



Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas



PREDICCIÓN DEL IMPACTO ECONÓMICO, AMBIENTAL Y HUMANO DEBIDO AL CARÁCTER CONTINUADO DE ACCIDENTES DE INCENDIO Y EXPLOSIÓN EN LA TERMINAL-320 DE LA DIVISIÓN TERRITORIAL DE COMERCIALIZACIÓN DE COMBUSTIBLES DE MATANZAS

Tesis Presentada como Requisito Parcial
para la Obtención del Título de
Máster en Ingeniería Asistida por Computadora

Autor: Ing. Julio Ariel Dueñas Santana

Tutor: Dr.C. Jesús Luis Orozco

Matanzas, 2020

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD Y NOTA LEGAL

Yo, Julio Ariel Dueñas Santana, declaro que soy el único autor de la siguiente tesis, titulada Predicción del impacto económico, ambiental y humano debido al carácter continuado de accidentes de incendio y explosión en la Terminal-320 de la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas y, en virtud de tal, cedo el derecho de copia de la misma a la Universidad de Matanzas, bajo la licencia *Creative Commons* de tipo *Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada*, con lo cual se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de la obra y no realice ninguna modificación de ella.

Matanzas, 3 de marzo de 2020.



Julio Ariel Dueñas Santana

*However difficult life may seem,
there is always something you can do and succeed at.*

Stephen Hawking

DEDICATORIA

A mi Dios.

A mi madre.

A mi abuela Sonia.

A mi primo Yhoan.

A la memoria de mi padre, mis tíos Ariel y Helio y mi abuelo.

A mi tutor por siempre Orozco.

A mis amigos y compañeros de estudio y trabajo

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por darme la capacidad de seguir adelante en cualquier circunstancia y mantener mi fe siempre.

A mi **madre Odalys**, por ser una guía en cada camino y una luz en cada momento de oscuridad. Por estar siempre presente y por el apoyo constante, sin importar cuántos tropiezos tuve en mi vida.

A mi **abuela Sonia**, por ser mi defensora a como diera lugar, sin importar nada. Por guiarme en el camino de la fe y ser un ejemplo de fortaleza.

A mi **tío Ariel** por ser el ejemplo de hombre altruista que intento ser, por ser mi paradigma como ser humano, por su ayuda constante y por ser unos de los ángeles que, desde el cielo, estoy seguro que siempre vela por mí.

A mi **padre Julio**, mi **tío Helio**, mi **abuelo Pupi** y mi **tía abuela Mecho**, que ya no están con nosotros en esta dimensión, pero, que, desde el cielo, también, me cuidan y contribuyeron a mi formación como persona de bien.

A mi profesor **Orozco**, por convertirse en mi padre. Ese padre, que te da un consejo cuando más lo necesitas, no solo en el plano académico, sino en la vida en general. Por sembrarme la semilla de la investigación, por guiarme en cómo hacerlo y por servir de modelo de profesor. Por cada recomendación realizada. Por dedicarme parte de su tiempo en escucharme y ayudarme a ser mejor ser humano. Por confiar siempre en mi capacidad de ser un mejor profesional y ser humano.

A todos los **profesores**, que ahora son mis compañeros de trabajo, por contribuir a mi formación como profesional.

A mis amigos **Jonathan, Luis, Annarelys, Dayana, Jeniffer, Liudmila y Elizabeth** por ser amigos desde siempre y para siempre. Gracias por estar siempre ahí.

A mis diplomantes del año pasado **Dainelys, Liudmila, Karla y Costa** y a las actuales **Amelia, Mary Carla y Yinet** por contribuir a mi desarrollo como tutor. Estoy muy orgulloso de todas ustedes.

A mis estudiantes del IPVCE: “Carlos Marx” de los cuales conservo muy buenas amistades, gracias por hacerme crecer como profesor.

Gracias a todos

RESUMEN

La combinación efectiva de las técnicas más modernas de análisis de riesgos es indispensable a nivel mundial en la prevención de accidentes industriales de incendio y explosión. El carácter continuado de estos accidentes potencia el carácter devastador de los mismos para las personas, el medio ambiente y la economía. Por esta razón, el objetivo de esta investigación es pronosticar el impacto económico, ambiental y humano debido al carácter continuado de posibles accidentes de incendio y explosión en la Terminal-320 de la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas. Para ello, se propone una metodología basada en una secuencia, de ocho etapas fundamentales, relacionada con las redes bayesianas, que permite la cuantificación directa de la frecuencia con que pueden ocurrir estos sucesos. Cada uno de los posibles escenarios se simula con el *software* ALOHA. Se emplea el programa Hugin para la confección de las redes bayesianas y Matlab para la determinación de la probabilidad de escalado y de daño a partir del valor Probit. A través de las redes bayesianas y del Índice de Unidad Primaria Potencial se determinó que el tanque 17 es el más propenso a detonar la cadena de eventos y que la probabilidad conjunta toma un valor elevado de 42,48 %. Las pérdidas totales debido al carácter continuado son de 8 352 759 USD y son ocho veces mayor que sin efecto dominó. Se deteriora la calidad ambiental en un 90% y se expulsan a la atmósfera grandes cantidades de humo, monóxido y dióxido de carbono. Todas las personas expuestas a un radio de 300 metros respecto al origen del accidente en el área poseen una vulnerabilidad máxima y siguen siendo vulnerables hasta 1000 metros.

Palabras claves: red bayesiana; accidentes industriales; vulnerabilidad; efecto dominó; incendio; explosión.

ABSTRACT

The effective combination of the most modern techniques of risk analysis is indispensable, worldwide, in the prevention of industrial fire and explosion accidents. The domino effect of these accidents enhances their devastating nature for individuals, environment and the economy. For this reason, the objective of this research is to predict the economic, environmental and human impact due to the continuing character of possible fire and explosion accidents in Terminal-320 of the Territorial Division of Fuel Trading in Matanzas. With this purpose, a methodology based on a sequence of eight fundamental steps is proposed, related to Bayesian networks, which allows the direct quantification of the frequency of these events. Each of the possible scenarios is simulated with the ALOHA software. The Hugin software is used to make Bayesian networks, while Matlab software, to determine the probability of escalation and damage from the Probit value. The use of Bayesian networks and the Potential Primary Unit Index indicate that tank 17 is the most likely to detonate the chain of events and that the joint probability takes a high value of 42.48%. Moreover, total losses due to the domino effect are 8 352 759 USD and are eight times greater than without domino effect. Hence, the environmental quality deteriorates by 90% and large amounts of smoke, monoxide and carbon dioxide are released into the atmosphere. Thus, all people exposed to a radius of 300 meters with respect to the origin of the accident in the area have a maximum vulnerability and remain vulnerable up to 1000 meters.

Keywords: Bayesian network; industrial accidents; vulnerability; domino effect; fire; explosion.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
Capítulo 1: Estado del Arte	5
1.1- Características de los posibles escenarios de incendio y explosión.	5
1.2- Análisis histórico del efecto dominó en las instalaciones industriales.....	9
1.3- Uso de las redes bayesianas en el análisis de riesgos.....	14
1.4- Índices utilizados para la cuantificación del impacto económico, ambiental y humano de accidentes de incendio y explosión.....	17
1.4.1- Herramientas que cuantifican el impacto económico de accidentes de incendio y explosión.....	17
1.4.2- Herramientas que cuantifican el impacto ambiental de accidentes de incendio y explosión.....	21
1.4.3- Herramientas que cuantifican el impacto humano de accidentes de incendio y explosión.....	23
1.5- Conclusiones parciales	25
Capítulo 2: Materiales y Métodos	26
2.1- Etapa 1: Selección de la unidad de proceso.	28
2.2- Etapa 2: Simulación de todos los escenarios de incendio y explosión para cuantificar los vectores de escalado.....	29
2.2.1- Definición de los escenarios y equipos afectados.	29
2.2.2- Características y particularidades del <i>software</i> ALOHA.	29
2.3- Etapa 3: Cuantificación de la probabilidad de escalado para cada unidad de proceso y comparación de los valores umbrales con los vectores de escalado ..	32
2.4- Etapa 4: Aplicación del Índice de Unidad Primaria Potencial (IUPP) para la identificación de las unidades primarias potenciales	33
2.5- Etapa 5: Confección de la red bayesiana y simulación en Hugin.....	34
2.5.1- Determinación de la frecuencia inicial del derrame.	35
2.5.2- Cuantificación de la frecuencia del suceso inicial.....	35
2.5.3- Características del software Hugin para su uso en la simulación de redes bayesianas.	35
2.5.4- Cálculo de la probabilidad conjunta de la cadena de sucesos dominó	37

2.6- Etapa 6: Predicción del impacto económico debido al carácter continuado de estos accidentes.....	38
2.7- Etapa 7: Predicción del impacto ambiental debido al carácter continuado de estos accidentes.....	41
2.7.1- Cálculo de la cantidad de humo generada en el incendio.....	41
2.7.2- Cálculo de la cantidad de contaminantes generados y reducción de la calidad ambiental.....	42
2.8- Etapa 8: Predicción del impacto humano debido al carácter continuado de estos accidentes.....	43
2.9- Conclusiones parciales del capítulo.....	44
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- Estimación del alcance del escenario charco de fuego.....	47
3.1.2- Estimación del alcance del escenario explosión de una nube de vapor...50	
3.1.3- Estimación del alcance del escenario BLEVE más bola de fuego.	52
3.2- Cálculo de la probabilidad de escalado y frecuencia de los accidentes (Etapa 3).....	55
3.3- Determinación de las unidades primarias potenciales a través del IUPP (Etapa 4).....	58
3.4- Resultados de la elaboración de las redes bayesianas (Etapa 5).....	61
3.4.1- Resultados y análisis de la probabilidad conjunta del efecto dominó.	68
3.5- Resultados y análisis del impacto económico debido al carácter continuado de estos accidentes (Etapa 6)	69
3.6- Resultados y análisis del impacto ambiental debido al carácter continuado de estos accidentes (Etapa 7).....	73
3.7- Resultados y análisis del impacto humano debido al carácter continuado de estos accidentes (Etapa 8).....	77
3.8- Conclusiones parciales del capítulo.....	79
Conclusiones	81
Recomendaciones	82
Referencias Bibliográficas	83
Anexos	105

INTRODUCCIÓN

Los accidentes generados en la industria traen consigo graves afectaciones: primero, por los perjuicios que se producen a las personas, los cuales son irreversibles en la mayoría de los casos; segundo, por el daño provocado al medio ambiente, ya que los accidentes químicos son las peores formas de contaminación; tercero, por los daños económicos, derivados, de las consecuencias directas de los accidentes, así como por la paralización de la producción y pérdida de prestigio de la empresa (Casal et al., 2002 ; Fabbri et al., 2017 ; Gyenes et al., 2017 ; Goerlandt et al., 2017; Shuai et al., 2018 ; Chen et al., 2019).

Los accidentes que se generan por efecto dominó, en sí mismos, representan una afectación global a mayor escala, ya que, en estos casos, la magnitud de las consecuencias de los accidentes secundarios es mucho mayor que la del accidente primario. Esto hace que sea indispensable, tener en cuenta el carácter continuado de los accidentes (Necci, 2015; Landucci et al., 2017; Khakzad et al., 2018).

Según la Comisión Europea en su publicación de Gestión del Riesgo a través de la Ciencia aplicada al Análisis de Desastres (Poljanšek et al., 2017), la tendencia de los accidentes recientes evidencia que el mundo está muy lejos de reducir el riesgo de accidentes industriales a niveles aceptables. Por lo que, las herramientas que permitan cuantificar la probabilidad de ocurrencia de estas cadenas de sucesos, así como su impacto global son fundamentales, para reforzar en la industria la seguridad operacional, en función de los puntos críticos de donde puedan generarse las cadenas de eventos más peligrosas (Smith et al., 2016 ; Wang et al., 2017 ; Cai et al., 2018).

En los últimos años se han combinado técnicas como la aplicación de las redes bayesianas de probabilidades, con el fin de emitir un criterio más acertado de seguridad industrial en función de evitar la ocurrencia de estos accidentes, y en especial, que no ocurra el efecto dominó (Zhao et al., 2018 ; Zhou et al., 2018 ; Kouk et al., 2018 ; Kabir y Papadopoulos, 2018 ; Kabir y Papadopoulos, 2019 ; Zarel et al., 2019 ; Koulinas et al., 2019).

La distribución dentro de una planta de proceso puede ser considerada como un conjunto de variables aleatorias, por ejemplo, cada variable puede representar a un equipo o a una unidad de proceso en dependencia del nivel de detalle del análisis. La probabilidad bayesiana es una medida de la confiabilidad de un suceso, representa una alternativa en la evaluación cuantitativa de riesgos debido a su estructura gráfica flexible que permite mostrar el orden secuencial de los escenarios.

Dentro del amplio campo industrial, la industria petrolera juega un papel fundamental en el desarrollo a nivel mundial. En Cuba existen refinerías, empresas de perforación de petróleo y empresas comercializadoras de combustibles que se encargan del procesamiento del petróleo crudo con distintos fines. Estas industrias representan en sí mismas un alto riesgo de incendio y explosión por el nivel elevado de inflamabilidad y volatilidad de las sustancias que manejan.

La División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas (DTCCM) es la encargada de recepcionar el crudo tratado de las Empresas de Perforación y Extracción de Petróleo de Occidente y Centro, y de su reducción de viscosidad a través de la adición de solventes para su comercialización posterior. Además, recibe otros combustibles de las

refinerías como la nafta, el fueloil, la gasolina y el combustible de aviación. La DTCCM posee cinco áreas fundamentales: la planta de Gas Licuado del Petróleo, la Terminal 320 (T-320), los muelles (PT1, PC2, PC3, Bayona y FP), la Base en Tierra (Supertanquero) y la Base de Crudos.

En la T-320 se almacenan diferentes combustibles como son la nafta, gasolina de aviación, diesel, fuel oil y turbocombustible; siendo esta área de interés a estudiar por las grandes capacidades de almacenamiento en los tanques y por los incidentes de incendio, derrames y fallos eléctricos ocurridos en la misma.

Por esta razón se plantea el siguiente **problema** de investigación: Se desconocen las consecuencias que puede generar la ocurrencia de cadena de accidentes de incendio y explosión sobre la economía, el ambiente y las personas en la T-320 de la DTCCM.

Para la resolución de este problema se expone la siguiente **hipótesis**: El uso de las técnicas de riesgos para predecir incendios y explosiones permitirá estimar el impacto económico, ambiental y humano que pueden producir los posibles accidentes que se puedan generar en la T-320 de la DTCCM.

Por lo que el **objetivo general** de este trabajo es: Pronosticar el impacto económico, ambiental y humano debido al carácter continuado de posibles accidentes de incendio y explosión en la Terminal-320 de la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas

Los **objetivos específicos** se listan a continuación:

- 1- Definir las características de los escenarios relacionados a incendios y explosiones en función de la sustancia de interés, así como su alcance.
- 2- Pronosticar la probabilidad conjunta del efecto continuado de accidentes primarios a través de una red bayesiana dentro de la T-320.
- 3- Evaluar el impacto económico, ambiental y humano debido al carácter continuado de estos accidentes en la T-320.

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se abordan diversas temáticas relacionadas con el análisis cuantitativo de riesgos. Se estudian herramientas que se emplean actualmente para la valoración del riesgo asociado a los posibles accidentes generados por incendios y explosiones en la industria. Luego, se explica el funcionamiento de las redes bayesianas y su papel en el análisis de riesgos. Finalmente, se describen las metodologías que se enfocan en cuantificar el impacto económico, ambiental y humano debido a escenarios de incendio y explosión, así como su posible escalado dentro del área. A partir del análisis de las técnicas encontradas en la bibliografía, se establecen las metodologías a aplicar en esta investigación.

1.1 Características de los posibles escenarios de incendio y explosión

En este epígrafe se analiza lo planteado por diferentes bibliografías, desde las clásicas de análisis de riesgos, como las más recientes, acerca de los escenarios que pueden manifestarse debido a incendios y/o explosiones; así como sus características fundamentales.

Los accidentes causados por el efecto dominó son los más destructivos y extremadamente importantes relacionados a las plantas industriales. Los incendios y las explosiones se encuentran dentro de los accidentes primarios más frecuentes a ocurrir durante el efecto dominó debido a las unidades que se encuentran bajo presión y el almacenamiento de sustancias inflamables y peligrosas (Jie et al., 2017; Zhang et al., 2017; Mukhim et al., 2017, Zarranejad y Ahmadi, (2016); Spoelstra et al., 2015; Kadri et al., 2013).

Según el Manual Práctico de Control de Riesgos de Accidentes Mayores Del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 1999), los incendios en la industria son los accidentes que se producen con más frecuencia, aunque las consecuencias medidas en pérdidas de vidas humanas pueden ser menores.

Según Casal *et al.*, (2002), Wells, (2003), y Aboud, (2008) el incendio, entre los diversos accidentes que pueden ocurrir en una industria, es el que tiene un radio de acción menor. No obstante, sus efectos pueden ser temibles, puesto que la radiación térmica puede afectar a otras partes de la planta y generar nuevos accidentes como explosiones y escapes. Además, el humo puede, además, complicar notablemente la actuación de los equipos de intervención y someterlos a un peligro adicional como la falta de visibilidad o intoxicación.

Según Casal *et al.*, (2002) y Zhou *et al.*, (2016) los estudios de diversa índole en el análisis histórico de accidentes han revelado que después de los escapes, el incendio es el que presenta un mayor número de registros, seguidos por la explosión y la formación de una nube de gas.

Gyenes *et al.*, (2017) y Vipin *et al.*, (2018) afirman que en caso de un derrame de un material inflamable existen diversos escenarios, en dependencia de la naturaleza del líquido derramado. Si cercano al derrame hay una potencial fuente de ignición, lo más probable a ocurrir es un charco de fuego. En caso de que no ocurra la ignición inmediata, este líquido se evapora y se forma una nube de vapor, la cual puede incendiarse o explotar si ocurre la ignición.

Luego de los incendios, las explosiones son los sucesos más comunes a nivel industrial. Se puede definir una explosión como una liberación repentina de energía, que genera una onda de presión que se desplaza alejándose de la fuente mientras va disipando energía. Esta liberación tiene que ser, no obstante, bastante rápida y concentrada para que la onda que se genera sea audible. No es necesario, pues, que se produzcan daños para poder considerar este fenómeno como explosión. La energía liberada puede haber sido almacenada inicialmente bajo una gran variedad de formas: nuclear, química, eléctrica o de presión (Sharma et al., 2018; HSE, 2018; Wells, 2003; Casal et al., 2002).

Las nubes de vapor no confinadas según Atkinson, (2017 a); Atkinson et al., (2017 b) y Casal et al., (2002) se generan a raíz del escape de una cantidad determinada de un vapor combustible, o bien de un líquido a partir del cual se formará el vapor; esto puede ocurrir en una planta de proceso, durante un transporte o por la rotura de un gaseoducto.

Las explosiones de nubes de vapor no confinadas representan uno de los mayores peligros dentro de la industria química ya que ocurren con mucha frecuencia (Huang, 2017). El problema principal de este tipo de explosiones proviene del hecho que, además, del alcance que puede llegar a tener la nube, la ignición de esta puede producirse en un punto alejado de la fuente origen del vertido y afectar a grandes áreas (Casal et al., 2002).

