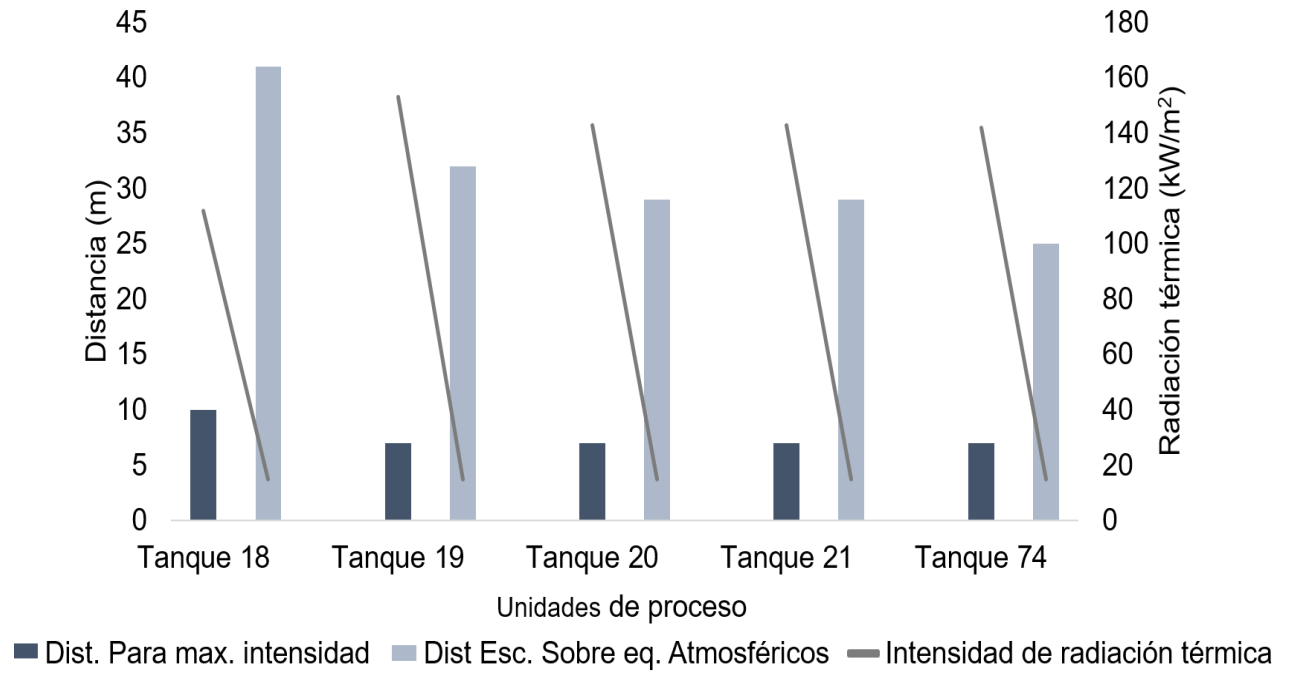
Anexo 39: Probabilidades promedios correspondientes para cada tanque del área de estudio

	U/P	Sustancia almacenada	Volumen (m ³)	Probabilidad promedio
Subárea 1	30	<i>Fuel oil</i>	10914	1,1803E-01
	38	<i>Fuel oil</i>	10919	1,8356E-02
Subárea 2	1	Diésel	8542	1,2878E-02
	4	Diésel	11334	5,2902E-03
	13	Turbo combustible	11147	6,4125E-02
	16	Nafta	4882	1,3993E-02
	17	Nafta	4647	7,5844E-02
	22	Turbo combustible	10885	7,5873E-02
	23	Turbo	11524	8,2516E-02
	24	Diésel	11341	8,0508E-02
	25	Diésel	11411	1,1291E-01
	26	Diésel	11608	9,6611E-02
Subárea 3	18	Combustible de aviación	2316	2,3147E-01
	19	Combustible de aviación	745	2,0451E-01
	20	Combustible de aviación	341	2,4571E-01
	21	Combustible de aviación	1068	1,3584E-01
	74	Combustible de aviación	1186	3,3779E-03

Anexo 40: Comportamiento de la radiación térmica vs distancia para la subárea 1



Anexo 41: Comportamiento de la radiación térmica vs distancia para la subárea 3



Anexo 42: Lugares y transiciones respectivamente de la red Petri probabilística

Lugar	Significado
P ₁	Charco de fuego TK 17
P ₂	Falla del TK 16
P ₃	Charco de fuego TK 16
P ₄	Falla del TK 18
P ₅	Falla del TK 26
P ₆	Charco de fuego TK 26
P ₇	Falla del TK 13
P ₈	Falla del TK 25
P ₉	Falla del TK 1
P ₁₀	Falla del TK 30
P ₁₁	Charco de fuego TK 30
P ₁₂	Charco de fuego TK 1
P ₁₃	Falla del TK 38
P ₁₄	Charco de fuego TK 18
P ₁₅	Falla del TK 20
P ₁₆	Charco de fuego TK 13
P ₁₇	Charco de fuego TK 20
P ₁₈	Falla del TK19
P ₁₉	Charco de fuego TK 19
P ₂₀	Falla del TK 21
P ₂₁	Charco de fuego TK 21
P ₂₂	Falla del TK 74
P ₂₃	Charco de fuego TK 25
P ₂₄	Charco de fuego TK 38
P ₂₅	Falla del TK 24
P ₂₆	Falla del TK 22
P ₂₇	Charco de fuego TK 22
P ₂₈	Falla del TK 23
P ₂₉	Charco de fuego TK 23
P ₃₀	Charco de fuego TK 24
P ₃₁	Falla del TK 4
P ₃₂	Charco de fuego TK 4
P ₃₃	Charco de fuego TK 74

Transición	Significado
t1	Radiación térmica del TK 17 afecta al TK 16
t2	Charco de fuego en TK 16
t3	Radiación térmica del TK 16 afecta al TK 18
t4	Radiación térmica del TK 17 afecta al TK 18
t5	Radiación térmica del TK 17 afecta al TK 26
t6	Charco de fuego en TK 26
t7	Radiación térmica del TK 26 afecta al TK 13
t8	Radiación térmica del TK 26 afecta al TK 25
t9	Radiación térmica del TK 17 afecta al TK 1
t10	Radiación térmica del TK 17 afecta al TK 30
t11	Charco de fuego en TK 30
t12	Radiación térmica del TK 30 afecta al TK 1
t13	Charco de fuego en TK 1
t14	Radiación térmica del TK 30 afecta al TK 26
t15	Radiación térmica del TK 30 afecta al TK 38
t16	Charco de fuego en TK 18
t17	Radiación térmica del TK 18 afecta al TK 20
t18	Charco de fuego en TK 13
t19	Radiación térmica del TK 13 afecta al TK 20
t20	Charco de fuego en TK 20
t21	Radiación térmica del TK 18 afecta al TK 19
t22	Radiación térmica del TK 20 afecta al TK 19
t23	Charco de fuego en TK 19
t24	Radiación térmica del TK 18 afecta al TK 21

t25	Radiación térmica del TK 20 afecta al TK 21
t26	Charco de fuego en TK 21
t27	Radiación térmica del TK 21 afecta al TK 74
t28	Charco de fuego en TK 25
t29	Radiación térmica del TK 26 afecta al TK 38
t30	Charco de fuego en TK 38
t31	Radiación térmica del TK 25 afecta al TK 24
t32	Radiación térmica del TK 13 afecta al TK 22
t33	Charco de fuego en TK 22
t34	Radiación térmica del TK 22 afecta al TK 25
t35	Radiación térmica del TK 22 afecta al TK 23
t36	Charco de fuego en TK 23
t37	Radiación térmica del TK 23 afecta al TK 24
t38	Charco de fuego en TK 24
t39	Radiación térmica del TK 1 afecta al TK 4
t40	Radiación térmica del TK 30 afecta al TK 4
t41	Charco de fuego en TK 4
t42	Radiación térmica del TK 4 afecta al TK 18
t43	Radiación térmica del TK 18 afecta al TK 74
t44	Radiación térmica del TK 19 afecta al TK 21
t45	Charco de fuego en TK 74
t46	Radiación térmica del TK 38 afecta al TK 25

Anexo 43: Comparación de resultados de la PPN (variante 1), según Dueñas, Orozco, Lantigua, *et al.* (2021)

Lugares	Investigación actual	Dueñas, Orozco, Lantigua, <i>et al.</i> (2021)
Falla del TK 38	1,0326E-04	2,9137E-05
Charco de fuego TK 38	5,1632E-05	4,3706E-06
Falla del TK 30	7,6646E-05	1,0821E-04
Charco de fuego TK 30	3,8323E-05	1,6231E-05
Falla del TK 1	2,5525E-04	3,3000E-04
Charco de fuego TK 1	1,2762E-04	9,9000E-05
Falla del TK 4	8,3642E-06	5,2778E-05
Charco de fuego TK 4	4,1821E-06	2,9028E-05
Falla del TK 18	4,7707E-05	1,3616E-06
Charco de fuego TK 18	2,3853E-05	2,7232E-07
Falla del TK 13	9,1448E-04	1,5697E-03
Charco de fuego TK 13	4,5724E-04	5,4940E-04
Falla del TK 26	5,4825E-03	1,2075E-02
Charco de fuego TK 26	2,7413E-03	7,2451E-03
Falla del TK 24	4,7382E-04	6,0416E-04
Charco de fuego TK 24	2,3691E-04	3,0208E-05
Falla del TK 74	3,2529E-07	1,0030E-08
Charco de fuego TK 74	1,6264E-07	6,0181E-09
Falla del TK 19	2,0765E-05	1,0403E-07
Charco de fuego TK 19	1,0383E-05	1,0299E-07
Falla del TK 22	1,7821E-04	2,6708E-04
Charco de fuego TK 22	8,9103E-05	2,6441E-04
Falla del TK 25	1,7597E-03	2,0425E-03
Charco de fuego TK 25	8,7983E-04	1,7361E-03
Falla del TK 23	4,1002E-05	1,4340E-04
Charco de fuego TK 23	2,0501E-05	1,3049E-04