Las explosiones de tipo BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*) son uno de los peores accidentes que pueden ocurrir en la industria química (HSE, 2018; Gyenes et al., 2017; Laurent et al., 2016; Birk et al., 2016; Mishra et al., 2015; Hemmatian et al., 2014; Casal et al., 2002).

En realidad, cuando se habla de BLEVE, en general a lo que se hace referencia realmente es a la combinación de los fenómenos BLEVE + bola de fuego, esto es, a un accidente que involucra simultáneamente efectos térmicos y mecánicos. El origen puede ser diverso, pero una de las causas más frecuentes es la acción del fuego sobre un recipiente (Tauseef et al., 2018; Mishra et al., 2015; Casal et al., 2002).

Kidam y Hurme, (2013) plantean que los accidentes más frecuentes causados en equipos son los sucedidos en tuberías en un 25%, en reactores y tanques de almacenamiento con un 14%, y los tanques de proceso con un 10%. El 78% de los accidentes en equipos son debidos a fallas en el diseño y de técnicas ejecutadas por humanos. Las razones organizacionales y puramente humana son responsables en un 33% de los tanques de almacenamientos, un 18% de las tuberías y un 16% de los equipos de transferencia de calor.

Tanto en la bibliografía clásica como el Manual Práctico del PNUMA (PNUMA, 1999), como en la más reciente de la Comisión de Comunidades Europeas (Blengini *et al.*, 2017), (Gyenes *et al.*, 2017) se plantea que los incendios y explosiones son de los accidentes más frecuentes en la industria, de ahí la importancia de su estudio y evaluación de su impacto. A criterio del autor de este trabajo, en base a lo analizado en la bibliografía especializada, los escenarios relacionados a incendios y/o explosiones que se deben analizar son: charco de fuego, nube de vapor explosiva y BLEVE más bola de fuego. Además, se tiene evidencia, de que en los tanques de almacenamiento ocurren una gran parte de accidentes provocados por incendios y explosiones; por lo que en estos se va a enfatizar el análisis posterior.

1.2 Análisis histórico del efecto dominó en las instalaciones industriales

En este epígrafe se explican las formas en que puede ocurrir el efecto dominó en los procesos industriales. Se realiza un resumen del análisis histórico de accidentes referido por los investigadores de la temática relacionado a los casos de efecto dominó ocurridos en la historia. Finalmente, se emite un criterio acerca del escalado de accidentes en el almacenamiento de hidrocarburos.

El análisis histórico de accidentes es una forma de estudiar cómo y cuándo los accidentes pueden ocurrir y de determinar cuáles son las secuencias más comunes en las que ocurren. El estudio de accidentes específicos muestra qué se hizo erróneamente y cuáles son las medidas que deberían ser aplicadas para evitar su ocurrencia en el futuro (Clini *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2016; Casal y Darbra, 2013).

El estudio de los accidentes que han ocurrido en las industrias de procesos o en el trasiego de materiales peligrosos resulta muy importante debido a dos principales razones: primero, porque los accidentes reales son una fuente de datos experimentales obtenidos a partir de accidentes mayores de gran escala, un campo en el cual el trabajo experimental es muy difícil y caro y en muchos casos es prácticamente imposible; segundo, para la identificación de un número de posibles fallas que sirven de base para la evaluación de riesgos y para mejorar las estrategias en prevención de accidentes (Casal y Darbra, 2013).

Existen diversos autores que han definido el concepto de efecto dominó para accidentes en instalaciones industriales como son: HSE, (1984); Bagster y Pitblado, (1991); Lees, (1996); Khan y Abbasi, (1998); Delvosalle *et al.*, (1998); Uijt de Haag y Ale, (1999);

CCPS, (2000); Vallee *et al.*, (2002); Post *et al.*, (2003); Lees, (2005); Cozzani *et al.*, (2006); Gorrens *et al.*, (2009); Antonioni *et al.*, (2009). Estas definiciones se muestran en el anexo 1 y todas coinciden en que el efecto dominó se refiere a la generación de nuevos accidentes (secundarios) producto de otros, sucedidos con anterioridad (primarios) en los que la magnitud de las consecuencias globales de los eventos es mucho mayor que la magnitud referida al accidente primario solamente.

Específicamente, el análisis histórico referido al efecto dominó es una tarea compleja ya que las bases de datos de accidentes generalmente contienen información incompleta acerca de estos y en muchos casos se hace difícil determinar hasta qué nivel ocurrió la secuencia del efecto dominó (Khakzad, 2018; Casal y Darbra, 2013; Abdolhamidzadeh *et al.*, 2010).

Abdolhamidzadeh *et al.*, (2009) estudiaron un conjunto de 73 accidentes dominó que ocurrieron entre 1917 y 2008 en plantas industriales y en trasiego. Ellos analizaron el tipo de actividad, las sustancias involucradas, el nivel del efecto dominó y el impacto sobre la población afectada. La relación que fue establecida por estos investigadores entre las secuencias dominó de un primer nivel y de un segundo nivel fue 2,2.

Darbra *et al.*, (2010) analizaron 225 accidentes relacionados a efectos dominó que ocurrieron en plantas de procesos y almacenamiento y en el trasiego de materiales peligrosos que ocurrieron entre 1961 y 2007. Entre los aspectos analizados incluyeron la localización del accidente, el tipo de accidente, los materiales involucrados, las causas y consecuencias y la secuencia más común de accidente. El análisis resultó en que las causas más frecuentes fueron: eventos externos (31%) y fallas mecánicas (29%). La

secuencia de efecto dominó fue analizada empleando la técnica probabilística árbol de eventos.

Finalmente, Abdolhamidzadeh *et al.*, (2011) publicaron un inventario de 224 accidentes mayores relacionados a efectos dominó que ocurrieron entre 1917 y 2009, 175 de los cuales ocurrieron entre 1970 y 2009. Una cierta cantidad de estos accidentes analizados ocurrieron en países no desarrollados económicamente.

Acorde a lo publicado por Kourniotis *et al.*, (2000), la relación entre el número de accidentes que incluyen un efecto dominó (80) y el número de accidentes que incluyen una secuencia de al menos dos efectos dominó (34) fue 2,3, un valor muy similar al que fue obtenido por Abdolhamidzadeh *et al.*, (2009).

Los accidentes dominó generalmente incluyen más de una sustancia, por ejemplo, Darbra *et al.*, (2010) identificaron 335 sustancias en los 225 accidentes analizados. Las sustancias inflamables están asociadas con la mayoría de estos accidentes. Darbra *et al.*, (2010) y Abdolhamidzadeh *et al.*, (2011) obtuvieron exactamente que un 89% de las sustancias relacionadas a los accidentes de efecto dominó fueron sustancias inflamables (Reniers *et al.*, 2017).

Abdolhamidzadeh *et al.*, (2011) analizaron la variación del número de fatalidades en función del tiempo y obtuvieron una tendencia ascendente lo cual estuvo significativamente influenciado por los valores excepcionales correspondientes a los accidentes en la década de 1980-1990 (con los accidentes de Tocoa, Venezuela con 150 muertes y en la ciudad de México con 503 muertes).

Un aspecto interesante de accidentes con efecto dominó es la longitud de la secuencia de accidentes y la cantidad de eventos que ocurrieron durante los mismos. Abdolhamidzadeh *et al.*, (2011) encontraron en su investigación, que el 53% de los accidentes involucraron un evento primario y un evento secundario, mientras que, el 47% incluía un evento terciario o eventos de escalado de nivel superior. Darbra *et al.*, (2010) analizaron las secuencias dominó y solo encontraron un caso de accidente con un cuarto nivel en la secuencia que fue incendio-explosión-incendio-explosión.

Las secuencias de efecto dominó más comunes fueron: explosión-incendio (27,6%), incendio-explosión (27,5%) e incendio-incendio (17,8%). De los 225 accidentes considerados, 193 involucran un efecto dominó (por ejemplo, evento primario más accidentes secundarios), mientras que, solo 32 involucraron al menos dos efectos dominó (una secuencia de evento primario más un evento secundario más accidentes terciarios). Esto da como resultado, una relación entre el primer nivel y el segundo nivel de efecto dominó de 6 (Casal y Darbra, 2013).

En el anexo 2 se muestran las diferentes alternativas de propagación que se pueden asumir en el análisis de los escenarios dominó. Una propagación simple se asume, a partir de la definición de la correspondencia uno a uno, que es, un escenario primario simple que provoca un simple escenario secundario. Alternativamente, se tiene propagación del tipo segundo, tercero y cadena multinivel: un escenario de accidente primario que provoca un escenario de accidente secundario, a su vez, el segundo escenario secundario provoca un escenario de accidente terciario y así sucesivamente (Chen *et al.*, 2018; Nomen *et al.*, 2014; Reniers y Cozzani, 2013).

Actualmente, se considera que en accidentes dominó severos, la propagación del accidente primario resulta en escenarios múltiples secundarios simultáneos provocados por el accidente primario. Los eventos secundarios que son, además, provocados por más de un escenario, definen una propagación multinivel paralela compleja (Reniers y Cozzani, 2013).

En el caso de una propagación simple el efecto dominó se clasifica como interno, espacial, serial y con cardinalidad cero.

Los eventos dominó caracterizados con cardinalidad cero son los eventos dominó iniciadores o los llamados eventos dominó primarios, mientras que la cardinalidad uno se refiere a los eventos dominó secundarios; la cardinalidad dos, a los eventos dominó terciarios y así sucesivamente (Reniers y Cozzani, 2013).

A criterio del autor de este trabajo el análisis histórico de accidentes evidencia una tendencia ascendente en cuanto al número de muerte provocada por los mismos en los últimos años; además este involucra generalmente más de una sustancia. La secuencia del efecto dominó debe ser estudiada hasta los posibles accidentes cuaternarios puesto que a partir de aquí la probabilidad de escalado disminuye cuantitativamente. Para el análisis se tendrá en cuenta las clasificaciones propuestas por Reniers y Cozzani, (2013) en cuatro tipos: interno o externo, directo o indirecto, temporal o espacial y serial o paralelo; además, se tendrá en cuenta el concepto de cardinalidad para caracterizar el evento dentro de la secuencia dominó. Debido a las características complejas que definen en sí mismo el escalado de los accidentes, se hace indispensable, el uso de técnicas avanzadas como las redes bayesianas, para su análisis.

1.3 Uso de las redes bayesianas en el análisis de riesgos

En este epígrafe se analiza el uso de las redes bayesianas en el análisis de riesgos actual con la finalidad de cuantificar la probabilidad conjunta de la cadena de sucesos.

Con el objetivo de evaluar la frecuencia de los escenarios dominó se pueden aplicar las redes bayesianas, aprovechando su estructura gráfica flexible para mostrar el orden secuencial de los escenarios y las relaciones probabilísticas entre un gran número de variables y hacer inferencia probabilística con esas variables (Leoni et al., 2019; Simon et al., 2019; Shi et al., 2019; Wang et al., 2018; Zarel et al., 2019; Vieira et al., 2017; Gill y Malamund, 2016).

Según Conrady y Jouffe, (2015) Judea Pearl se acredita con la invención de las redes bayesianas, como un formalismo matemático empleado para la definición de modelos de probabilidad complejos. Su trabajo no solo revolucionó el campo de la inteligencia artificial, también se convirtió en una herramienta esencial para otras muchas ramas de la ingeniería y las ciencias naturales.

Las redes bayesianas se han convertido en una de las herramientas más completas, coherentes y autosostenidas entre las usadas para la adquisición de conocimientos, representación y aplicación a través de sistemas computarizados (Leoni et al., 2019; Simon et al., 2019; Zarel et al., 2019; Behnaz et al., 2018; Bouhamed et al., 2015).

Una red bayesiana es un gráfico acíclico dirigido para razonar bajo incertidumbre en el que los nodos representan variables y están conectados mediante arcos dirigidos (Shi et al., 2019; Leoni et al., 2019; Villa y Cozzani, 2016).

Los arcos denotan dependencias o relaciones causales entre los nodos vinculados, mientras que las tablas de probabilidad condicional asignadas a los nodos determinan el tipo y la fuerza de tales dependencias. En una red bayesiana, los nodos desde los que se dirigen los arcos se denominan nodos principales, mientras que los nodos a los que se dirigen los arcos se denominan nodos secundarios. De hecho, un nodo puede ser simultáneamente el hijo de un nodo y el padre de otro nodo. Los nodos sin padre y los nodos sin hijo se denominan nodos raíz y nodos hoja, respectivamente (Reniers y Cozzani, 2013; Jensen et al., 2007).

Los modelos probabilísticos basados en gráficos acíclicos dirigidos (DAG) tienen una larga utilización en la historia. El reverendo Thomas Bayes formuló lo que se conoce actualmente como su teorema y sustenta el principio de la red bayesiana de probabilidades. El teorema de Bayes se muestra en la ecuación 1.1.

$$P(A/B) = P(A) \cdot \frac{P(B/A)}{P(B)} \quad (1.1)$$

Esto significa que la probabilidad condicional de A dado B, también denominada probabilidad posterior porque se deriva a partir del valor especificado de la probabilidad de B, es equivalente a la productoria de la probabilidad de A, por el factor de Bayes o relación de probabilidades, que se define como la probabilidad de B dado el evento A, entre la probabilidad de B (Conrady y Jouffe, 2015).

El diseño de una planta química o de proceso puede considerarse como un conjunto de variables (es decir, cada variable representa una unidad o un elemento de equipo, dependiendo del nivel de detalle del análisis). Una red bayesiana se puede utilizar para

modelar cualitativa y cuantitativamente la influencia de las unidades entre sí mediante arcos causales y tablas de probabilidad, para estimar la probabilidad de efecto dominó en diferentes niveles y para actualizar las creencias iniciales a medida que se dispone de nueva información (Khakzad et al., 2013).

En la tabla 1.1 se muestra un resumen de los diferentes usos de las redes bayesianas dentro del análisis de riesgos, según diferentes autores.

Tabla 1.1: Usos de las redes bayesianas dentro del análisis de riesgo.

Uso de las redes bayesianas	Referencia
Determinación de los niveles de seguridad	Cai et al., (2018)
Modelo de seguridad para almacenamiento de gas natural	Leoni et al., (2019)
Seguridad en operación de tuberías submarinas	Li et al., (2019)
Análisis de probabilidad de falla y derrame de tuberías de gas y petróleo	Li et al., (2016)
Análisis de riesgo de explosión en plataforma petrolera	Shi et al., (2019)
Evaluación de niveles de seguridad	Simon et al., (2019)
Probabilidad de incendio en plataforma petrolera	Wang et al., (2017)
Análisis de seguridad industrial basado en datos reales	Zhou et al., (2017)

Luego de analizar lo planteado por los investigadores de esta temática el autor de este trabajo considera que la distribución bayesiana de probabilidades es ideal para cuantificar

la probabilidad de ocurrencia de cadenas de eventos a partir de un accidente primario de incendio y explosión, por su forma flexible y adaptable y por considerar nueva información relacionada a accidentes en el cálculo de esta probabilidad.

1.4 Índices utilizados para la cuantificación del impacto económico, ambiental y humano de accidentes de incendio y explosión

En este epígrafe se estudian las herramientas encontradas en la literatura especializada, que permitan cuantificar el impacto que causan los accidentes provocados por incendios y explosiones tanto a los bienes materiales de la industria, como al medio ambiente y a las personas

1.4.1 Herramientas que cuantifican el impacto económico de accidentes de incendio y explosión

Los índices de riesgo tecnológico según sus efectos se estructuran en tres grandes categorías fundamentales en función de su nivel de descripción de la realidad:

- 1) Índices basados en la definición matemática de riesgo.
- 2) Índices basados en la carga de fuego.
- 3) Índices basados en la peligrosidad de las sustancias químicas.

En el anexo 3 se muestran los índices clasificados por su grado de descripción de la realidad según Carol, (2001). Se va a profundizar en los índices basados en la

peligrosidad de las sustancias químicas, puesto que son los de grado de descripción más alto y de interés en este trabajo.

El método IFAL (*Instantaneous Fractional Annual Loss*) fue publicado en 1979 por el *Insurance Technical Bureau*. Se basa en el cálculo de la pérdida anual esperada, expresada como fracción del total del valor de la planta evaluada, promediada durante un largo período de años, y suponiendo que durante ese período las condiciones de operación se mantengan constantes (Lees, 2012).

Según Carol, (2001), Allen, (2009), Zarranejad y Ahmadi, (2016) el Índice de Incendio y Explosión ha sido desarrollado por la empresa Dow y está ampliamente respaldado por el AICHE (*American Institute of Chemical Engineers*). Constituye un índice de riesgo exclusivo para incendios y explosiones, pero especialmente desarrollado para empresas químicas con un riesgo significativo.

Las mediciones cuantitativas empleadas en el análisis se basan en datos históricos, en la energía potencial de los materiales en el estudio y en las extensiones en las que ocurren estos fenómenos. (AICHE, 1994).

El índice Mond fue desarrollado por *Imperial Chemical Industries* (ICI) y apareció su primera versión en el año 1979. ICI en 1985 publicó su segunda edición. (ICI, 1985).

Es un índice de riesgo de incendio y explosión aplicable a industrias de proceso de gran capacidad productiva. Tiene la limitación de que la toxicidad de los materiales involucrados o de los que posiblemente se generan en un accidente se contempla

solamente como un factor agravante en las tareas de control y limitación de la incidencia y no como un posible riesgo en sí mismo. (Carol, 2001).

Existen semejanzas entre este método y el Dow. Sin embargo, la evaluación del índice de riesgo Mond no se limita al producto de unos factores por otros, sino que introduce en la fórmula de cálculo exponentes fraccionarios y correcciones por temperatura o presión. (Carol, 2001).

El índice de la *Unión des Chambres Syndicales de l'Industrie du Pétrole*. (Método UCSIP) es un método desarrollado por la *Unión des Chambres Syndicales de l'Industrie du Pétrole* en Francia. Sus objetivos son el análisis semicuantitativo de riesgos en términos de probabilidad y gravedad, que se integran en el cálculo del factor de seguridad. En ocasiones es preferible abordar un análisis cuantitativo de riesgos completo (Carol, 2001).

El índice de riesgo de procesos químicos (INSHT) fue elaborado por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo y pretende la evaluación sistemática de todos los riesgos, tecnológicos y laborales, presentes en las plantas de tipo químico, con aportaciones muy significativas en cuanto a las hojas de trabajo y la parametrización de los factores de riesgos. (INSHT, 1995).

La primera evaluación del índice *Chemical Exposure Index* de Dow (CEI) fue elaborada en 1986 por Dow y contempla el riesgo de exposición a contaminantes químicos derivado de un accidente tecnológico agudo. No es un índice de riesgo de incendio como los anteriores y es exclusivo para aplicar en industrias químicas o que manipulen sustancias tóxicas o peligrosas (Carol, 2001).

A criterio del autor de este trabajo, el Índice de Incendio y Explosión de Dow, es la herramienta más adecuada para evaluar el impacto económico de accidentes provocados por incendios y explosiones. Las razones por las cuales no se selecciona ninguno de los otros índices son las siguientes:

- El método IFAL es ideal para las condiciones de diseño de una planta, que no es el caso de esta investigación.
- El Índice Mond no contempla los cálculos sobre la pérdida de beneficios, el área afectada o los días de paralización, lo cual, sí realiza el Índice de Incendio y Explosión de Dow.
- El índice de la *Unión des Chambres Syndicales de l'Industrie du Petrole*. (Método UCSIP) necesita para su aplicación soportes informáticos avanzados debido a la complejidad matemática que presenta.
- El índice de riesgo de procesos químicos (INSHT), contempla los riesgos toxicológicos, los cuales no están dentro del objetivo de este trabajo.
- El índice *Chemical Exposure Index* de Dow únicamente estima la peligrosidad de manipular una sustancia peligrosa en un área determinada.

Se conoce que el Índice de Incendio y Explosión de Dow, no tiene en cuenta los accidentes por otros escenarios que no sean incendios o explosiones, pero tampoco está dentro del objetivo de esta investigación. Tampoco considera los daños provocados al medio ambiente, ni a los recursos humanos, pero se aclara, que este se selecciona para evaluar el impacto económico, lo cual sí realiza de forma adecuada. En los acápites

siguientes se analizan diversas técnicas para la cuantificación de los impactos ambiental y humano.

1.4.2 Herramientas que cuantifican el impacto ambiental de accidentes de incendio y explosión

En este epígrafe se estudian diversas técnicas que permiten cuantificar el impacto de incendios y explosiones sobre el ambiente, específicamente sobre la atmósfera.

La NFPA, (1994) desarrolló un sistema que indica la inflamabilidad, reactividad y peligros para la salud de químicos peligrosos. El sistema se basa en dar un número de 0 a 4 a un químico, indicando su efecto. Índices detallados se consideran usualmente en muchos efectos ambientales o estudios, en detalles, de ciertos efectos sobre la vida en la planta. (Aboud, 2008).

El índice de peligro atmosférico (AHI) propuesto por Gunasekera y Edwards, (2003) se usa para evaluar el impacto potencial de partículas transportadas por el aire relacionadas a productos químicos. Se asume una falla catastrófica de la planta y se estima el impacto sobre el ambiente atmosférico. El método se diseña para evaluar posibles alternativas de roturas en un proceso donde se escape un compuesto químico. El peligro primario en la industria química reside en el material, ya que este está presente, hasta solo en el almacenamiento y, desde luego, en el procesamiento u otra actividad.

El índice *Indiana Relative Chemical Hazard Score* (IRCHS) cuantifica la sostenibilidad por un índice ambiental, índice de seguridad y el incremento de la ganancia para el proceso por el valor añadido (Aboud, 2008).

Blengini *et al.*, (2017) proponen un Índice de Sustitución en función de cambiar sustancias dañinas al medio ambiente por otras menos dañinas, en función de su costo. Este se basa en la toxicología de las sustancias a sustituir.

Conesa, (2000) define la Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) como un proceso de análisis encaminado a identificar, predecir, interpretar, valorar, prevenir o corregir y comunicar, el efecto de un Proyecto sobre el Medio Ambiente.

Uno de los gases más tóxicos que afectan a la atmósfera es el monóxido de carbono, el cual, durante un incendio, aumenta considerablemente su concentración en la atmósfera. Existe una función de transformación para la concentración del mismo en calidad ambiental. (Conesa, 2000).

Además, la cantidad de dióxido de carbono generada es considerable y está en función del flujo de combustible que interviene en la combustión. Existen ecuaciones que permiten cuantificar la cantidad de este gas, causante principal del efecto invernadero, propuestas por Garg *et al.*, (2006).

El humo reduce considerablemente la visibilidad, en función de la densidad óptica del combustible (Hadjisophocleous y Benichou, 2016). Puede ser cuantificado el flujo de humo que se genera a partir de un incendio de hidrocarburo según Shawn, (2009).

En cuanto a la evaluación del impacto ambiental, el autor de este trabajo, considera que la metodología ofrecida por Conesa, (2000) es la que permite, a través de funciones, emitir un criterio de calidad ambiental en función de la magnitud de un impacto determinado. Este impacto se define como la concentración de monóxido de carbono que se produce

durante un incendio. Además, se evaluará el impacto ambiental, en cuanto a la producción de humo de un incendio, y las emisiones de dióxido de carbono.

1.4.3 Herramientas que cuantifican el impacto humano de accidentes de incendio y explosión

Los accidentes por incendio, dañan a los recursos humanos debido al valor elevado de calor por radiación, mientras que las explosiones, lo hacen, a través del efecto de la onda expansiva u onda de choque. En este epígrafe se relacionan las herramientas que permiten cuantificar el impacto en los recursos humanos de este tipo de accidentes.

About, (2008) propone un índice simple K, partiendo de la definición básica de riesgo, el cual se considera el producto de la probabilidad del incidente con la magnitud de sus efectos peligrosos. Este índice se puede aplicar a plantas químicas, empleando las propiedades de los químicos asociados a la producción. Es un índice que cuantifica riesgo a la vida humana.

El Índice de Severidad de Biodiversidad (BSI) descrito en el epígrafe anterior, también evalúa impacto humano, en cuanto a toxicidad. (Denat, 2017).

Según Casal *et al.*, (2002), Wells, (2003) y Sanmiquel *et al.*, (2018) para realizar una estimación de las consecuencias se requiere una función que relacione la magnitud del impacto, con el grado de daño causado por el mismo; se debe establecer una relación entre la dosis y la respuesta. El método más utilizado es el del análisis *Probit*, que relaciona la variable Probit (de *probability unit*) con la probabilidad.

La Probit Y es una medida del porcentaje de la población vulnerable sometida a un fenómeno perjudicial de una determinada intensidad (V), que recibe un daño determinado. Tiene una distribución normal, con una media de 5 y una desviación normal de 1. La relación entre la variable Probit (Y) y la probabilidad P es la que se muestra en la ecuación 1.2.

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left[-\frac{V^2}{2}\right] dV \quad (1.2)$$

El riesgo individual es el riesgo anual de muertes o lesiones graves a las que se encuentran expuestos varios individuos específicos. Es la probabilidad de muerte de una persona promedio sin protección que está constantemente presente en un lugar determinado y que está expuesta a un peligro (Jongejan et al., 2010).

El riesgo individual, por lo general, se expresa en forma de curvas de isorriesgos (Renjith y Madhu, 2010) y se puede estimar para el individuo más expuesto, para grupos de individuos en lugares específicos o para un individuo promedio en una zona de efecto (AIChE / CCPS, 2000).

En función de lo analizado, se escogen las ecuaciones Probit Y para cuantificar el impacto humano a través de los mapas de isorriesgos. Se escogen para este trabajo las ecuaciones propuestas por Lees, (2012) para calcular los daños por sobrepresión y quemaduras por radiación; mientras que se escoge la ecuación de Wells, (2003) para porcentaje de muertes por hemorragia pulmonar debido a una sobrepresión.

1.5 Conclusiones parciales del capítulo

Una vez finalizado el presente capítulo, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones parciales:

- 1) El análisis histórico de accidentes evidencia una tendencia ascendente de muertes provocadas por el carácter continuado de los mismos y muestra que los escenarios posibles son: charco de fuego, nube de vapor explosiva y BLEVE.
- 2) La secuencia del efecto dominó es más probable que se desarrolle, como máximo, hasta los posibles accidentes cuaternarios; a la vez, las redes bayesianas representan una técnica de alto prestigio para cuantificar la probabilidad de ocurrencia de los mismos.
- 3) El Índice de Incendio y Explosión de Dow es una herramienta esencial para evaluar el impacto económico de accidentes de incendios y explosiones.
- 4) La metodología de Conesa, (2000) ofrece criterio de calidad ambiental en función de la concentración de contaminantes.
- 5) Los mapas de isorriesgos son herramientas adecuadas para cuantificar el daño sobre las personas por radiación y sobrepresión, ya que tienen en cuenta la vulnerabilidad determinada a través de las ecuaciones Probit Y de Lees, (2012) y Wells, (2003).

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se explican las metodologías que serán empleadas para el cumplimiento del objetivo de esta investigación. Primero, se muestra la secuencia lógica de análisis, resultado del análisis bibliográfico previamente realizado. Segundo, la descripción tecnológica del área estudiada: T-320. Finalmente, se detallan cada una de las etapas dentro del algoritmo propuesto en el marco de esta investigación; así como, los programas necesarios para el desarrollo del mismo.

En la figura 2.1 se muestra la secuencia de análisis propuesta para esta investigación, provista de ocho etapas fundamentales que se listan a continuación:

- Etapa 1: Selección de la unidad de proceso.
- Etapa 2: Simulación de todos los escenarios de incendio y explosión para cuantificar los vectores de escalado.
- Etapa 3: Cuantificación de la probabilidad de escalado para cada unidad de proceso y comparación de los valores umbrales con los vectores de escalado.
- Etapa 4: Aplicación del Índice de Unidad Primaria Potencial (IUPP) para la identificación de las unidades primarias potenciales.
- Etapa 5: Confección de la red bayesiana y simulación de la misma en Hugin para determinar las probabilidades necesarias.
- Etapa 6: Predicción del impacto económico debido al carácter continuado de estos accidentes.
- Etapa 7: Predicción del impacto ambiental debido al carácter continuado de estos accidentes.
- Etapa 8: Predicción del impacto humano debido al carácter continuado de estos accidentes.

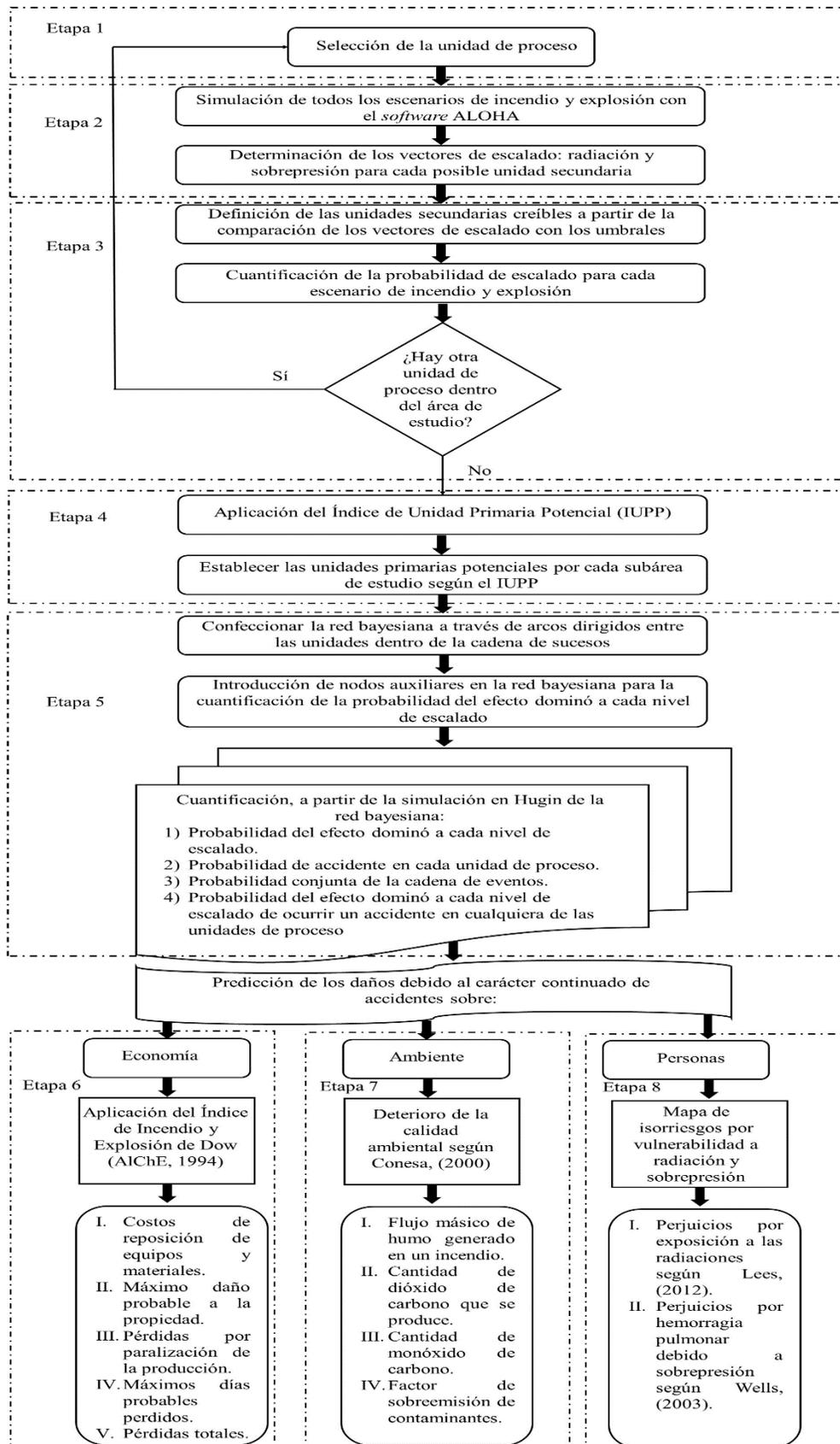


Figura 2.1: Secuencia de análisis propuesta para la investigación

2.1 Etapa 1: Selección de la unidad de proceso

Esta primera etapa dentro de la secuencia se refiere a la selección de una unidad de proceso dentro del área, para su posterior análisis. Para poder hacer una correcta selección de la misma, es necesario realizar una caracterización tecnológica dentro del área.

La T-320 está diseñada para el almacenamiento y entrega de productos claros y oscuros, a través de alineaciones: para camiones cisternas, tanques cisternas a buques en los muelles y oleoducto para la entrega a la CTE José Martí. También se realizan las operaciones de carga de productos en transporte ferrocarril. En la T-320 se efectúan operaciones de preparación de mezclas y trasiegos entre tanques para garantizar la disponibilidad de los diferentes combustibles.

En la T-320 se almacenan diferentes tipos de combustibles, en cuanto a sus valores de volatilidad e inflamabilidad. Estos hidrocarburos son:

- 1- Diesel.
- 2- Gasolina de aviación.
- 3- Turbocombustible.
- 4- Nafta.
- 5- *Fuel oil*.

Para el análisis se requiere información más detallada que se expone en el anexo 4 donde se muestra la caracterización de los tanques analizados en la T-320 según el Manual de Operaciones, (2018).

2.2 Etapa 2: Simulación de todos los escenarios de incendio y explosión para cuantificar los vectores de escalado

Para la simulación y para determinar el alcance y las características que presentan cada uno de los escenarios de incendios y explosiones se utilizará el *software* ALOHA. Este es reconocido por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba (CITMA) como un buen simulador de estos escenarios y cuenta con alto prestigio internacional.

Con los resultados obtenidos con este *software* se cuantifican los vectores de escalado: radiación y sobrepresión.

2.2.1 Definición de los escenarios y equipos afectados

Los escenarios se definen teniendo en cuenta parte del análisis bibliográfico, a partir de la caracterización del área y de las propiedades de las sustancias, que son combustibles líquidos con alto grado de inflamabilidad y volatilidad. En el anexo 5 se muestran los datos de las mismas.

2.2.2 Características y particularidades del *software* ALOHA

ALOHA es el acrónimo que se emplea para designar el programa de Ubicaciones Zonales de Atmósferas Peligrosas. Este se ha diseñado para emplearlo por responsables de los servicios de emergencias ante accidentes químicos, así como para la planificación y entrenamiento ante situaciones de emergencia.

El programa ALOHA emplea en sus cálculos dos modelos de dispersión: un modelo Gaussiano para gases ligeros que ascienden rápidamente, y el modelo de Degadis para gases densos que se dispersan a ras de suelo. Estos modelos predicen la velocidad de emisión de vapores químicos que escapan a la atmósfera desde tuberías rotas, fugas de tanques, charcos de líquidos tóxicos en evaporación o directamente desde cualquier otra fuente de emisión. Por lo que, ALOHA es capaz de estimar cómo una nube de gas peligrosa podría dispersarse en la atmósfera después de una descarga química accidental. Contiene una base de datos con información sobre las propiedades físicas de unos 1000 productos químicos peligrosos. Sus cálculos representan un balance entre exactitud y velocidad, puesto que se ha diseñado para que puedan usarlo los responsables de los servicios de emergencia.

ALOHA ha sido desarrollado conjuntamente por las agencias norteamericanas NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) y EPA (*Environmental Protection Agency*). (User's Manual ALOHA, 2016).

ALOHA brinda como resultado la velocidad promedio de descarga durante el accidente. Se dibujan zonas de riesgo que representan el área en cuyo interior la concentración a nivel del suelo de un gas contaminante excederá del Nivel de Preocupación (LOC: *Level of concern*) seleccionado por el usuario, después de iniciarse la descarga accidental.

El nivel de preocupación (LOC) se define como el valor umbral a partir del cual se considera que los seres vivos y bienes materiales dentro de dicha zona se encuentren en peligro. Ese peligro puede ser de varios tipos: toxicidad, inflamabilidad o riesgo de

incendio, radiación térmica emitida por un incendio y sobrepresión de una nube de vapor que puede causar una explosión.

Si se eligen tres niveles de preocupación, ALOHA mostrará las zonas de preocupación en tres colores: rojo, naranja y amarillo. La zona roja representa el área de mayor peligro, y las zonas naranjas y amarillas las áreas de menor peligro respectivamente.

En el caso de compuestos inflamables que no han comenzado a arder, ALOHA es capaz de mostrar el área de tres posibles escenarios de peligro:

1. Dispersión de una Nube tóxica (*Toxic Area of Vapor Cloud*).
2. Zonas de Inflamabilidad elevada (*Flammable Area of Vapor Cloud*).
3. Riesgo de explosión debido a la acumulación de vapores (*Blast Area of Vapor Cloud Explosion*).

En el mapa de la Zona de Riesgo, las líneas de trazos representan la incertidumbre en la dirección del viento, y las líneas continuas alrededor de la zona sombreada representan las líneas de confianza de la dirección del viento, donde la probabilidad de que la nube de gas permanezca es superior al 95%.

Se utilizan tres valores de LOC para radiación:

- Rojo: 10 kW/m²: Potencialmente letal en el intervalo de 60 segundos.
- Naranja: 5 kW/m²: Quemaduras de segundo grado en el intervalo de 60 segundos
- Amarillo: 2 kW/m²: Dolor en 60 segundos.

Cuando se modela un escenario de explosión, ALOHA sugiere tres valores de sobrepresión por defecto basados en fuentes ampliamente aceptadas. El programa utiliza estos valores umbrales para crear las siguientes zonas de riesgo:

- Rojo: 8.0 psi: destrucción de edificios.
- Naranja: 3.5 psi: probables lesiones graves.
- Amarillo: 1.0 psi: rotura de cristales.

Los resultados de ALOHA pueden ser poco fiables si se dan las condiciones siguientes:

- Velocidades de viento muy bajas.
- Condiciones atmosféricas muy estables.
- Desigualdad de concentración cerca de la fuente de emisión del contaminante.
- Cambios de viento y efectos de conducción del terreno.

Además, ALOHA no tiene en cuenta los efectos de:

- Subproductos de incendios, explosiones y reacciones químicas.
- Partículas sólidas o radiactivas, los procesos de deposición seca y húmeda que les afectan.
- Mezclas de compuestos químicos, no los modela.
- Terreno, supone que el suelo es plano alrededor del accidente.
- Fragmentos peligrosos tras una explosión, no se modela su trayectoria.