Anexo 44: Datos introducidos en MatLab para cuantificar la probabilidad de falla

Process Unit	TK1	TK4	TK13	TK16	TK17	TK18
Storage Material	DIESEL	DIESEL	FUEL TURBO	NAPHTHA	NAPHTHA	AVIATION GASOLINE
Capacity of the Process Unit, (m ³)	8542	11334	11147	4882	4647	2316
Liquid burning rate, kg/(m ² *s)	0,035	0,035	0,039	0,074	0,074	0,055
Density of unburned fuel vapor, kg/(m ³)	3,4531	3,4531	3,6086	2,8145	2,8145	3,2726
Density of storage material, kg/(m ³)	1000	1000	820	750	750	740
Operational height of Target Unit, (m)	6,7	10,8	9,6	10,6	10,95	10,5
Target Unit diameter, (m)	35	34,2	36,5	22,7	53	15,5
Wind speed, (m/s)	4,28	4,28	3,53	3,97	4,69	3,53
Thickness of shapes, (mm)	9,2	9,2	12,1	7,5	8,2	7,3
Max Flame Length, (m)	38	38	39	37	40	30
Diameter of puddle, (m)	29	29	30	21	26	18,1
Corrosion speed, (mm/y)	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
Exploitation time, (y)	20	20	20	20	20	20

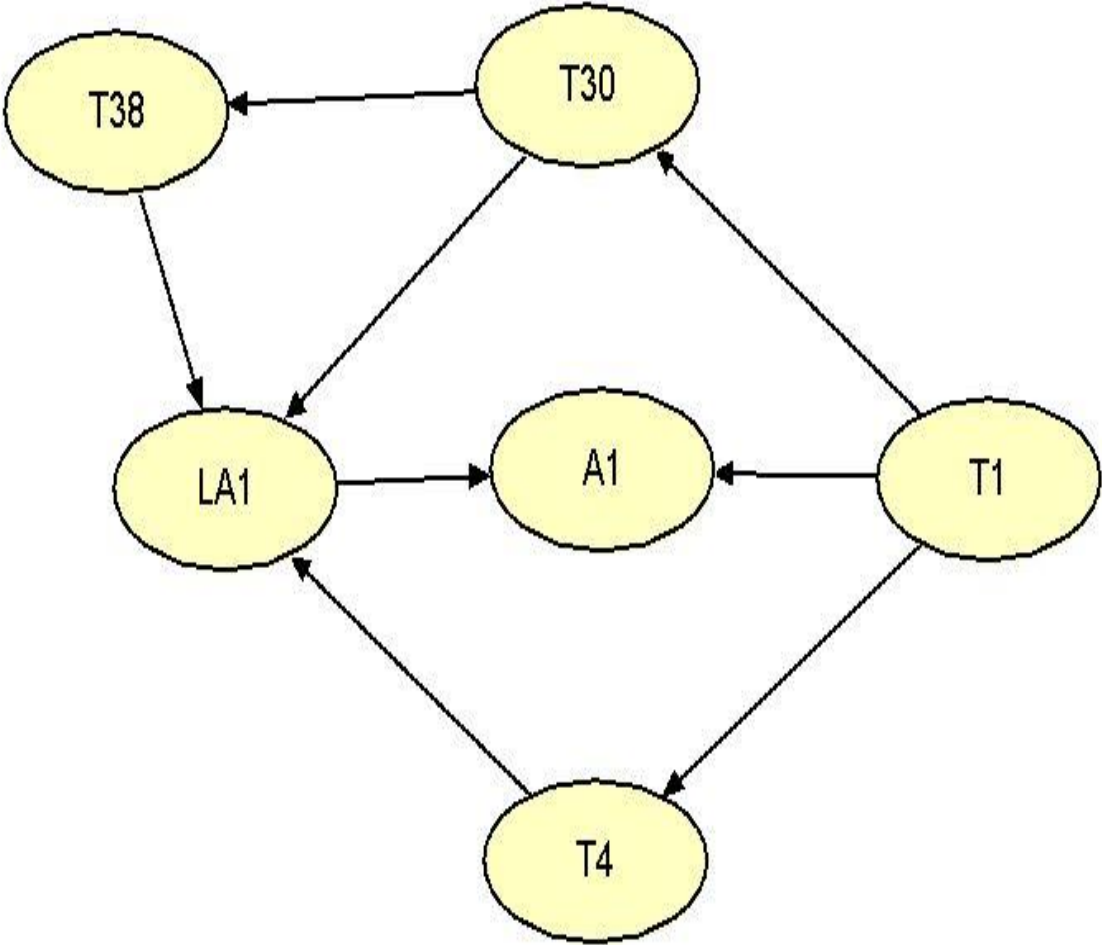
Process Unit	TK19	TK20	TK21	TK22	TK23	TK24
Storage Material	AVIATION GASOLINE	AVIATION GASOLINE	AVIATION GASOLINE	FUEL TURBO	FUEL TURBO	DIESEL
Capacity of the Process Unit, (m ³)	745	341	1068	10885	11524	11341
Liquid burning rate, kg/(m ² *s)	0,055	0,055	0,055	0,039	0,039	0,035
Density of unburned fuel vapor, kg/(m ³)	3,2726	3,2726	3,2726	3,6086	3,6086	3,4531
Density of storage material, kg/(m ³)	740	740	740	820	820	1000
Operational height of Target Unit, (m)	8	6,62	11,3	10,7	10,6	10,6
Target Unit diameter, (m)	10,2	7,57	10,4	34,2	34,2	34,2
Wind speed, (m/s)	3,03	3,03	3,03	2,42	2,75	3,33
Thickness of shapes, (mm)	5,6	6,3	5,5	12,4	11,3	12,7
Max Flame Length, (m)	24	25	25	39	39	40
Diameter of puddle, (m)	13,6	13,6	13,6	30	30	29
Corrosion speed, (mm/y)	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
Exploitation time, (y)	20	20	20	20	20	20