2.3 Etapa 3: Cuantificación de la probabilidad de escalado para cada unidad de proceso y comparación de los valores umbrales con los vectores de escalado

Para determinar la probabilidad de escalado se debe determinar previamente el tiempo de falla. Este depende, en caso de escenarios de incendios, del volumen del tanque y de las radiaciones recibidas. Cuando se manifiestan escenarios de explosión solo depende de la

sobrepresión. Para estas determinaciones se utiliza las ecuaciones propuestas en la metodología de Cozzani *et al.*, (2007).

En la tabla 2.1 se muestran las ecuaciones que se utilizan para el cálculo.

De esta manera se calculan los valores Probit y luego, a través del *software Matlab*, se determinan las probabilidades de escalado de los accidentes primarios con escenarios de incendio y explosión. En el anexo 6 se muestra la programación que se realizó en *Matlab*.

Tabla 2.1: Modelos de vulnerabilidad para tanques a presión atmosférica

Vector de escalado	Valor umbral	Tipo de modelo de probabilidad	Modelo de probabilidad	Ecuación
Radiación	I>15 kW/m ²	Modelo Probit basado en <i>tff</i> y modelos para <i>tff</i> vs. radiación.	$Y = 9.25 - 1.847 \cdot \ln(tff / 60)$	2.1
			$\ln(tff) = -1.13 \cdot \ln(I) - 2.67 \cdot 10^{-5} V + 9.9$	2.2
Sobrepresión	P>22 kPa	Modelo Probit, basado en el pico de sobrepresión estática.	$Y = -18.96 + 2.44 \cdot \ln(P_s)$	2.3
<i>tff</i> es tiempo de falla en segundos, <i>V</i> es el volumen del tanque en m ³ , <i>I</i> es la radiación en kW/m ² y <i>P_s</i> es el pico de sobrepresión en Pa.				

Fuente: Cozzani *et al.*, (2007).

2.4 Etapa 4: Aplicación del Índice de Unidad Primaria Potencial (IUPP) para la identificación de las unidades primarias potenciales

Las unidades de procesos primarias se determinaron a partir del algoritmo que se muestra en el anexo 7.

A partir de un análisis exhaustivo de lo planteado en la literatura especializada, se establecen los siguientes cuatro factores como los determinantes de la potencialidad de las unidades de procesos de iniciar la cadena de eventos dominó:

- Capacidad de almacenamiento de la unidad de proceso (V).
- Volatilidad de la sustancia (Nf).
- Frecuencia del suceso inicial (F).
- Probabilidad de escalado promedio (Pe).

La capacidad de almacenamiento de la unidad de proceso se toma como el volumen máximo del tanque que compone la unidad de proceso en sí. La volatilidad de la sustancia se obtiene a partir del *software* CAMEO *Chemicals* (desarrollado por la EPA). La frecuencia del suceso inicial se obtiene a partir de la aplicación del árbol de eventos teniendo en cuenta el análisis histórico de accidentes de los últimos diez años de explotación. La probabilidad de escalado se determina por la media de las probabilidades de escalado de esa unidad de proceso respecto al resto de las unidades de procesos existentes en el área de estudio.

En la ponderación de cada factor se tuvo en cuenta el criterio de expertos.

Se procede a calcular el IUPP y se seleccionan las unidades de procesos de mayor valor dentro de cada una de las tres subáreas establecidas.

2.5 Etapa 5: Confección de la red bayesiana y simulación en Hugin

Para la confección de la red bayesiana para su posterior simulación en el *software* Hugin, es necesario determinar la frecuencia inicial del derrame y luego del accidente o suceso

inicial en la unidad primaria que se seleccione. Para esto, se emplea el árbol de eventos y se realiza un análisis histórico de los últimos diez años en el área de estudio.

2.5.1 Determinación de la frecuencia inicial del derrame

Para determinar la frecuencia con la cual ocurren los accidentes en el área, con escenarios de incendios y explosión, se realiza un análisis histórico de accidentes tomando como referencia los últimos diez años de explotación de la planta.

2.5.2 Cuantificación de la frecuencia del suceso inicial

Para cuantificar la probabilidad de escalado se aplica el árbol de eventos. Los árboles de eventos son una herramienta mayor en el análisis de consecuencias (Wells, 2003; BEVI, 2009). Se usan para el cálculo de probabilidades de diferentes escenarios que se han identificado durante un estudio de seguridad. Desde el suceso inicial, que generalmente, es una pérdida de contención, se analizan la funcionalidad y la falla de subsistemas de seguridad, teniendo en cuenta una lógica consecuente. Esto resulta en una estructura en forma de árbol, con las ramas de izquierda a derecha. Cuando se le asigna una probabilidad a cada rama, se puede determinar la probabilidad de cada escenario posible luego de iniciarse el evento inicial.

2.5.3 Características del *software* Hugin para su uso en la simulación de redes bayesianas

Las redes bayesianas se confeccionan en función de las unidades primarias potenciales identificadas con el IUPP. A partir del análisis realizado se conectan las unidades de

proceso mediante arcos dirigidos, simulando la cadena de eventos dentro del efecto dominó.

Durante un proyecto de investigación patrocinado por la Unión Europea (bajo el programa ESPRIT) sobre el diagnóstico de enfermedades neuromusculares, se construyó la red bayesiana MUNIN. Un grupo de investigación en la Universidad de Aalborg trabajó en el desarrollo de métodos de computación correctos y eficientes para el problema de diagnóstico. Los investigadores estadounidenses habían obtenido algunos resultados en ese momento, pero todavía persistía un problema que impedía que las redes bayesianas se utilizaran en la construcción de sistemas expertos. El problema se conocía como el problema del rumor: es posible que escuche la misma historia a través de varios canales diferentes; pero, aunque sea así, la historia puede tener su origen en la misma fuente. Sin saber si sus canales son independientes o no, no puede combinar las declaraciones correctamente (Jensen et al., 2007).

La interfaz gráfica de usuario de Hugin es una herramienta interactiva que le permite al usuario utilizar las funciones del motor de decisión de Hugin para construir modelos que se pueden usar en variadas aplicaciones (Hugin, 2019).

La interfaz gráfica de usuario de Hugin se utiliza para crear y mantener modelos de red, así como para ejecutarlos (ingresar evidencia y mostrar las distribuciones de probabilidad resultantes y las utilidades esperadas). La interfaz gráfica de usuario de Hugin puede funcionar en dos modos diferentes: modo de edición y modo de ejecución (Spirtes *et al.*, 2000; Jensen et al., 2007).

Teniendo en cuenta que la red bayesiana es un conjunto de nodos que representan variables aleatorias y un conjunto de enlaces que conectan estos nodos de forma acíclica. Cada nodo ha asignado una función que describe cómo el estado del nodo depende de los padres del nodo (Leoni *et al.*, 2019; Simon *et al.*, 2019; Zarel *et al.*, 2019; Bouhamed *et al.*, 2015).

Para los nodos de probabilidad discreta, la función que describe cómo el nodo depende de sus padres es una tabla de probabilidad condicional. Para los nodos de probabilidad continua es una función de densidad de probabilidad (PDF), en Hugin debe ser una función de distribución gaussiana (normal) (Jensen *et al.*, 2007; Spirtes *et al.*, 2000).

En Hugin, también se puede construir diagramas de influencia que son redes bayesianas extendidas con nodos de decisión y funciones de utilidad.

Una red bayesiana es realmente una representación inteligente de un dominio de variables aleatorias dependientes y esta puede simularse con el *software* Hugin.

2.5.4 Cálculo de la probabilidad conjunta de la cadena de sucesos dominó

A partir de la elaboración de las redes bayesianas, se determina la probabilidad conjunta del efecto dominó para cada unidad de proceso primaria analizada. Además, se calculan las probabilidades de ocurrencia del efecto dominó para cada nivel de propagación. Para ello, se introducen en la red bayesiana los nodos auxiliares siguientes:

L_i : Probabilidad de propagación del accidente primario a las posibles i ésimas unidades.

$P(DL_i)$: Probabilidad del efecto dominó del nivel i ésimo.

Estos nodos se introducen a partir de las tablas de probabilidad que se muestran en el anexo 8.

Las tablas de probabilidades de los nodos auxiliares L_i se elaboran teniendo en cuenta que para considerar el efecto dominó, se necesita que exista una unidad secundaria, sea cual sea esta; mientras que, la de los nodos DL_i se construyen a partir del criterio de que tiene que ocurrir un accidente en una unidad primaria (X_1) y otro en alguna otra unidad, considerada entonces, secundaria.

La probabilidad conjunta del efecto dominó (P_{DE}) hasta el último nivel de escalado (n), se determina por la ecuación 2.4.

$$P_{DE} = \sum_{i=1}^n DL_i \quad (2.4)$$

2.6 Etapa 6: Predicción del impacto económico debido al carácter continuado de estos accidentes

Como se concluyó en el capítulo 1 de este trabajo, el Índice Dow de Incendio y Explosión (F&EI), es una herramienta eficaz y esencial para evaluar el impacto económico de accidentes provocados por incendios y explosiones. En este epígrafe se describen los aspectos esenciales, que, dentro de esta metodología, corresponden a la planta analizada.

El procedimiento a seguir se lista a continuación:

1. La selección de las Unidades de Proceso Pertinentes que se consideran de importancia clave para el proceso y que tendrían impacto sobre la magnitud de un fuego o explosión potencial.
2. Se determina el Factor Material (MF) para cada unidad de proceso. El MF para un material en particular en la Unidad de Proceso se obtiene de AIChE (1994).
3. Se calcula el Factor General de Peligrosidad del Proceso (F_1) con la aplicación de las penalidades apropiadas.
4. El cálculo se completa para el Factor Especial de Peligrosidad del Proceso (F_2) con la aplicación de las penalidades apropiadas.
5. Se realiza la determinación del Factor de Peligrosidad de la Unidad de Proceso (F_3), mediante el cálculo del producto de los Factores General y Especial de Peligrosidad del Proceso.
6. La determinación del F&EI se hace por el cálculo del producto del Factor de Peligrosidad de Unidad de Proceso y el Factor Material.
7. La determinación del Área de Exposición alrededor de la Unidad de Proceso que se está evaluando se hace a partir del radio de exposición.
8. Se hace la determinación del valor de reposición de todos los equipos dentro del Área de Exposición y el inventario. Se multiplica por el factor de actualización del costo al 2017.

9. Se determina el factor de daño (DF), el cual representa el grado de exposición a las pérdidas, se realiza con el uso de la figura del anexo 9, basada en el MF y el Factor de Peligrosidad de Unidad de Proceso.
10. Se realiza la determinación del Máximo Daño Probable a la Propiedad Base (MPPD Base), multiplicando el valor del área de exposición por el Factor de Daño.
11. Se calcula el factor de bonificación en función de diversos parámetros que disminuyen la incidencia de fuegos y explosiones.
12. La multiplicación del Factor de Bonificación por Control de Pérdidas con la MPPD Base permite la determinación del MPPD Actualizado.
13. Se realiza la determinación de los Máximos Días Probables de Indisponibilidad (MPDO) a través de la figura del anexo 10, conociendo el MPPD Actualizado.
14. Se realiza el cálculo del daño económico por la pérdida de producción (proporcional al valor de pérdidas por este concepto durante los días de indisponibilidad), es la Interrupción de Negocios (BI) a través de la ecuación 2.5 donde el MPDO se multiplica por el Valor de la Producción de un Año (VPA) y por 0,70/365.

En el anexo 11 se listan los valores del F&EI junto a la descripción del grado de peligrosidad del F&EI.

$$BI = \frac{MPDO}{365} \times VPA \times 0,70 \quad (2.5)$$

En el anexo 12 se muestran las figuras que se utilizan para el desarrollo de la metodología de este índice. Mientras que, en el anexo 13 se muestra el Procedimiento de cálculo del F&EI.

2.7 Etapa 7: Predicción del impacto ambiental debido al carácter continuado de estos accidentes

Para la evaluación del impacto ambiental que provocan los escenarios de incendio se utiliza la guía propuesta por Conesa, (2000), puesto que en esta guía se cuantifica el valor de la calidad ambiental en función de la concentración de contaminantes en la atmósfera como el monóxido de carbono. Se determina la cantidad de humo generada en el incendio y las emisiones de sustancias contaminantes como el monóxido de carbono y el dióxido de carbono.

2.7.1 Cálculo de la cantidad de humo generada en el incendio

En este epígrafe se exponen las principales ecuaciones con el fin de determinar el flujo másico de humo, que dificulta la visibilidad en el incendio.

Se calcula el flujo másico del humo (m_s), por la ecuación 2.6, donde ϵ es el factor másico de conversión a humo y m_f es el flujo másico de combustible que se quema.

$$m_s = \epsilon \cdot m_f \quad (2.6)$$

En el anexo 14 se muestra el factor másico de conversión a humo para cada sustancia dentro de este estudio. Atendiendo a estos valores se determina la cantidad de humo generada en el accidente.

2.7.2 Cálculo de la cantidad de contaminantes generados y reducción de la calidad ambiental

Además, se calculan las cantidades de otros gases contaminantes que se expulsan a la atmósfera producto de un incendio. Estos gases son el monóxido de carbono y el dióxido de carbono. Posteriormente se comparan estas emisiones con los valores medios de estos contaminantes en la atmósfera según el estudio de (Cuesta-Santos *et al.*, 2017) expuesto en la Revista Cubana de Meteorología.

Según Tewarson, (2008) el factor de conversión a monóxido de carbono es 0,3 para el caso de los hidrocarburos analizados.

En el anexo 15 muestra el factor de emisión de dióxido de carbono para cada sustancia. La emisión promedio anual de monóxido de carbono en la zona industrial de la provincia de Matanzas es 63,578 según Cuesta-Santos *et al.*, (2017).

Para la cuantificación del deterioro de la calidad ambiental se emplea la figura del anexo 16, través de la misma, se determina el deterioro de la calidad ambiental por concepto de un accidente químico.

2.8 Etapa 8: Predicción del impacto humano debido al carácter continuado de estos accidentes

El riesgo individual correspondiente a cada escenario de dominó se calcula a partir de la ecuación 2.7.

$$R_{i,de}^{(k,m)} = f_{de}^{(k,m)} \cdot V_{de}^{(k,m)} \quad (2.7)$$

Donde:

$R_{i,de}^{(k,m)}$: riesgo individual.

$f_{de}^{(k,m)}$: probabilidad de efecto dominó.

$V_{de}^{(k,m)}$: vulnerabilidad debido al efecto dominó.

La vulnerabilidad se determina como la suma de la probabilidad de muerte de todos los escenarios dentro de la secuencia dominó, con un límite superior de 1, tal como se muestra en la ecuación 2.8.

$$V_d^{(k,m)} = \min \left[\left(V_p + \sum_{i=1}^n \delta(i, J_m^k) \cdot V_{d,i} \right), 1 \right] \quad (2.8)$$

Se emplean para determinar la vulnerabilidad de las personas a la radiación y sobrepresión, las ecuaciones Probit Y expuestas por Lees, (2012).

Según Lees, (2012) los efectos de la radiación sobre las personas se determinan por la ecuación 2.9.

$$Y = -10,7 + 1,99 \cdot \ln(I^{4/3} \cdot t) \quad (2.9)$$

Donde: I es el valor de radiación por unidad de área (kW/m^2) y t es el tiempo de exposición (s).

Según Lees, (2012) los efectos de la sobrepresión sobre las personas se cuantifican a través de la ecuación 2.10. Estos efectos incluyen la rotura de tímpanos.

$$Y = 5,3 + 1,37 \cdot \ln(P) \quad (2.10)$$

Donde P es la sobrepresión en bar.

2.9 Conclusiones parciales del capítulo

Una vez finalizado el presente capítulo, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones parciales:

1. La secuencia de análisis propuesta permite la combinación de técnicas de análisis de riesgos para predecir el impacto económico, ambiental y humano debido al carácter continuado de accidentes de incendio y explosión.
2. Los *softwares* utilizados como ALOHA, Hugin, CAMEO y Matlab poseen alto prestigio y ayudan al cumplimiento del objetivo de la investigación.

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados de la aplicación de la metodología propuesta sobre la T-320 de la DTCCM. Se comparan los mismos con los obtenidos por diferentes autores que hicieron estudios similares. Primero, se muestran los resultados referidos al alcance de los escenarios según las corridas del *software* ALOHA. Luego, se explican los resultados referidos a la cuantificación de la frecuencia inicial y probabilidad de escalado para cada unidad de proceso. Se determinan las unidades primarias y potenciales y la probabilidad conjunta a partir de redes bayesianas. Finalmente, se pronostican los daños provocados por estos accidentes sobre la economía, el medio ambiente y las personas.

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

Las simulaciones realizadas en el *software* ALOHA, se realizan con el objetivo de obtener los diferentes valores de vectores de escaldo: intensidad de la radiación y sobrepresión, para escenarios de incendios y explosión, respectivamente. Además, se determina el alcance que tiene el accidente a través del radio de acción.

En el anexo 17 se muestran los escenarios que serán analizados a partir de un derrame de nafta, fuel oil, gasolina de aviación, turbocombustible y diesel.

Todos los resultados de las corridas realizadas se pueden ver en el anexo 18. Para la realización de las corridas en ALOHA se tuvo en cuenta lo siguiente:

- Se emplean los datos de las variables meteorológicas según Moya, 2013.

- Para el caso de la formación de una nube de vapor, se realizaron corridas para todas las direcciones del viento durante el momento del día, y cada una, para los dos extremos de temperatura: la media de las temperaturas mínimas y la media de las temperaturas máximas. Además, se hicieron corridas para la noche (momento de calma) en función de las dos temperaturas extremas.
- En el caso del charco de fuego, las corridas se realizan para los cuatro momentos extremos (día a temperatura máxima y mínima y noche a temperatura máxima y mínima).
- En el caso del BLEVE se realiza una sola corrida por cada tanque, puesto que este fenómeno solo depende de la cantidad del material involucrado en el mismo y de la geometría de la fuente.

Para un mejor análisis de la T-320, dividiremos la misma en tres subáreas de estudio. La tabla 3.1 muestra los tanques que conforman dichas áreas.

Tabla 3.1: Subáreas de la T-320

Subáreas	Subárea 1	Subárea 2	Subárea 3
Tanques	1, 4, 30,38	17, 13, 22, 23, 24, 25, 26	18, 19, 74

Se muestran los resultados para el tanque T-1, tanque T-17 y tanque T-19, que son los más propensos a la ocurrencia de accidentes; así como los valores de probabilidad de daño sobre las personas, paso previo en la cuantificación del impacto humano (etapa 8).

3.1.1 Estimación del alcance del escenario charco de fuego

Cuando se produce un escape o vertido de un líquido combustible sobre el suelo y se produce la ignición del líquido derramado, se produce, entonces, un charco de fuego. En este epígrafe se muestran los resultados de este escenario para los tanques primarios potenciales, correspondientes a las corridas que simulan el escenario de charco de fuego en los mismos.

En las figuras del anexo 19 se muestra el alcance que tienen las radiaciones de charco de fuego con respecto al tanque 1 y los valores de intensidad de la radiación en función de las distancias y la probabilidad de daño respectivamente.

En la figura a del anexo 19 se demuestra que es poco probable el escaldado a partir del tanque 1, debido a que existen pocos equipos sometidos a intensidades de radiaciones emitidas por el tanque origen. No existen unidades de procesos afectadas por radiaciones de 10 kW/m^2 ; sin embargo, sí se afectan a distancias de 101 metros recibiendo radiaciones de 5 kW/m^2 que provoca quemaduras de segundo grado en un intervalo de 60 segundos. También a distancias de 151 metros las radiaciones emitidas tienen una intensidad de 2 kW/m^2 que provoca dolor en un intervalo de 60 segundos. Esto puede deberse a que el tanque 1 almacena diesel, que es menos inflamable y volátil respecto a las otras sustancias almacenadas.

En la figura b del anexo 19 se observa que hasta una distancia de 150 metros existe un 100% de probabilidad de daño para los diferentes valores de intensidad de radiación según Lees, (2012), esto significa que todas las personas que se encuentran en un radio de 150 metros expuestas a estos niveles de radiación, están seriamente afectadas por muerte,

quemadura y dolor ocasionados por este tipo de accidente. Los valores de intensidad de radiación van disminuyendo a medida que aumenta la distancia.

En las figuras 3.1a y 3.1b se muestra el alcance que tienen las radiaciones de charco de fuego con respecto al tanque 17 y los valores de intensidad de la radiación en función de las distancias y la probabilidad de daño respectivamente.



Figura 3.1a: Alcance del escenario charco de fuego en el tanque 17

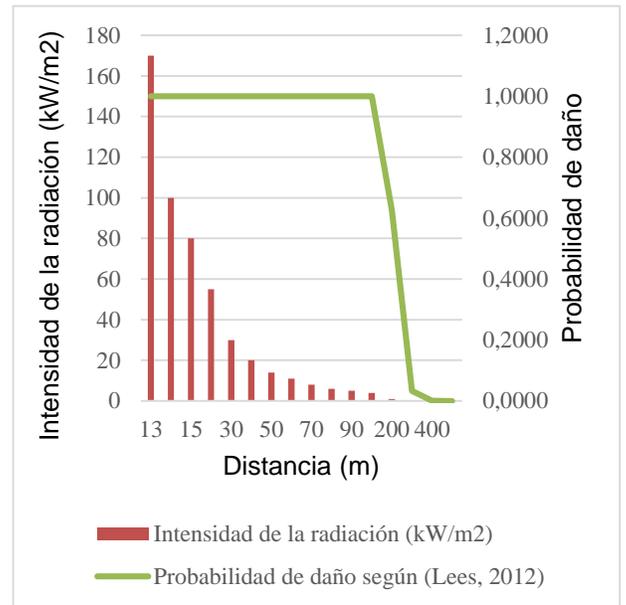


Figura 3.1b: Distancia vs radiación y probabilidad de daño en el tanque 17

En la figura 3.1a se muestra el alcance que tiene el escenario charco de fuego en el tanque 17. Sus efectos pueden alcanzar hasta 64 metros desde la fuente de explosión, con una intensidad de radiación superior de 10 kW/m² que puede ser potencialmente letal en las personas; puede llegar hasta 92 metros con radiaciones superiores a 5 kW/m² y hasta 144 metros emitiendo radiaciones de intensidades mayores de 2 kW/m² que pueden provocar quemaduras de segundo grado y dolor en un intervalo de 60 segundos respectivamente. En esta figura se evidencia que este escenario tiene una elevada potencialidad de escalado

y de producir efecto dominó a partir de esta unidad de proceso ya que su alcance incluye casi toda el área de la T-320 analizada.

En la figura 3.1b se observa que existe 100% de probabilidad de daño hasta distancias de 100 metros lo que significa que todas las personas que se encuentran expuestas a estos niveles de radiación alrededor de este radio, están seriamente afectadas por muerte, quemadura y dolor ocasionados por este tipo de accidente en esta unidad de proceso. Los valores de intensidad de radiación van disminuyendo a medida que aumenta la distancia.

En las figuras del anexo 20 se muestra el alcance que tienen las radiaciones de charco de fuego con respecto al tanque 19 y los valores de intensidad de la radiación en función de las distancias y la probabilidad de daño respectivamente.

En la figura a del anexo 20 se muestra el alcance que tiene el escenario charco de fuego en el tanque 19. Emite radiaciones potencialmente letales para las personas (10 kW/m^2) hasta una distancia de 32 metros desde la fuente de explosión. Puede alcanzar hasta 47 metros con radiaciones superiores a 5 kW/m^2 pudiendo causar quemaduras de segundo grado a las personas. Hasta una distancia de 75 metros emite radiaciones de intensidades superiores de 2 kW/m^2 que pueden provocar dolor en un intervalo de 60 segundos. En esta figura se evidencia que dentro del radio de acción de este escenario existen varias unidades de procesos que son afectadas, por lo que, en este tanque, este tipo de escenario tiene altas potencialidades de producir escalado y efecto dominó sobre las unidades cercanas. Esto se debe, además, a que el tanque 19 almacena gasolina de aviación, la cual es una sustancia de elevada volatilidad e inflamabilidad.

En la figura b del anexo 20 se observa que hasta distancias de 70 metros existe 100% de probabilidad de daño para los diferentes valores de intensidades de radiación correspondientes, lo que significa que todas las personas que se encuentran en un radio de 70 metros expuestas a estos niveles de radiación, están seriamente afectadas por muerte, quemadura y dolor ocasionados por este tipo de escenario en este tanque.

El escenario charco de fuego en los tres tanques presenta resultados semejantes. Esto se debe a que ALOHA limita la duración del escenario a una hora. De ahí en adelante, no calcula la evolución del accidente por los cambios significativos que pudieran ocurrir. (Machado y Román, 2017).

3.1.2 Estimación del alcance del escenario explosión de una nube de vapor

La dirección y la velocidad del viento ejercen gran influencia en la dispersión de una nube de vapor. En el anexo 21 se muestran las distancias de los equipos con respecto a la fuente de origen y los rumbos del viento que más acercarían la nube al equipo objetivo.

En las figuras 3.2a y 3.2b se muestra el alcance de una nube de vapor explosiva con respecto al tanque 17 y los valores de sobrepresión en función de las distancias y los perjuicios respectivamente.

Se observa como en la figura 3.2a el radio de la nube cubre toda el área analizada. Sus efectos pueden alcanzar hasta 346 metros desde la fuente de explosión, a una sobrepresión en este punto de 3,5 psi, que puede provocar lesiones graves en las personas; y puede llegar hasta 516 metros, con una sobrepresión de 1 psi, que ocasiona rotura de cristales, ruidos intensos para el oído humano y pérdida temporal.



Figura 3.2a: Alcance del escenario explosión de una nube de vapor en el tanque 17

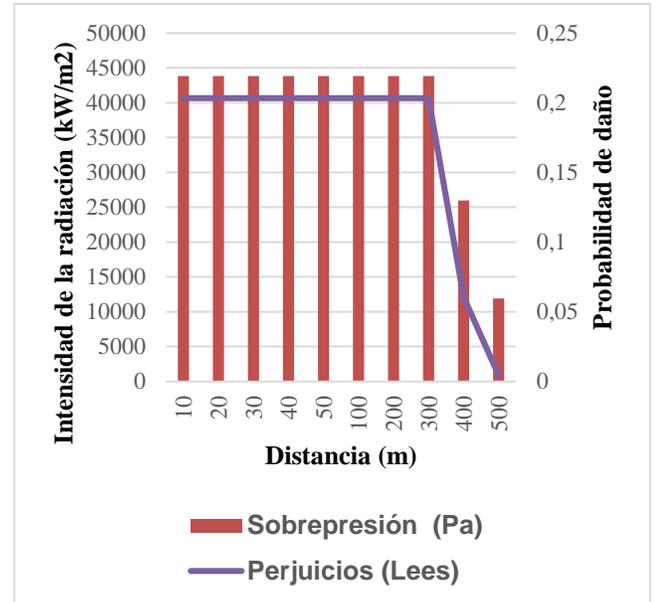


Figura 3.2b: Distancia vs sobrepresión y probabilidad de daño en el tanque 17

En la figura 3.2b se observa que hasta una distancia de 300 metros hay valor de perjuicios de 0,2 según Lees, (2012), pero para una distancia de 500 metros existen todavía afectaciones a las personas.

En las figuras del anexo 22 se muestra el alcance de una nube de vapor explosiva con respecto al tanque 19 y los valores de sobrepresión en función de las distancias y los perjuicios respectivamente.

Los efectos de la nube de vapor explosiva en el tanque 19 pueden alcanzar hasta 85 metros desde la fuente de explosión, a una sobrepresión de 3,5 psi, provocando lesiones graves en las personas; y puede alcanzar hasta 125 metros, con una sobrepresión de 1 psi, que ocasiona rotura de cristales, ruidos intensos para el oído humano y pérdida temporal.

En la figura b del anexo 22 se observa que hasta una distancia de 40 metros hay valor de perjuicios aproximadamente de 0,2 según Lees, (2012). Hasta distancias de 100 metros todavía existen perjuicios para las personas que se encuentren alrededor de ese radio de afectación.

El escenario nube de vapor explosiva presenta mayor alcance en el tanque 17 que en el tanque 19 debido a que el tanque 17 presenta mayor capacidad que el tanque 19, incidiendo en mayores cantidades de unidades de procesos. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Djelosevic y Tepic, (2019).

Comparado con los escenarios de incendios, la probabilidad de daño recibida por el escenario explosión de una nube de vapor es menor. Esto es debido a la diferencia del efecto de radiación y sobrepresión sobre el cuerpo y anatomía del ser humano.

3.1.3 Estimación del alcance del escenario BLEVE más bola de fuego

El escenario BLEVE más bola de fuego se puede originar como accidente secundario a partir del escenario charco de fuego. Los diferentes resultados que muestra el *software* ALOHA para este escenario se muestran el anexo 23.

En las figuras del anexo 24 se muestra el alcance de las radiaciones de las bolas de fuego para el tanque 1 y los valores de intensidad de radiación en función de las distancias y los niveles de probabilidad de daños respectivamente.

En la figura a del anexo 24 se muestra que, hasta distancias de 1,9 km, se emiten radiaciones superiores a 10 kW/m^2 cubriendo toda el área correspondiente a la DTCCM.

Estas radiaciones son letales en un intervalo de 60 segundos. Hasta distancias de 2,7 km se emiten radiaciones superiores a 5 kW/m² provocando daños y quemaduras de segundo grado en un intervalo de 60 segundos en las zonas pobladas aledañas a la empresa. A una distancia de 4,2 km se emiten radiaciones con intensidades superiores a 2 kW/m², las cuales causan dolor en menos de 60 segundos. Se observa que a esta distancia ya se afecta gran parte de la población de Versailles y de la zona de Playa.

En la figura b del anexo 24 se muestra que hasta distancias aproximadas de 600 metros de origen del accidente se alcanza un 100% de probabilidad de daño. Hasta una distancia de 1000 metros existe un 80% de probabilidad de daño que es una probabilidad alta según Reniers y Cozzani, (2013).

En las figuras 3.3a y 3.3b se muestra el alcance de las radiaciones de las bolas de fuego para el tanque 17 y los valores de intensidad de radiación en función de las distancias y los niveles de probabilidad de daños respectivamente.



Figura 3.3a: Alcance de las radiaciones de la bola de fuego en el tanque 17

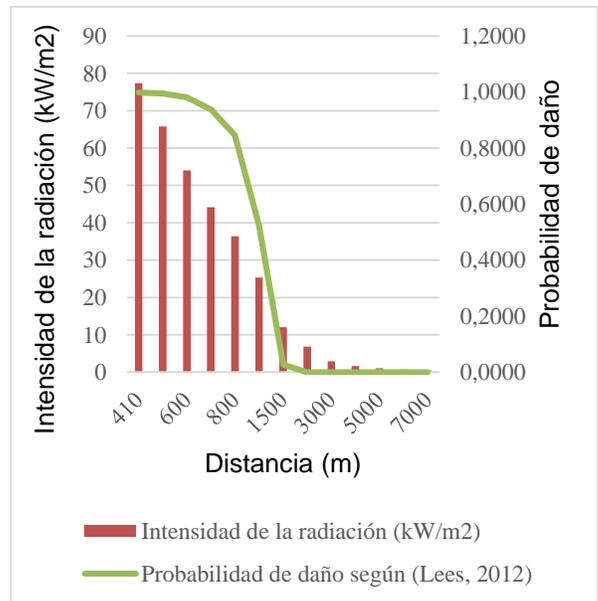


Figura 3.3b: Distancia vs radiación y probabilidad de daño en el tanque 17

El tanque 17, al igual que el tanque 1, en el caso de la radiación superior a 10 kW/m^2 , cubre toda el área correspondiente a la empresa; mientras que la radiación superior a 2 kW/m^2 alcanza áreas de zonas pobladas aledañas, lo que daña no solo al personal de la empresa, sino también a los habitantes de la zona de Versailles. Según ALOHA, (2016) las radiaciones superiores a 10 kW/m^2 son potencialmente letales en un intervalo de 60 segundos de exposición; las superiores a 5 kW/m^2 provocan quemaduras de segundo grado y las superiores a 2 kW/m^2 , dolor dentro de 60 segundos.

En la figura 3.3b se observa que hasta distancias de 500 metros hay 100% de probabilidad de daños. A una distancia de 3000 metros todavía existen radiaciones emitidas por la bola de fuego, que, aunque son valores pequeños, sigue afectando a las personas que estén expuestas a ellas.

En las figuras del anexo 25 se muestra el alcance de las radiaciones de las bolas de fuego para el tanque 19 y los valores de intensidad de radiación en función de las distancias y los niveles de probabilidad de daños respectivamente.

El tanque 19, como muestra la figura a del anexo 25, afecta gran parte de la empresa con radiaciones superiores a 10 kW/m^2 llegando hasta 929 metros lo que puede causar pérdidas letales en un intervalo de 60 segundos. Puede causar quemaduras de segundo grado hasta distancias de 1,3 km (radiaciones de 5 kW/m^2) y dolor en las personas hasta distancias de 2 km (radiaciones de 2 kW/m^2).

En la figura b del anexo 25 se observa que hasta distancias de 280 metros hay 98% de probabilidad de daños. La probabilidad de daño va disminuyendo a medida que aumenta la distancia y se hace mínima a una distancia de 1500 metros.

Comparado con el tanque 1 y el tanque 17, las radiaciones provocadas por el tanque 19 presentan menor alcance debido a que este tanque posee menor capacidad de almacenamiento que los anteriores.

Por todo lo que se ha analizado anteriormente, se puede afirmar que el escenario BLEVE más bola de fuego, a pesar de su poca duración, es el que provoca mayores daños ya que su alcance logra sobrepasar toda el área de la DTCCM, afectando además otras zonas como la de Versalles y Playa, y cuando esto ocurre se está en presencia de un accidente mayor según HSE, (2018) y Nwabueze, (2016).

3.2 Cálculo de la probabilidad de escalado y frecuencia de los accidentes (Etapa 3)

Para determinar la probabilidad de escaldado de los accidentes es necesario conocer las distancias a las que se encuentran los tanques dentro de la T-320, estas se muestran en el anexo 26.

Estos valores se introducen en ALOHA, con otro conjunto de datos, con el objetivo de determinar el valor de los vectores de escalado: radiación y sobrepresión, para cada escenario que se pueda manifestar en cada unidad de proceso en función de la distancia. Con estos valores de los vectores de escalado se determina la probabilidad de escalado de cada tanque respecto a las unidades de procesos.

Los valores de radiación y sobrepresión y la probabilidad de escalado de radiación y sobrepresión se muestran en el anexo 27.

En la subárea 1 los mayores niveles de intensidad de radiación son emitidos por el tanque 30. Estas radiaciones son emitidas con respecto al tanque 38, al tanque 17 y al tanque 1, con valores de $27,3 \text{ kW/m}^2$, $16,8 \text{ kW/m}^2$ y 15 kW/m^2 respectivamente; luego el tanque 38 con respecto al tanque 30 con valor de $9,87 \text{ kW/m}^2$. Esto se debe a la proximidad que presentan estos tanques dentro del área. Le sigue el tanque 1 con respecto al tanque 4 emitiendo radiaciones con intensidades de $7,71 \text{ kW/m}^2$.

En la subárea 2, los tanques 24 con respecto al tanque 25 y viceversa emiten intensidad de radiación de $14,1 \text{ kW/m}^2$, le sigue el tanque 13 con respecto al tanque 22 con radiaciones de $14,8 \text{ kW/m}^2$ y luego el tanque 17 con respecto al tanque 26 con intensidad de radiación de $10,5 \text{ kW/m}^2$. Esto se debe a la proximidad de los tanques dentro del área. El tanque 17, a pesar que presenta una capacidad de almacenamiento pequeña con respecto a los demás tanques dentro de su área presenta valores de intensidad de radiación medios.

En la subárea 3, el mayor nivel de intensidad de radiación emitido es del tanque 18 para el tanque 19 con un valor de $18,9 \text{ kW/m}^2$, seguido de las radiaciones del tanque 19 con respecto al 18 con valor de $11,7 \text{ kW/m}^2$. A pesar de que la capacidad de almacenamiento del tanque 19 es aproximadamente la tercera parte de la capacidad de almacenamiento del tanque 18 y del 74, las radiaciones emitidas son semejantes a la de los otros 2 tanques antes mencionados.

Como es de suponerse, estos tanques que presentan mayores valores de intensidad de radiación son los que presentan, por tanto, mayores valores de probabilidad de escalado dentro de las diferentes subáreas.

Con respecto al vector de escalado: sobrepresión, la mayoría de los tanques presentan resultados semejantes. Esto se debe a que los tanques se encuentran aproximadamente a distancias semejantes unos de otros.

En función de los valores de los vectores de escalado: radiación y sobrepresión, y de la probabilidad de escalado de los mismos se establecen los tanques 1, 17 y 19 como posibles accidentes primarios en función de que son los más susceptibles y propensos a provocar el escalado del escenario charco de fuego y nube de vapor explosiva (tanques 17 y 19). Estos tanques se toman como representación de cada una de las subáreas que se mostraron en la tabla 3.1.

En el anexo 28 se muestra un resumen de los resultados obtenidos de la revisión del registro histórico de accidentes en los últimos diez años en la T-320.

Los derrames más comunes son los ocurridos en el tanque 1 de diesel. Esto significa que en un período de diez años han ocurrido 7 derrames en este tanque lo que da un valor de frecuencia de derrame de 0,7. Los casos de derrames menos probables son los de fuel oil y los de turbocombustible que ocurrieron, en un período de diez años, un solo derrame para cada tipo de combustible, dando como resultado una frecuencia de derrame de 0,1. Este valor es alto respecto a lo reportado por Reniers y Cozzani, (2013); BEVI, (2009) y Wells, (2003).

Con estos valores de frecuencia inicial determinado para cada tipo de combustible se confecciona el árbol de eventos que se muestra en el anexo 29.

La probabilidad de ignición directa se determina según Changlong *et al.*, (2012). Al existir evidencia de que se producen incendios en las áreas verdes del área y fallos eléctricos con la frecuencia determinada según el análisis histórico, se plantea que existe una fuente de ignición segura producto de estos eventos; aunque, al tener un buen control de la seguridad del proceso, la probabilidad de ignición directa se reduce a 0,25.

La probabilidad de ignición retardada se determina según BEVI, (2009) como todo lo que no fue probabilidad de ignición directa, en este caso, es 0,75.

La probabilidad de explosión se toma 0,4 por tratarse de combustibles líquidos, acorde a lo planteado por BEVI, (2009) y Wells, (2003).