Process Unit	TK25	TK26	TK30	TK38	TK74
Storage Material	DIESEL	DIESEL	FUEL OIL	FUEL OIL	AVIATION GASOLINE
Capacity of the Process Unit, (m ³)	11411	11608	10914	10919	1186
Liquid burning rate, kg/(m ² *s)	0,035	0,035	0,035	0,035	0,055
Density of unburned fuel vapor, kg/(m ³)	3,4531	3,4531	3,6086	3,6086	3,2726
Density of storage material, kg/(m ³)	1000	1000	1000	1000	740
Operational height of Target Unit, (m)	10,6	10,6	10,5	10,6	10,5
Target Unit diameter, (m)	34,2	34,2	34,2	34,2	11
Wind speed, (m/s)	3,74	4,69	4,17	3,47	2,42
Thickness of shapes, (mm)	12,6	10,8	13,2	13,2	6,1
Max Flame Length, (m)	39	37	61	43	26
Diameter of puddle, (m)	29	29	60	35	13,6
Corrosion speed, (mm/y)	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
Exploitation time, (y)	20	20	20	20	20

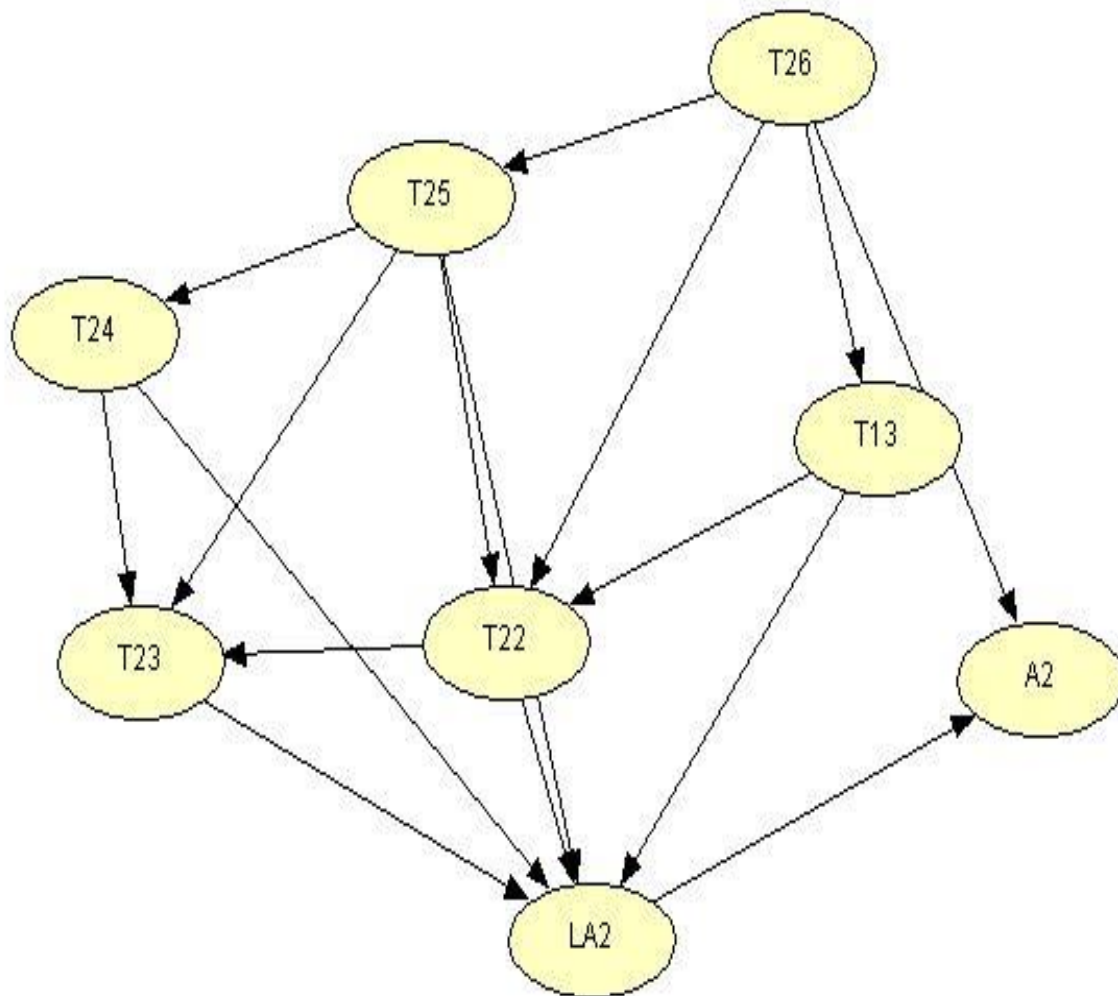
Anexo 45: Resultados de la probabilidad de falla obtenida por MatLab para la variante 3