A partir de la aplicación de esta técnica de análisis de riesgo, se cuantifica la probabilidad del suceso inicial charco de fuego y explosión con magnitud frecuencial, ya que se parte de la frecuencia inicial del derrame según el análisis histórico.

3.3 Determinación de las unidades primarias potenciales a través del IUPP (Etapa 4)

La aplicación del Índice de Unidad Primaria Potencial (IUPP) se realiza con la finalidad de conocer el potencial de peligro que posee cada tanque para detonar la cadena de sucesos. Se aplica teniendo en cuenta aquellos factores que contribuirían en cierto grado a la propagación del accidente: V, N_f, F, P_e. La determinación de cada factor se muestra en el anexo 30.

Según Chen *et al.*, (2018 a); Chen *et al.*, (2018 b); Khakzad *et al.*, (2018); Kumar, (2018); Mukhim *et al.*, (2018); Vairo *et al.*, (2018); Aissani *et al.*, (2018); Cai *et al.*, (2018); Landucci *et al.*, (2017); Alileche *et al.*, (2016); Atkinson *et al.*, (2015), se toman los factores de ponderación para cada variable, que se muestran en la figura 3.4.

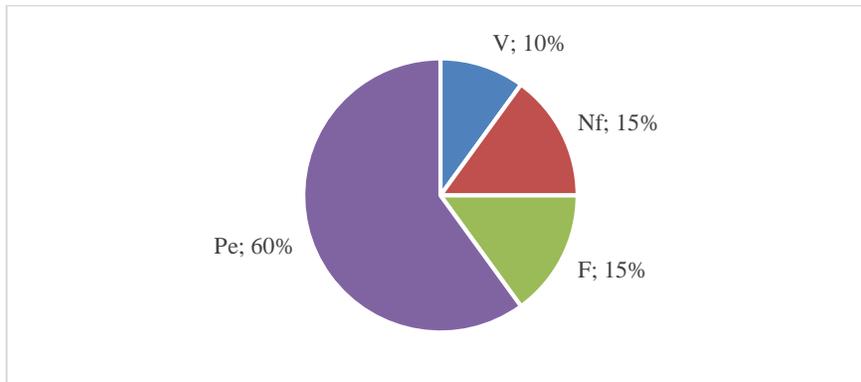


Figura 3.4: Factores de ponderación para cada variable

Se le da un peso cuantitativamente mayor a la probabilidad de escalado promedio, ya que, en su cálculo influye el volumen de la unidad de proceso, que es otro de los factores que influyen en el IUPP; mientras que a la volatilidad de la sustancia y a la frecuencia del suceso inicial se les pondera como un 15% cada uno. Los valores de IUPP para cada unidad de proceso se muestran en el anexo 31.

De la subárea 1 (figura a del anexo 31), la unidad de proceso con mayor IUPP corresponde con el tanque 1 de almacenamiento de diesel. Esto se debe a que la frecuencia con que ocurren derrames en el mismo es superior al resto de los tanques de esta área. El tanque 30 que almacena fuel oil, posee un valor cercano de IUPP con respecto al del tanque 1, por su gran capacidad de almacenamiento y probabilidad de escalado; a pesar de esto, se toma como unidad primaria potencial el tanque 1 dentro de

esta subárea, por el criterio que ofrece el IUPP y porque se conoce que es más probable que un suceso inicial ocurra por un derrame de diesel que por un derrame de fuel oil.

Dentro de la subárea 2 (figura b del anexo 31), la unidad de proceso con mayor IUPP es la referida al tanque 17 de almacenamiento de nafta, con una diferencia significativa de IUPP con respecto al resto de las unidades de proceso. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Leoni *et al.*, (2019), Wang *et al.*, (2018) y Zheng *et al.*, (2018) Vallinayagam *et al.*, (2017), porque la nafta es una sustancia de mayor inflamabilidad y volatilidad respecto al diesel y al turbocombustible y, por ende, posee mayor valor promedio de probabilidad de escalado respecto al resto de los tanques.

Dentro de la subárea 3 (figura c del anexo 31) la unidad de proceso con mayor IUPP es el tanque 19. En esta subárea todos los tanques almacenan la misma sustancia que es la gasolina de aviación, de elevada volatilidad e inflamabilidad. La diferencia del IUPP del tanque 19 respecto al resto de los tanques se debe, a que posee un valor más alto de frecuencia inicial, según el análisis histórico realizado en la planta.

A partir de los resultados obtenidos referidos al IUPP, se toman como unidades de proceso primarias potenciales para iniciar el efecto dominó a los tanques 1, 17 y 19 que almacenan diesel, nafta y gasolina de aviación respectivamente. Los tanques que almacenan estas sustancias son propensos a detonar la secuencia de eventos, principalmente el 17 y el 19 por la inflamabilidad de las sustancias que almacenan (Paris, 2019; Sánchez *et al.*, 2018; Machado y Román, 2017).

3.4 Resultados de la elaboración de las redes bayesianas (Etapa 5)

Las redes bayesianas se construyen con la finalidad de cuantificar el valor de la probabilidad conjunta de la cadena de sucesos dominó, teniendo en cuenta los efectos sinérgicos de los escenarios que se pueden producir. Para ello, se emplea el *software* Hugin. Los resultados de las redes bayesianas elaboradas se muestran en el anexo 32.

La red bayesiana construida a partir de un accidente primario en el tanque 1 se muestra en el anexo 33.

Las unidades secundarias, terciarias y cuaternarias se toman teniendo en cuenta los valores umbrales de cada vector de escalado y esto, a su vez, depende de la distancia entre los tanques. Se establecen como unidades secundarias los tanques 17, 30 y 4; como terciarias, los tanques 38, 26, 13 y 18; como cuaternarias, los tanques 25, 24, 22, 74 y 19; como última unidad, el tanque 23.

En la figura 3.5 se muestran los resultados de probabilidad de ocurrencia de los accidentes a partir de la simulación de la red bayesiana en el *software* Hugin.

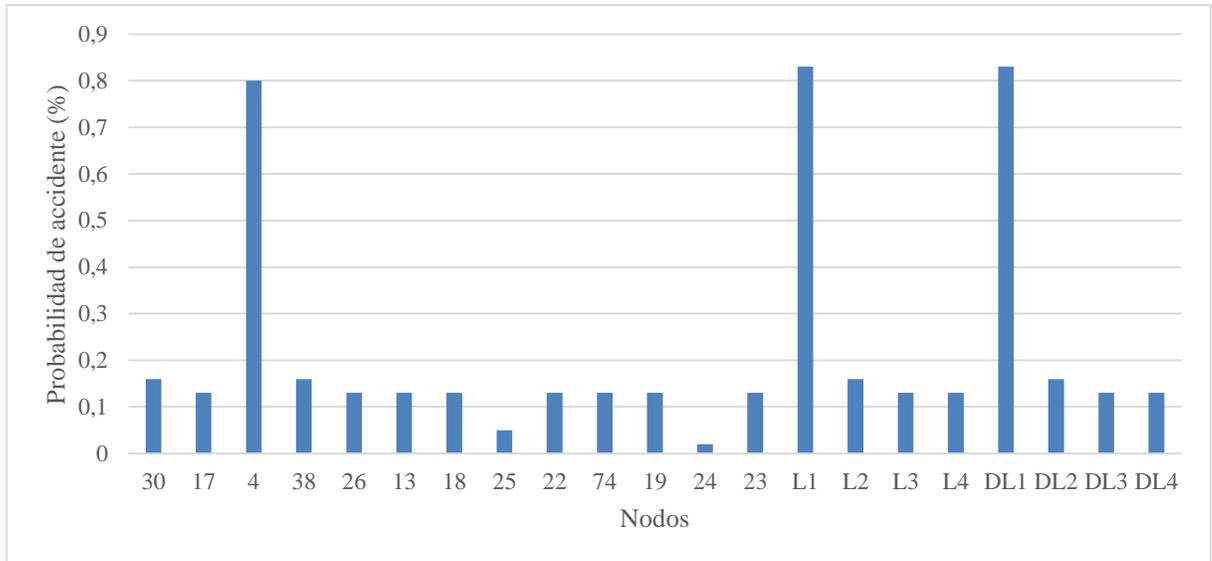


Figura 3.5: Nodos vs probabilidad de accidentes para red bayesiana en el tanque 1

La probabilidad de accidente para todas las unidades de procesos no sobrepasa el 1% en ninguno de los casos. Esto significa que, a pesar de ser el tanque 1 una unidad primaria potencial, el desarrollo de la secuencia dentro del efecto dominó es de muy baja probabilidad. Esto se debe, a que la propagación del accidente solo puede suceder a través del vector de escalado radiación producto de un charco de fuego. Al ser diesel, la sustancia almacenada, no se forma una nube de vapor en caso de un derrame, y por ende no existe vector de escalado sobrepresión por este concepto.

La probabilidad del efecto dominó al primer nivel es de 0,83%, al segundo nivel, 0,16%, al tercer nivel, 0,13% y al cuarto nivel 0,13%. Esto confirma la idea de que el escalado a partir del tanque 1 es poco probable.

En caso de conocer que existe un accidente en algunos de las unidades de proceso producto del escalado de un accidente primario en el tanque 1 (acorde a la red bayesiana), las probabilidades de accidentes se recalculan, en función de esta nueva evidencia. Estos resultados se muestran en el anexo 34.

Al ocurrir un accidente en los tanques que corresponden a las unidades secundarias, la probabilidad del efecto dominó del primer nivel aumenta considerablemente, ya que, en esta red, se parte de un accidente en la unidad primaria tanque 1. El mismo hecho ocurre con las unidades terciarias y cuaternarias. En caso de ocurrir un accidente en el tanque 1, la probabilidad del carácter continuado del mismo es a lo sumo 5,82%.

La red bayesiana distribuida a partir del tanque 17 se muestra en la figura 3.6. Se establecen como unidades secundarias los tanques 30, 1, 4, 38, 26, 13 y 18; como terciarias, los tanques 25, 22, 74, 24 y 19; como cuaternarias, el tanque 23. La cantidad de unidades secundarias posibles a partir de un posible accidente primario en tanque 17 son siete en total, esto se debe a la posición central que tiene el tanque 17 respecto al resto de las unidades de proceso y por ende a la facilidad que tendría el escalado del mismo.

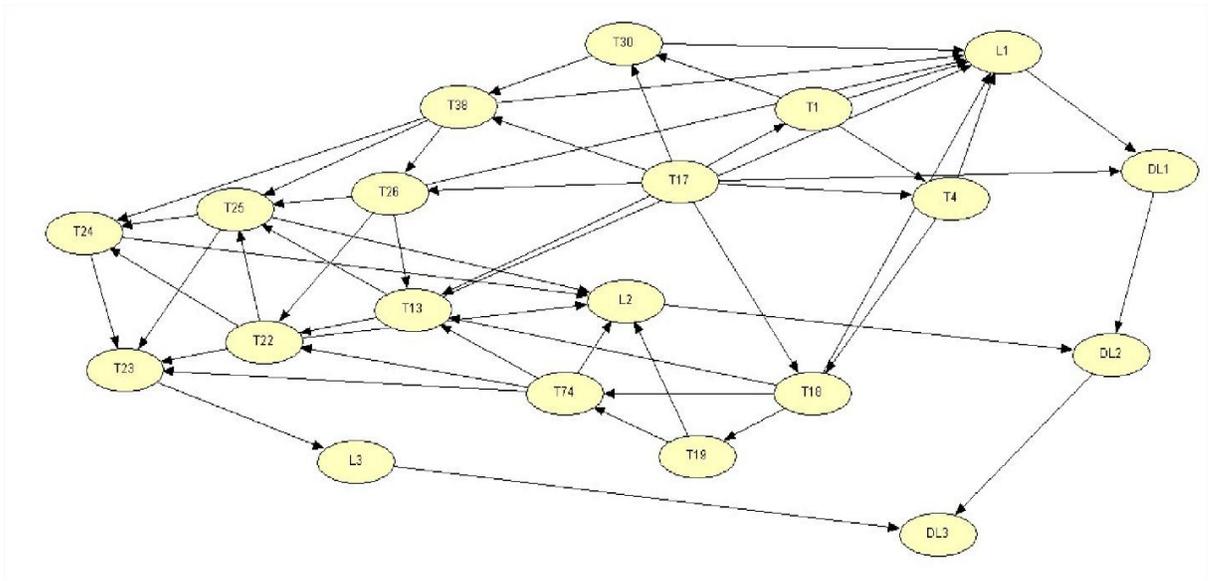


Figura 3.6: Red bayesiana de probabilidades para el tanque 17

En la figura 3.7 se muestran los resultados de probabilidad de ocurrencia de los accidentes a partir de la simulación de la red bayesiana en el *software* Hugin.

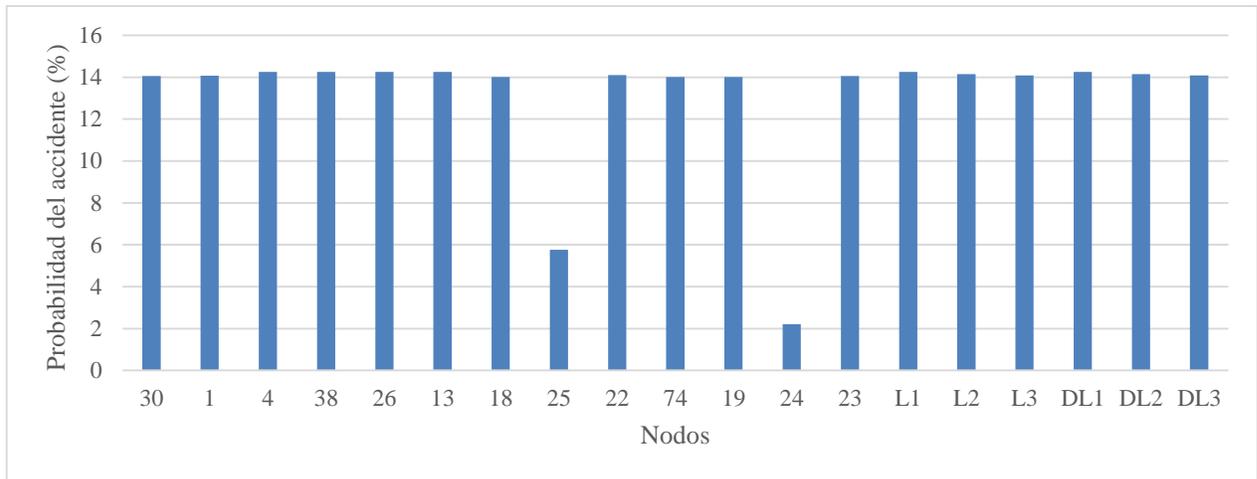


Figura 3.7: Nodos vs probabilidad de accidentes para red bayesiana en el tanque 17.

La probabilidad de accidente para las unidades secundarias es ligeramente superior al 14%. Este valor de probabilidad es elevado con respecto a lo reportado por Simon *et al.*, (2019), por Yazdi, (2019) y por Cai *et al.*, (2018). La volatilidad e inflamabilidad elevadas de la nafta, hacen que, el escalado del accidente primario pueda producirse a través de dos vectores de escalado: radiación por charco de fuego y sobrepresión por explosión de una nube de vapor. Por lo que, el efecto dominó es muy probable que ocurra a partir de un accidente primario del tanque 17.

La probabilidad del efecto dominó al primer nivel es de 14,25%, al segundo nivel, 14,15% y al tercer nivel, 14,08%. Esto confirma la idea de que el escalado a partir del tanque 17 es muy probable. Además, no es solo altamente probable que ocurra el escalado al primer nivel, sino que, de ocurrir este, es probable que ocurra el del segundo nivel y a su vez, el escalado al tercer nivel.

En caso de conocer que existe un accidente en algunos de las unidades de proceso producto del escalado de un accidente primario en el tanque 17 (acorde a la red bayesiana de la figura 3.8), las probabilidades de accidentes se recalculan, en función de esta nueva evidencia. Estos resultados se muestran en la figura 3.8.

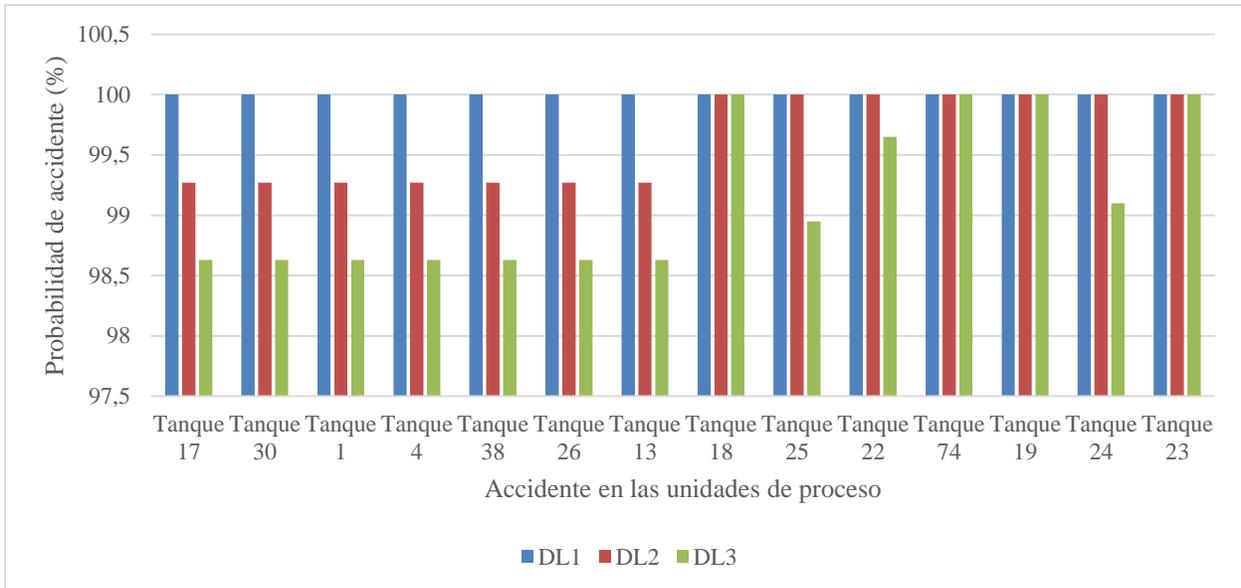


Figura 3.8: Accidente en las unidades de proceso vs probabilidad de accidente para red bayesiana en el tanque 17

Para todos los casos es casi completamente certero que ocurra un accidente en cualquiera de las unidades de proceso, si se produce un accidente primario en el tanque 17. En caso de ocurrir un accidente en el tanque 17, la probabilidad del carácter continuado del mismo supera el 98% en todos los niveles de escalado. Por lo que se puede afirmar, que esta unidad de proceso, es altamente propensa de iniciar la cadena de eventos dominó, por la sustancia que almacena y por la posición que tiene dentro del área.

La red bayesiana distribuida a partir del tanque 19 se muestra en el anexo 35.

Se establecen como unidades secundarias los tanques 18 y 74; como terciarias, los tanques 4, 17, 13, 22 y 23; como cuaternarias, los tanques 1, 30, 38, 26, 25 y 24. La cantidad de unidades secundarias posibles a partir de un posible accidente primario en tanque 19 son solamente dos, esto se debe a la posición que tiene el tanque 19 respecto al resto de las unidades de proceso, que está dentro de la subárea 3 y por ende a la facilidad que tendría el escalado del mismo dentro de esta subárea.

En la figura 3.9 se muestran los resultados de probabilidad de ocurrencia de los accidentes a partir de la simulación de la red bayesiana en el *software* Hugin.

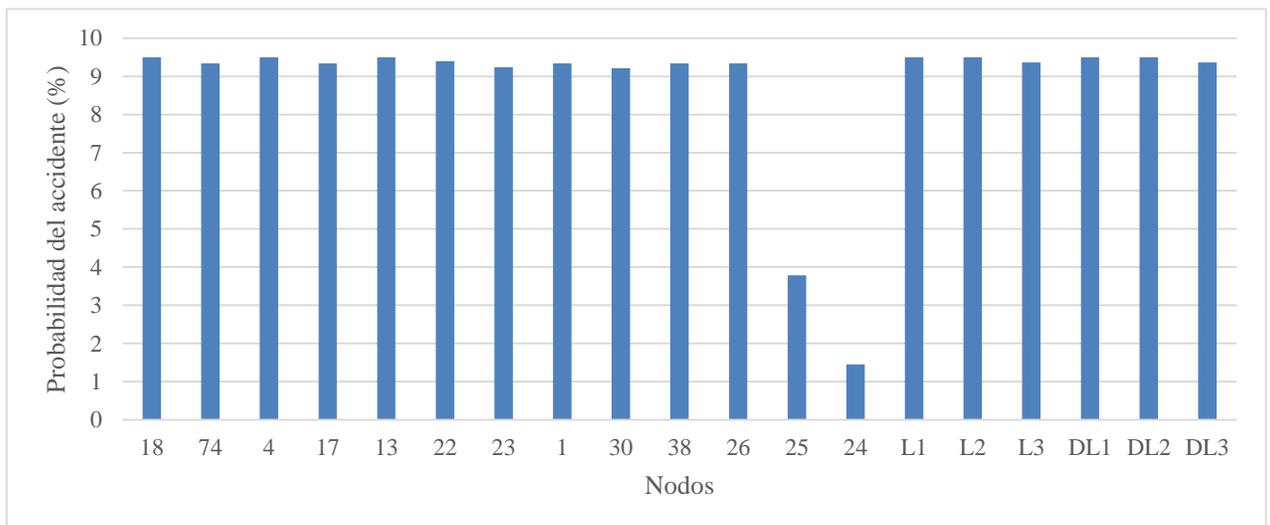


Figura 3.9: Nodos vs probabilidad de accidentes para red bayesiana en el tanque 19

La probabilidad de accidente para las unidades secundarias es ligeramente superior al 9%. Este valor de probabilidad es medio con respecto a lo reportado por Simon *et al.*, (2019), por Yazdi, (2019) y por Cai *et al.*, (2018). La volatilidad e inflamabilidad elevadas de la gasolina de aviación, hacen que, el escalado del accidente primario pueda producirse a través de dos vectores de escalado: radiación por charco de fuego y

sobrepresión por explosión de una nube de vapor; coincidente a lo que puede ocurrir con la nafta. Por lo que, el efecto dominó es probable que ocurra a partir de un accidente primario del tanque 19.

La probabilidad del efecto dominó al primer nivel es de 9,5%, al segundo nivel, 9,5% y al tercer nivel, 9,36%. Esto significa que de ocurrir el escalado del accidente del tanque 19, es probable que se vean afectadas hasta las unidades cuaternarias.

En caso de conocer que existe un accidente en algunos de las unidades de proceso producto del escalado de un accidente primario en el tanque 19 (acorde a la red bayesiana), las probabilidades de accidentes se recalculan, en función de esta nueva evidencia. Estos resultados se muestran en el anexo 36.

Para todos los casos es casi completamente certero que ocurra un accidente en cualquiera de las unidades de proceso, si se produce un accidente primario en el tanque 19. En caso de ocurrir un accidente en el tanque 19, la probabilidad del carácter continuado del mismo supera el 98% en todos los niveles de escalado. Por lo que se puede afirmar, que esta unidad de proceso, es altamente propensa de iniciar la cadena de eventos dominó, por la sustancia que almacena; pero tiene como limitante la posición dentro del área, ya que solo tiene dos posibles unidades secundarias dentro del subárea 3.

En la figura 3.10 se muestra la comparación de la probabilidad de efecto dominó a diferentes niveles a partir de un accidente primario certero en los tanques 1, 17 y 19 respectivamente.

Tanto el tanque 17 como el 19 presentan altas probabilidades de efecto dominó para cada nivel, al contrario del tanque 1. Esto es debido a que los tanques 17 y 19 almacenan nafta y gasolina de aviación respectivamente, sustancias altamente inflamables y explosivas; mientras que, el tanque 1 almacena diesel, que es menos inflamable y volátil respecto a las otras sustancias almacenadas (CAMEO, 2019).

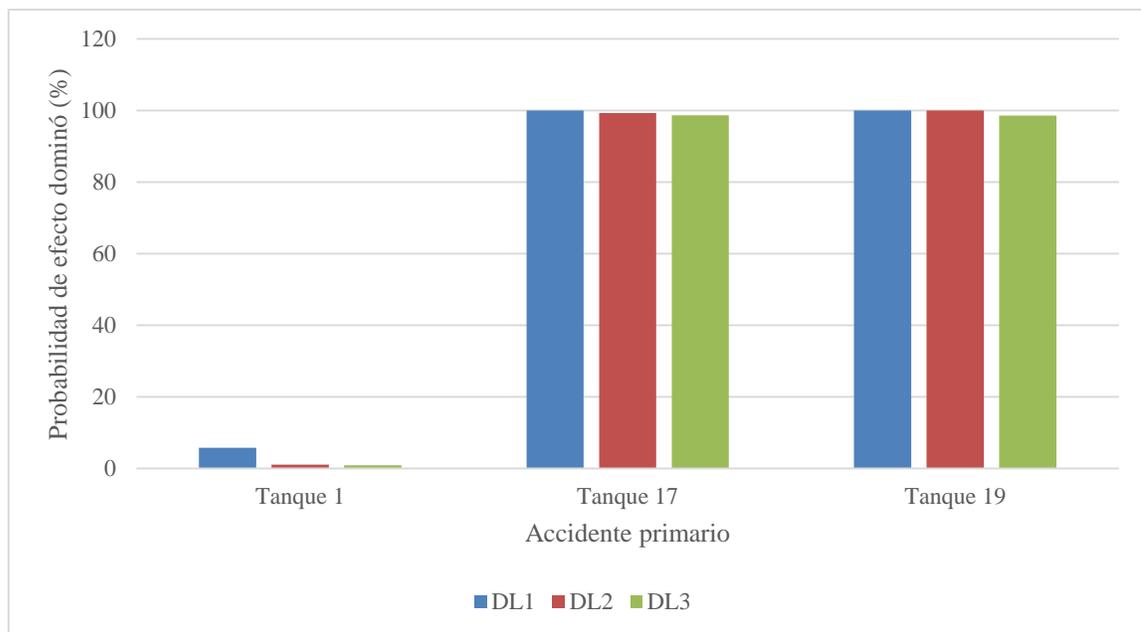


Figura 3.10: Accidente primario vs probabilidad de efecto dominó

Entre el tanque 17 y el tanque 19, se toma la red bayesiana del tanque 17 como iniciador de la secuencia dominó, debido a la posición central del mismo respecto al resto de las unidades de proceso.

3.4.1 Resultados y análisis de la probabilidad conjunta del efecto dominó

La probabilidad conjunta del efecto dominó se determina a partir de la sumatoria de las probabilidades del carácter continuado a todos los niveles para el tanque 17. Este valor es 42,48%. Como se partió en el análisis de riesgos de la frecuencia inicial de los accidentes

(por análisis histórico), este valor es frecuencial e indica que existe un 42,48% de probabilidad de ocurrir efecto dominó en un año. Este valor implica un potencial de peligrosidad elevado según Leoni *et al.*, (2019); Kabir y Papadopoulos, (2019); Cai *et al.*, (2018); Zerrouki y Smadi, (2016) y Kabir *et al.*, (2015).

3.5 Resultados y análisis del impacto económico debido al carácter continuado de estos accidentes (Etapa 6)

Las unidades de proceso se definen de la misma forma que se seleccionaron en la etapa 1. Cada tanque dentro de la T-320 es una unidad de proceso a evaluar con el Índice Dow.

Los valores de penalización y bonificación para cada unidad de proceso, así como el resto de los resultados intermedios se detallan en el anexo 37.

Para los cálculos de los materiales contenidos en los equipos se emplea lo planteado en la Resolución No. 55 de 2017 del Ministerio de Finanzas y Precios. Se actualiza el costo de reposición de equipos a través del índice de costo del 2018. (*Economic Indicators*, 2019).

El índice de incendio y explosión está vinculado con el al radio de exposición. En la figura 3.11 se muestra el F&EI para cada unidad de proceso.

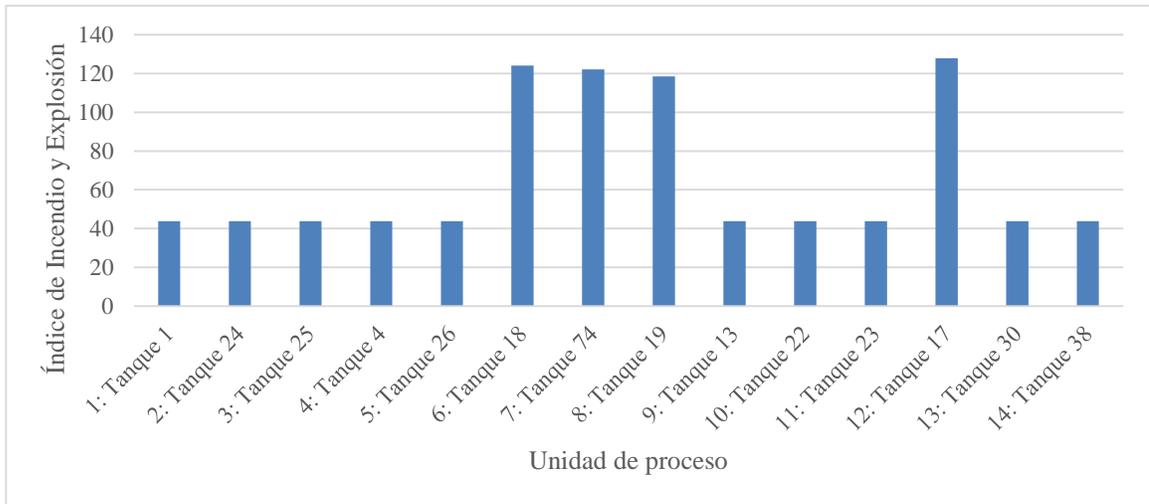


Figura 3.11: Resultados del F&EI para cada unidad de proceso

Para las unidades de proceso correspondientes a los tanques 1, 24, 25, 26, 13, 22, 23, 30 y 38, se muestra un valor de peligrosidad de 43,75 encontrándose este dato dentro del rango de peligrosidad ligero. De otra forma, se destacan los tanques 18, 74 y 19 que presentan un valor de 124,08, 122,2 y 118,44 respectivamente siendo intermedio su grado de peligrosidad con un contenido en los mismos de gasolina de aviación. El valor más alto de la tabla lo alcanza la unidad de proceso perteneciente al tanque 17 el cual es de 127,84 encontrándose este, en un rango severo causado por almacenar nafta. Estos grados de peligrosidad de intermedios e intensos se deben a que las sustancias presentan características altas de volatilidad e inflamabilidad.

Para determinar las pérdidas por interrupción del negocio se necesita calcular las pérdidas por paralización de la producción a partir del valor de la producción anual del 2018 y los máximos días probables perdidos.

Los máximos días probables perdidos fueron determinados por la figura mostrada en el anexo #10 y se muestran en la figura 3.12.

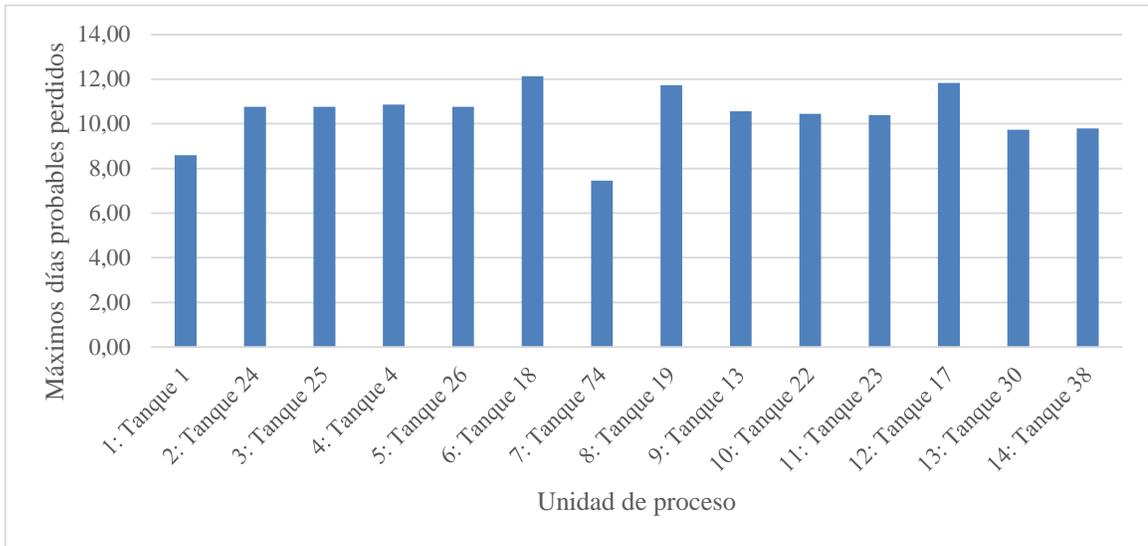


Figura 3.12: Máximos días probables perdidos para cada unidad de proceso

En la T-320 los máximos días son 12 días correspondientes a un accidente en el tanque 18, ya que este cubriría el tanque 19 según AIChE, (1994).

Las pérdidas totales se determinan por la suma de las pérdidas por paralización de la producción y el actual máximo daño probable a la propiedad. La figura 3.13 muestra estos valores.

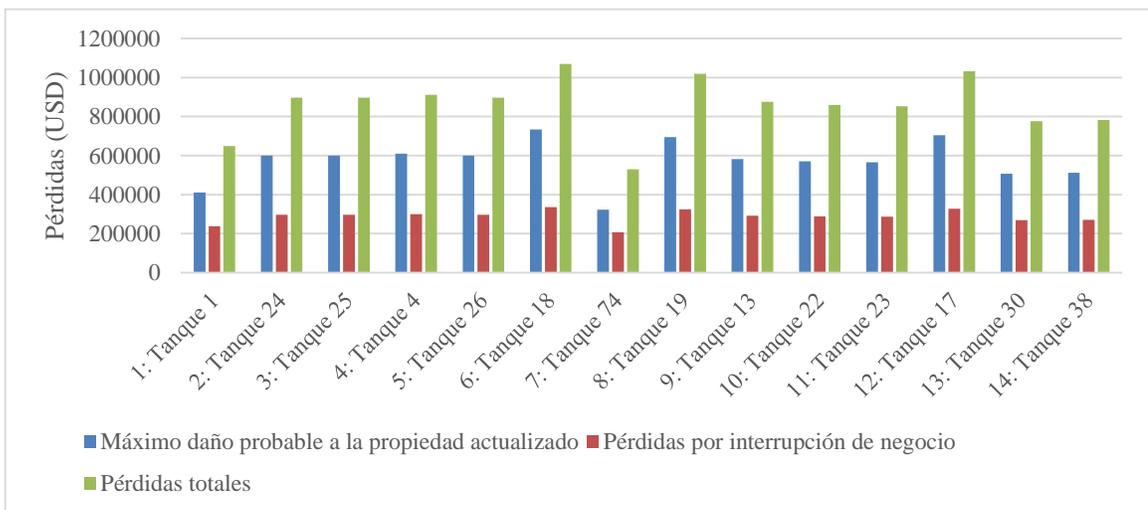


Figura 3.13: Pérdidas totales para cada unidad de proceso en USD

Las mayores pérdidas por paralización de la producción corresponden a las unidades de procesos que detienen la producción por más tiempo y que provocan mayores pérdidas teniendo en cuenta los niveles de seguridad industrial.

En la T-320 las pérdidas ascienden a casi de 1 070 000 USD aproximadamente. Estos resultados son acordes a los obtenidos por Zarranejad y Ahmadi, (2016) en su estudio.

En la figura 3.14 se muestra una comparación de las posibles pérdidas totales si ocurre o no el efecto dominó.

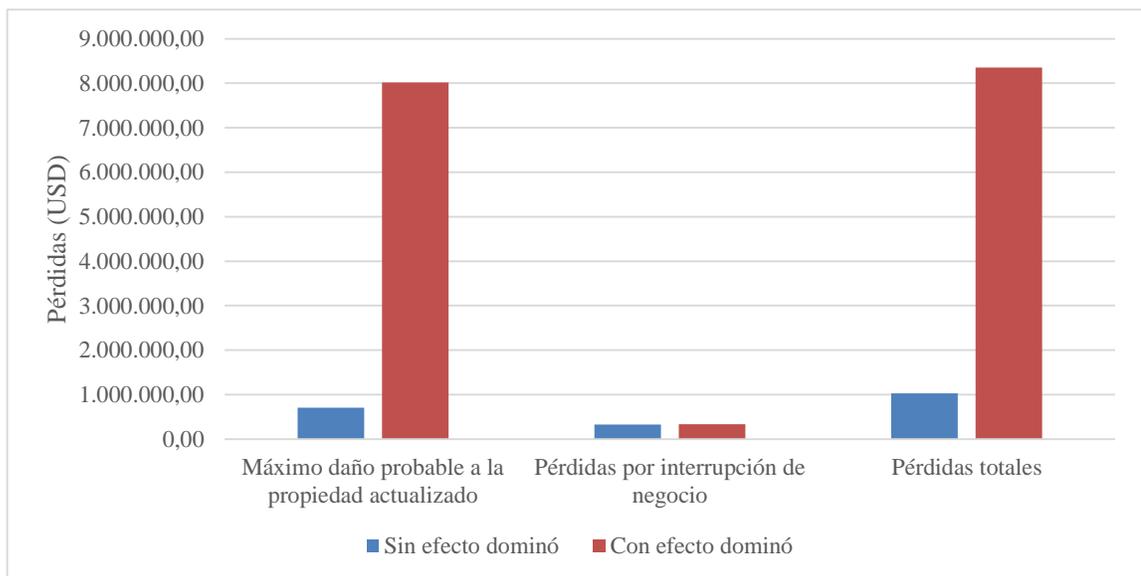


Figura 3.14: Comparación de las pérdidas totales sin y con efecto dominó

Las pérdidas relacionadas al máximo daño probable a la propiedad son más de ocho veces mayor con efecto dominó. Estas pérdidas influyen grandemente en que las pérdidas totales sean también cuantitativamente superiores. Sin embargo, no ocurre lo mismo con las pérdidas por paralización de la producción. Esto se debe a que estas pérdidas dependen de los máximos días probables perdidos, y estos, a lo sumo son 12, teniendo en cuenta que los accidentes ocurren dentro de una cadena de eventos.

Por esta razón, el F&EI de Dow, debe ser mejorado y adaptado para las condiciones reales del país donde está ubicada el área de estudio.