Process Unit	Target Unit	Scal (mm)	TTF (s)	PERAD	TACC-TTF	SCAL-SACT	FP (%)	FP
TK1	TK4	2020,36	1369	0,0634	1	1	70,90	0,71
TK4	TK18	665,10	3637	0,0004	0,4748	1	32,20	0,32
TK13	TK20	211,30	1598	0,0350	1	1	68,70	0,69
TK13	TK22	1643,12	699	0,3880	1	1	83,30	0,83
TK16	TK18	665,10	1949	0,0147	0,8715	1	56,80	0,57
TK17	TK1	1286,12	1814	0,0204	0,9638	1	64,20	0,64
TK17	TK30	1964,50	2310	0,0063	0,8900	1	57,00	0,57
TK17	TK26	1983,12	636	0,4556	1	1	86,90	0,87
TK17	TK18	665,10	4593	0,0001	0,2466	1	20,00	0,20
TK17	TK16	991,93	573	0,5331	1	1	89,00	0,89
TK18	TK19	338,16	469	0,6750	1	1	89,50	0,90
TK18	TK20	211,30	369	0,8150	1	1	93,30	0,93
TK18	TK21	482,88	1121	0,1236	1	1	74,40	0,74
TK18	TK74	474,74	4225	0,0002	0,3149	1	23,00	0,23
TK19	TK21	482,88	2547	0,0038	0,8673	1	54,90	0,55
TK20	TK19	338,16	844	0,2632	1	1	80,10	0,80
TK20	TK21	482,88	397	0,7770	1	1	93,60	0,94
TK21	TK74	474,74	1560	0,0385	1	1	69,10	0,69
TK22	TK23	1627,85	633	0,4592	1	1	87,10	0,87
TK22	TK25	1983,12	1558	0,0387	1	1	69,10	0,69
TK23	TK24	1983,12	1154	0,1130	1	1	73,80	0,74
TK25	TK24	1983,12	571	0,5358	1	1	89,00	0,89
TK26	TK13	1573,74	745	0,3433	1	1	81,50	0,82
TK26	TK25	1983,12	492	0,6417	1	1	88,20	0,88
TK26	TK38	1983,12	1714	0,0261	1	1	67,90	0,68
TK30	TK1	1286,12	750	0,3394	1	1	81,40	0,81
TK30	TK4	2020,36	2187	0,0084	0,8810	1	56,70	0,57
TK30	TK26	1983,12	923	0,2125	1	1	78,30	0,78
TK30	TK38	1983,12	365	0,8200	1	1	93,20	0,93
TK38	TK25	1983,12	2429	0,0049	0,8854	1	56,50	0,57

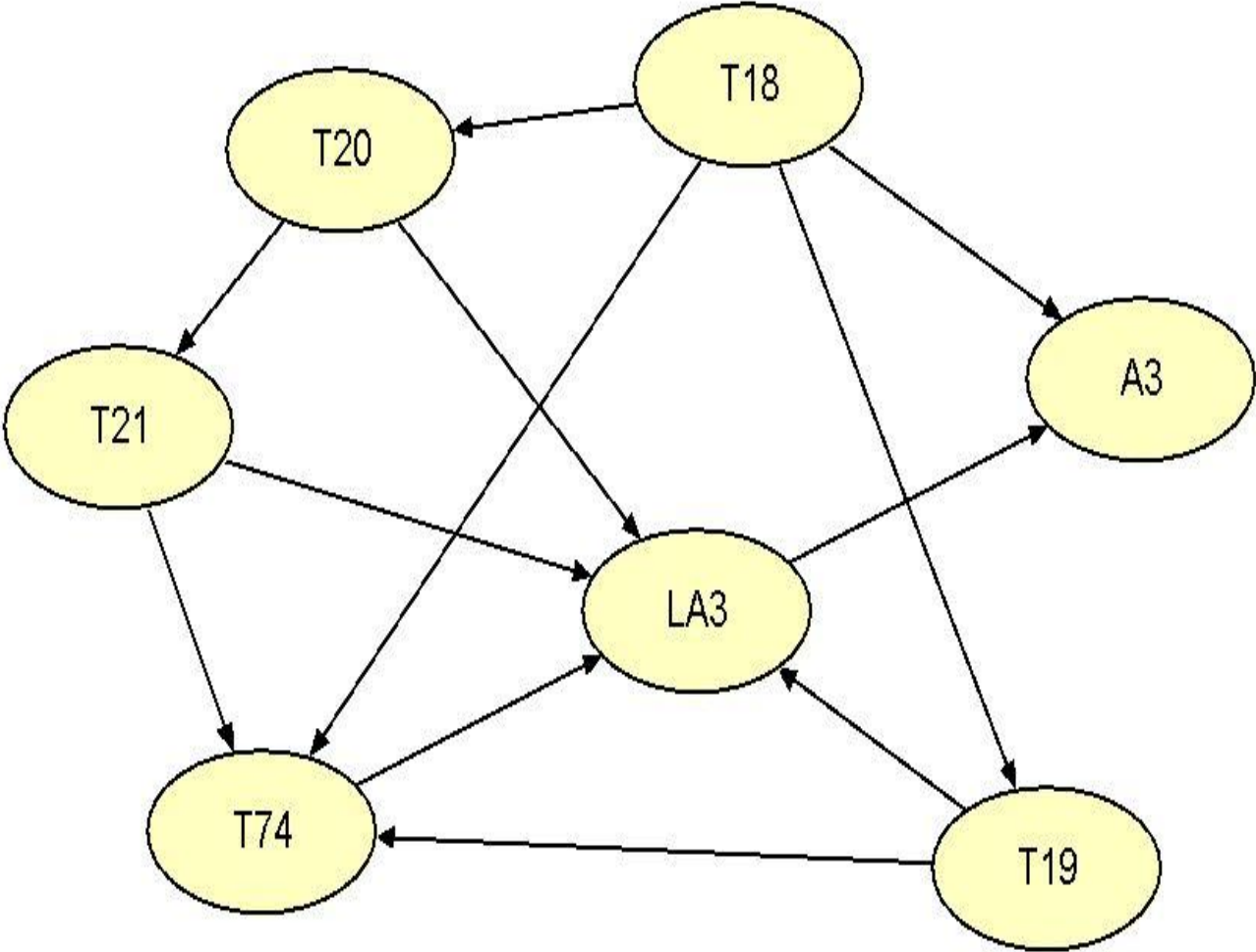
Anexo 46: DBN para la subárea 1



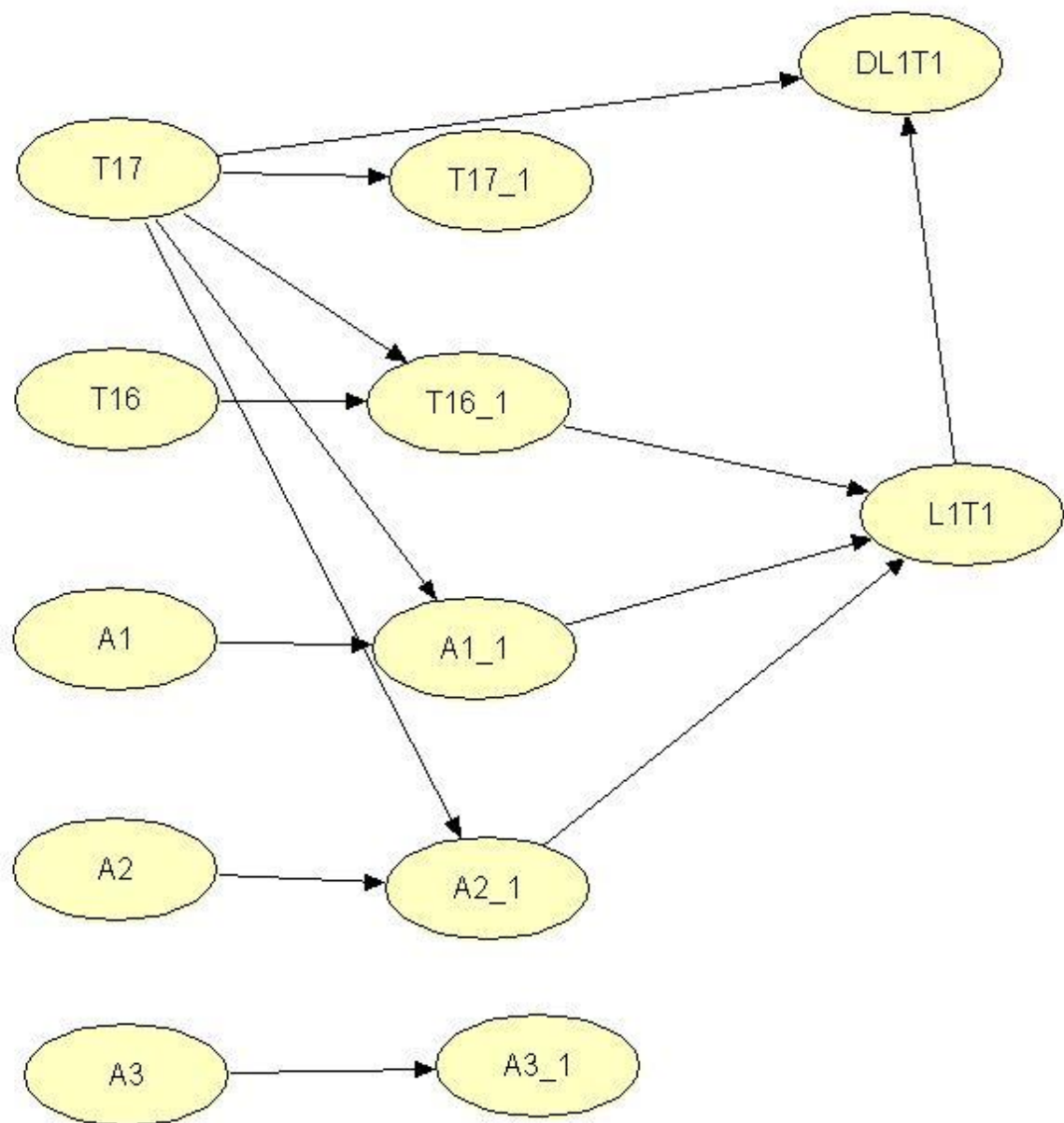
Anexo 47: DBN para la subárea 2



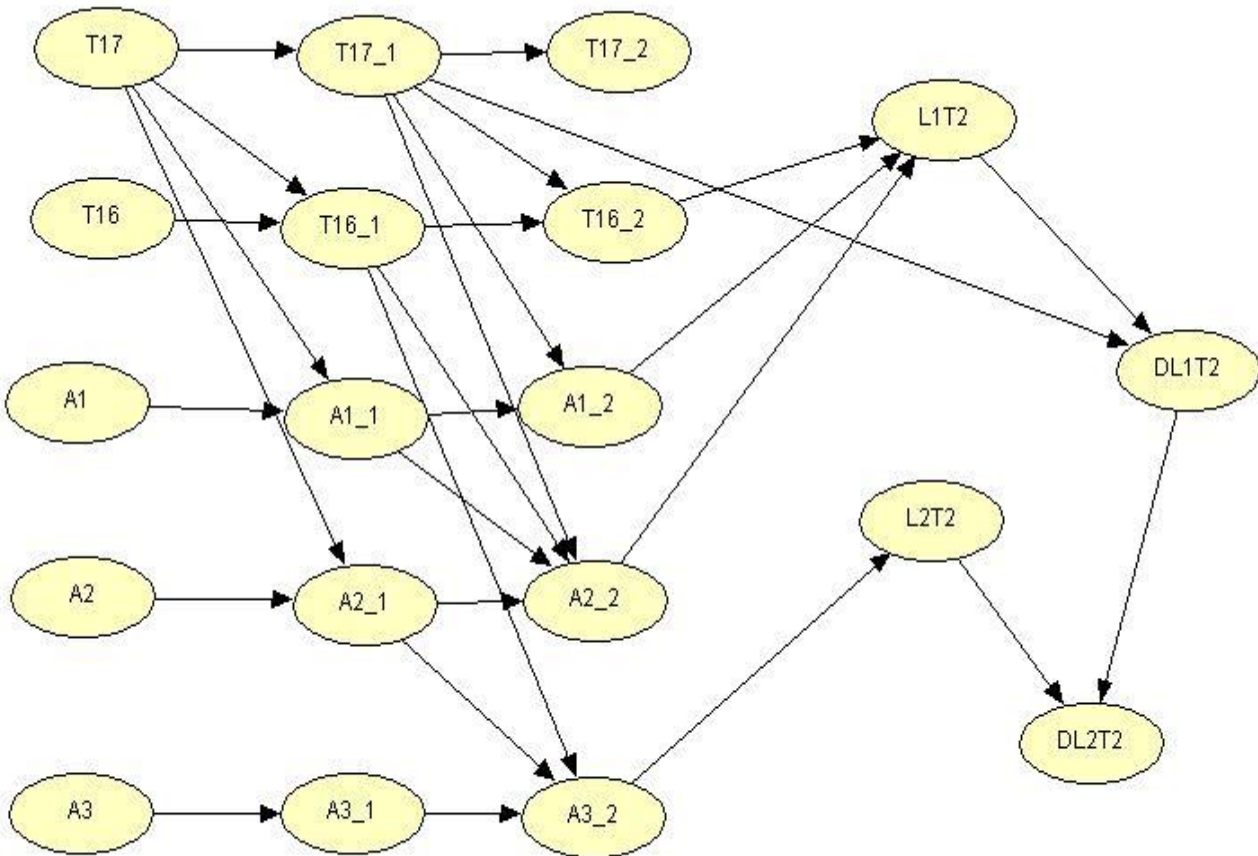
Anexo 48: DBN para la subárea 3



Anexo 49: DBN para el tiempo T1



Anexo 50: DBN para el tiempo T2



Anexo 51: Probabilidad de evolución en el tiempo del escenario de charco de fuego, obtenidas por lógica difusa

Und. Principal	Und. Afectada	TTF (s)	TTF-TACC	PERAD	MIT	PΔt
TK17_1	TK 16_2	572,00	100,00	5,3190E-01	50	6,7800E-01
	A1_2					
	A2_2					
TK16_1	A2_2 (TK 26)	1466,47	100,00	4,9500E-02	50	5,1700E-01
	A3_2					
A1_1 (TK 30)	A2_2 (TK 26)	922,78	100,00	2,1190E-01	50	6,1900E-01
A2_1 (TK 13)	A3_2 (TK 18)	2473,46	88,05	4,4000E-03	50	4,5300E-01
A3_1 TK (18)	A3_2 (TK 20)	657,22	100,00	4,3250E-01	50	6,5000E-01
A3_2 (TK 18)	A2_3 (TK 26)	4188,96	32,28	2,0000E-04	50	2,2700E-01

Anexo 52: Resultados de la DBN

Unidad de Proceso	Primaria (%)																					L1T3	DL1T3	L2T3	DL2T3					
		TK 17	TK 16	A1	A2	A3	TK 17-1	TK 16-1	A1-1	A2-1	A3-1	TK 17-2	TK 16-2	A1-2	A2-2	A3-2	TK 17-3	TK 16-3	A1-3	A2-3	A3-3					L1T1	DL1T1	L1T2	DL1T2	L2T2
Probabilidad Previa	1.2	1.2	0.13	52.28	2.13	0.81	1.26	0.08	24.23	1.39	0.55	1.06	0.07	11.40	0.39	0.37	0.82	0.05	5.48	0.15	24.94	1.03	11.85	0.77	0.39	9.67E-03	5.78	0.54	0.15	8.26E-03
Accidente TK 17	100	1.2	0.13	52.28	2.13	67.8	53.75	2.1	69.3	1.39	45.97	62.07	2.67	66.92	1.21	31.17	54.78	2.58	56.62	1.28	86.1	86.1	81.66	64.52	1.21	0.81	69.12	45.09	1.28	0.69
Accidente TK 16	1.2	100	0.13	52.28	2.13	0.81	52.28	0.08	24.23	1.39	0.55	27.42	0.07	15.68	1.09	0.37	14.44	0.05	9.62	0.71	63.6	1.2	37.31	0.81	1.09	0.01	21.16	0.55	0.71	0.01
Accidente A1	1.2	1.2	100	52.28	2.13	0.81	1.26	43.18	24.23	1.39	0.55	1.06	26.74	20.47	0.39	0.37	0.82	16.57	15.18	0.19	57.17	1.14	38.71	0.8	0.39	9.75E-03	25.92	0.55	0.19	8.31E-03
Accidente A2	1.2	1.2	0.13	100	2.13	0.81	1.26	0.08	45.85	1.39	0.55	1.06	0.07	21.12	0.49	0.37	0.82	0.05	9.86	0.22	46.27	1.15	21.47	0.79	0.49	0.01	10.12	0.54	0.22	8.36E-03
Accidente A3	1.2	1.2	0.13	52.28	100	0.81	1.26	0.08	24.23	65	0.55	1.06	0.07	11.40	15.29	0.37	0.82	0.05	5.48	3.58	24.94	1.03	11.85	0.77	15.29	0.13	5.78	0.54	3.58	0.03
Accidente TK 17-1	100	1.2	0.13	52.28	2.13	100	53.75	2.1	69.3	1.39	67.80	78.35	3.32	81.53	1.21	45.97	73.98	3.43	74.55	1.5	86.1	86.1	95.17	95.17	1.21	1.19	87.81	66.51	1.5	1.02
Accidente TK 16-1	51.27	49.87	0.13	52.28	2.13	34.76	100	1.11	47.07	1.39	23.57	68.49	1.39	45.57	1.74	15.98	46.8	1.33	37.17	1.45	100	51.27	76.22	34.76	1.74	0.6	56.1	23.57	1.45	0.44
Accidente A1-1	31.41	1.2	69.83	52.28	2.13	21.29	17.31	100	38.01	1.39	14.44	19.71	62.33	47.05	0.64	9.79	17.32	38.87	41.07	0.57	100	31.41	80.84	21.12	0.64	0.26	62.56	14.35	0.57	0.22
Accidente A2-1	3.43	1.2	0.13	98.92	2.13	2.33	2.44	0.13	100	1.39	1.58	2.44	0.13	46.29	0.76	1.07	2.04	0.11	21.77	0.41	100	3.43	46.65	2.28	0.76	0.03	22.2	1.56	0.41	0.02
Accidente A3-1	1.2	1.2	0.13	52.28	100	0.81	1.26	0.08	24.23	100	0.55	1.06	0.07	11.40	23.45	0.37	0.82	0.05	5.48	5.46	24.94	1.03	11.85	0.77	23.45	0.2	5.78	0.54	5.46	0.04
Accidente TK 17-2	100	1.20	0.13	52.28	1.79	100	53.75	2.10	69.30	1.16	100	78.35	3.32	81.53	1.21	67.8	89.87	4.08	89.07	1.5	-	-	95.17	95.17	1.21	1.19	98.1	98.1	1.5	1.5
Accidente TK 16-2	70.15	30.99	0.13	52.28	1.79	60.04	81.15	1.49	55.69	1.16	40.71	100	2.14	59.43	1.53	27.6	71.36	2.14	53.93	1.83	-	-	100	60.04	1.53	0.83	79.52	40.71	1.83	0.73
Accidente A1-2	48.44	1.20	52.53	52.28	1.79	40.84	26.36	75.69	45.78	1.16	27.69	34.27	100	55.61	0.78	18.77	31.39	62.46	57.37	0.8	-	-	100	40.84	0.78	0.49	84.95	27.63	0.8	0.42
Accidente A2-2	7.05	1.65	0.23	96.91	1.79	5.82	5.03	0.33	98.42	1.16	3.95	5.54	0.32	100	0.78	2.68	4.81	0.28	47.31	0.69	-	-	100	5.82	0.78	0.07	47.98	3.91	0.69	0.06
Accidente A3-2	3.68	3.34	0.13	65.58	69.48	2.49	5.57	0.13	46.65	69.29	1.69	4.11	0.13	22.62	100	1.15	2.95	0.12	11.28	23.43	-	-	24.4	2.45	100	2.45	12.41	1.68	23.43	0.42
Accidente TK 17-3	100	1.2	0.13	52.28	1.79	100	53.76	2.1	69.3	1.16	100	78.36	3.32	81.53	1.21	100	89.87	4.08	89.07	1.5	-	-	-	-	-	-	98.1	98.1	1.5	1.5
Accidente TK 16-3	80.05	21.1	0.13	52.28	1.79	73.29	71.69	1.7	60.2	1.16	60.37	92.27	2.53	66.73	1.42	40.93	100	2.79	65.52	1.71	-	-	-	-	-	-	100	60.37	1.71	0.98
Accidente A1-3	59.43	1.2	41.32	52.28	1.79	53.49	32.22	59.96	50.81	1.16	43.15	43.7	79.33	61.16	0.87	29.25	43.89	100	64.14	0.95	-	-	-	-	-	100	43.15	0.95	0.65	
Accidente A2-3	12.4	2.11	0.36	94.04	1.79	11.07	8.53	0.6	96.26	1.16	8.97	10.45	0.69	98.38	0.81	6.08	9.82	0.61	100	0.75	-	-	-	-	-	-	100	8.97	0.75	0.14
Accidente A3-3	9.93	5.49	0.16	74.9	41.48	7.91	11.82	0.3	62.42	41.11	5.36	12.57	0.34	51.04	59.7	3.64	9.11	0.32	26.49	100	-	-	-	-	-	-	29.8	5.35	100	5.35