3.6 Resultados y análisis del impacto ambiental debido al carácter continuado de estos accidentes (Etapa 7)

La evaluación del impacto ambiental se realiza teniendo en cuenta la cantidad de humo y de contaminantes generados, así como, la cuantificación de la reducción de la calidad ambiental producto de estos accidentes.

Hay que tener en cuenta que estos valores de emisión están expresados como flujo, por lo que, en cada segundo, se van a generar esta cantidad de humo. Esto traería consigo una reducción considerable en la visibilidad durante el incendio y se vería seriamente dificultada las acciones de mitigación, al ser el humo una suspensión de pequeñas partículas sólidas que provienen de una combustión incompleta y contiene grandes cantidades de monóxido de carbono.

En la figura 3.15 se muestra la comparación entre los valores de emisión de humo para cada tanque.

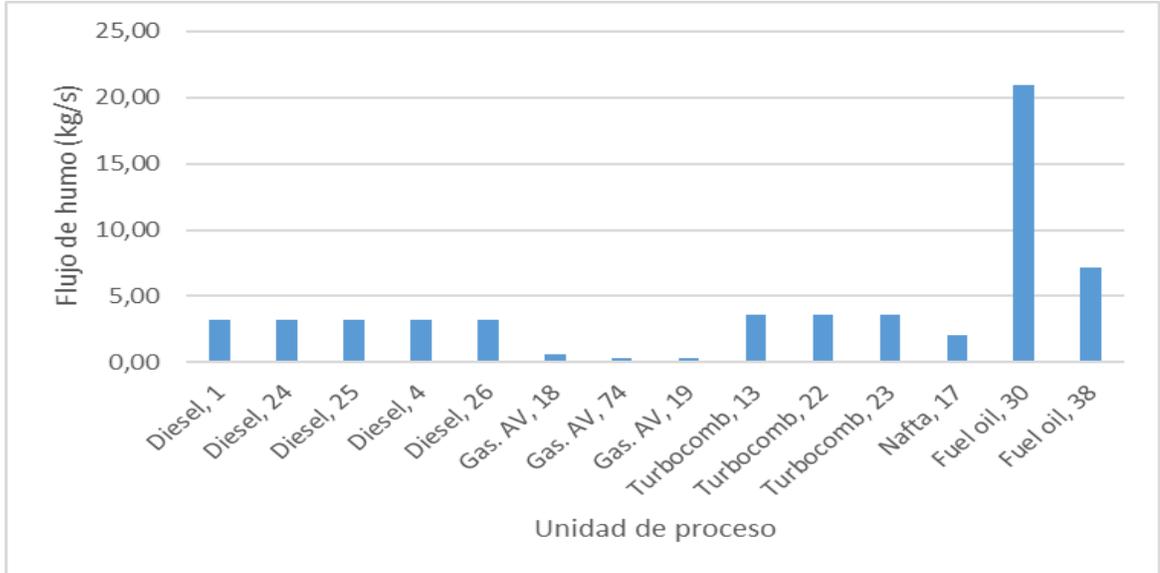


Figura 3.15: Flujo de humo generado en cada unidad de proceso

La mayor cantidad de humo se genera como consecuencia de un accidente en el tanque 30. Esto se debe a la gran capacidad de almacenamiento del mismo, ya que, el flujo de humo depende del flujo de combustible involucrado en el incendio.

Según *Quebec Minister of Energy and Natural Resources*, (2015) la salud humana se afecta gravemente por efecto del monóxido de carbono, lo cual puede terminar en la muerte de la persona expuesta.

Los valores de estas emisiones se muestran en la figura 3.16.

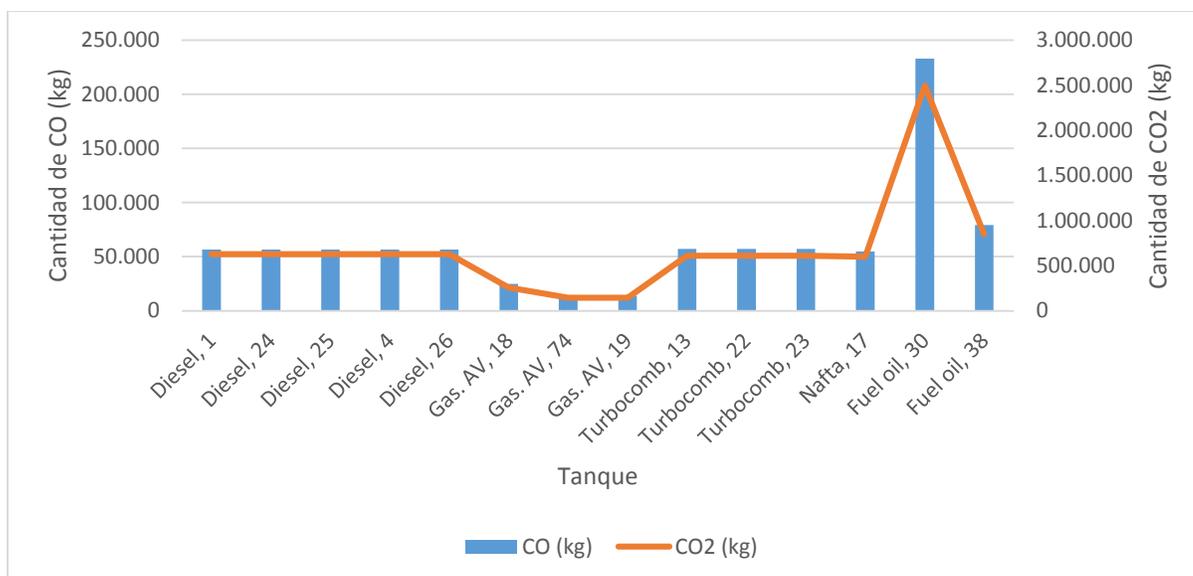


Figura 3.16: Valores de emisión de monóxido de carbono y de dióxido de carbono

Las cantidades de dióxido de carbono son mayores respecto a las de monóxido de carbono, ya que, a pesar de que hay combustión incompleta (típico de un incendio), existe también combustión completa. Esto concuerda con los resultados expuestos en la Conferencia Internacional de Contaminación Atmosférica (Pirrone, 2018).

Según las directivas del IPCC, para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, el dióxido de carbono es el gas que contribuye en mayor extensión a la ocurrencia del mismo.

En cuanto a estos gases y al humo, según Tewarson, (2008), se reduce la visibilidad considerablemente y dificulta la respiración, al disminuir la concentración de dióxígeno en la atmósfera considerablemente.

Según Conesa, (2000) con estos valores de emisiones de contaminantes a la atmósfera, la calidad ambiental se reduce en un 90%. Este resultado demuestra que los accidentes químicos constituyen una de las peores formas de contaminación ambiental que pueda existir y representan una afectación acelerada a la sostenibilidad.

En la figura 3.17 se muestra una comparación en cuanto a la emisión de monóxido y dióxido de carbono con y sin efecto dominó.

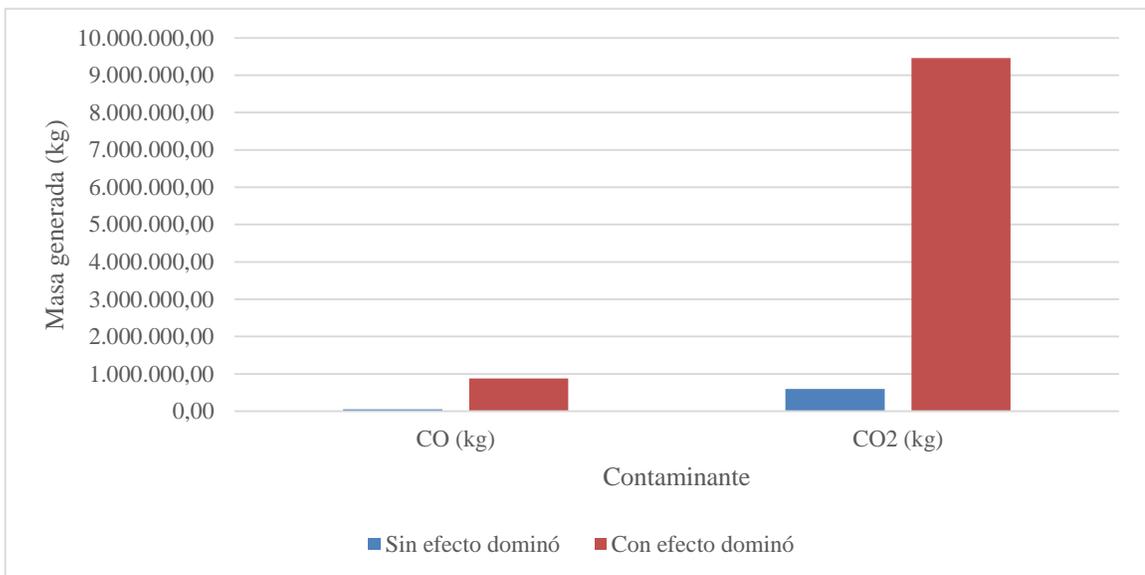


Figura 3.17: Comparación en cuanto a los valores de emisión de CO y CO₂

El efecto dominó de estos accidentes de incendio y explosión constituyen una afectación acelerada a la sostenibilidad ambiental. Se producen casi 16 veces más de CO y de CO₂ debido al carácter continuado de los mismos. Además, se producen casi 13 770 veces más CO con respecto a la emisión promedio del área según Cuesta-Santos *et al.*, (2017).

3.7 Resultados y análisis del impacto humano debido al carácter continuado de estos accidentes (Etapa 8)

El impacto individual traducido en el análisis de riesgos como curvas de isorriesgos es un paso previo de suma importancia en el impacto individual. El resultado de la aplicación de las Probit Y de Lees, (2012) y Wells (2003) se expusieron en el epígrafe 3.1. Los valores de vulnerabilidad fueron determinados con estos valores de probabilidad de daño.

La vulnerabilidad expresa la sumatoria de las probabilidades de perjuicios a las personas debido a las quemaduras por radiación (en el caso de escenarios de incendios) y a la hemorragia pulmonar y rotura de tímpanos por sobrepresión (en el caso de los escenarios de explosión). Los valores de vulnerabilidad se muestran en la figura 3.18.

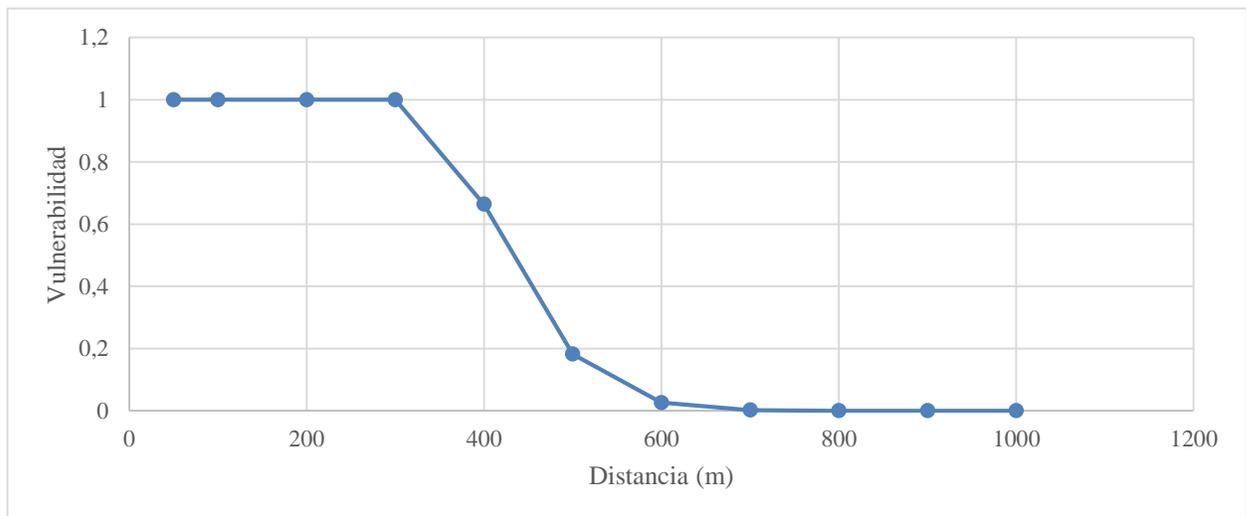


Figura 3.18: Distancia vs vulnerabilidad debido al carácter continuado de accidentes

Hasta una distancia de 300 metros la vulnerabilidad tiene su máximo valor: 1. Esto significa que todas las personas que se encuentren dentro de este radio de afectación son totalmente vulnerables a sufrir daños producto de los accidentes. Se toman los valores de

vulnerabilidad hasta una distancia de 1000 metros con $1,02 \cdot 10^{-6}$ para posteriormente cuantificar los niveles de riesgo. Estos valores de vulnerabilidad coinciden con los obtenidos por Huyen y Tram, (2018).

Con los valores de vulnerabilidad y probabilidad conjunta obtenida a partir de la red bayesiana del tanque 17, se determina el riesgo. Las curvas de isorriesgos se muestran en la figura 3.19.

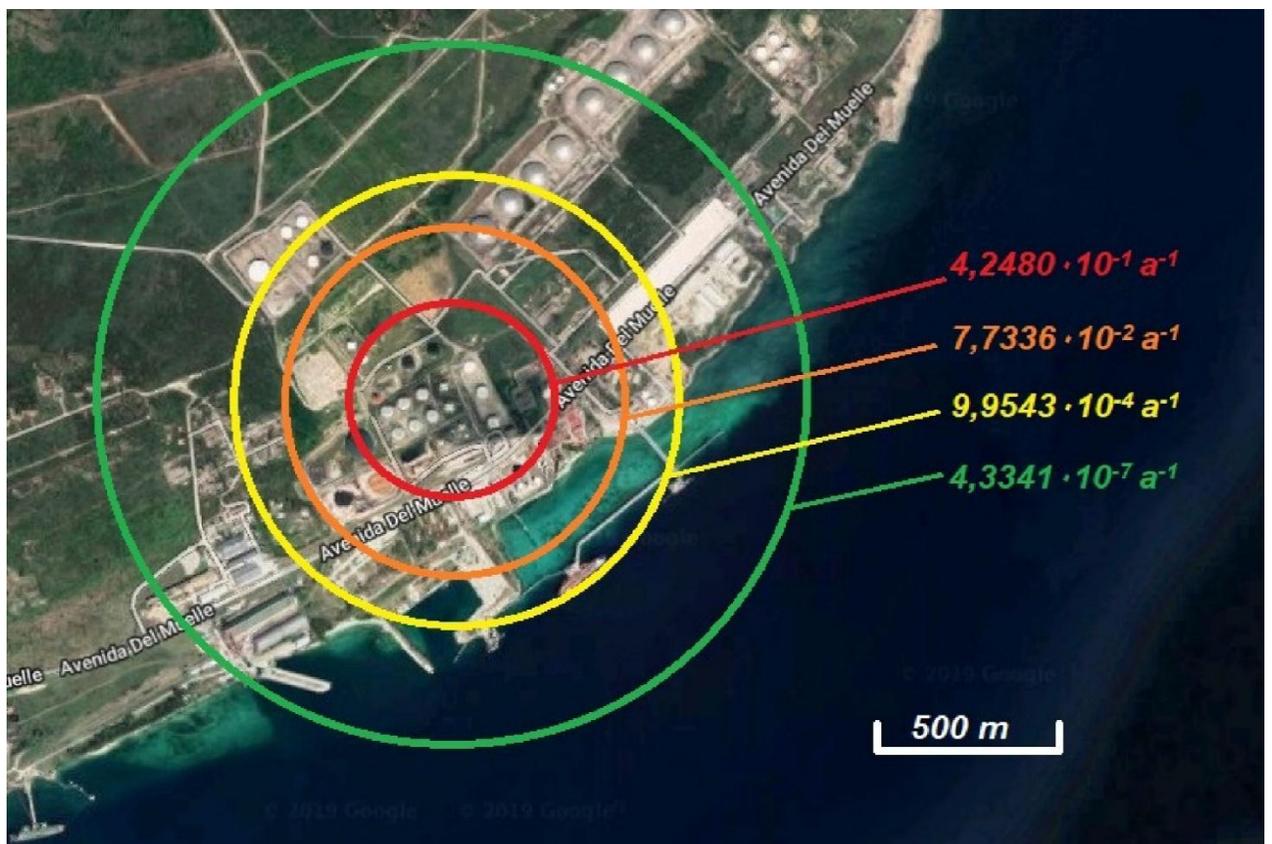


Figura 3.19: Curvas de isorriesgos correspondientes al tanque 17

El nivel de riesgo a una distancia de 300 metros es $4,2480 \cdot 10^{-1} a^{-1}$, esto significa que cada diez años pueden existir alrededor de cuatro fatalidades producto del carácter continuado de accidentes en el área estudiada. A una distancia de 500 metros pueden existir alrededor de siete fatalidades en cien años, y así, a medida que aumenta la distancia

disminuyen el riesgo y, por ende, las posibles fatalidades. Según Wells, (2003) estos valores de riesgo son elevados, y no deben descuidarse las medidas de seguridad industrial. Reniers y Cozzani, (2013) obtuvieron valores similares de riesgo en su investigación.

Cozzani *et al.*, (2006) plantea que la influencia de los eventos de escalado sobre los valores de riesgos es fuertemente dependiente de la posición del equipo dentro del área y de las características de la unidad de proceso. Esto se evidencia en esta investigación, ya que el tanque 17, que almacena nafta, es el más propenso a detonar la cadena de eventos, por el volumen que posee, por el nivel de inflamabilidad de la sustancia, por la frecuencia de derrames (obtenida a partir del análisis histórico), por la capacidad de propagarse el accidente a través de dos vectores de escalado (radiación y sobrepresión) y por su posición centralizada en el área. De ocurrir un derrame en el tanque 17, existe un elevado riesgo de que se detone el efecto dominó, cuya magnitud de consecuencias, según HSE, (2018) lo convertiría en un accidente mayor con consecuencias fatales para las personas, el medio ambiente y la economía. Es necesario reforzar las medidas de seguridad industrial respecto a esta unidad de proceso, por los altos valores de riesgo que se generan en torno a la misma.

3.8 Conclusiones parciales del capítulo

Una vez finalizado el presente capítulo, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones parciales:

1. De todos los escenarios provocados por un derrame inicial de la sustancia, el BLEVE más bola de fuego es el que presenta mayor radio de afectación, alcanzando sus radiaciones hasta 4,3 km del origen del accidente.
2. El tanque 17 es el más propenso a detonar la cadena de eventos dominó de todas las unidades de proceso con una probabilidad conjunta de 42,48%.
3. Las pérdidas totales debido al carácter continuado de accidentes son 8 352 759 USD; mientras que los máximos días probables perdidos son 12.
4. Producto al efecto dominó de accidentes de incendio y explosión se deteriora la calidad ambiental en un 90% y se expulsan a la atmósfera 875 422 kg y 9 457 752 kg de monóxido y dióxido de carbono respectivamente.
5. Los valores de riesgos para el impacto individual, obtenidos a diferentes distancias se consideran elevados según la literatura especializada, alcanzando un valor de $4,2480 \cdot 10^{-1} \text{ a}^{-1}$ a 300 m.

CONCLUSIONES

Como resultado final del trabajo desarrollado, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones:

1. El impacto económico, ambiental y humano debido al carácter continuado de accidentes de incendio y explosión es severo y fue pronosticado a partir del uso de técnicas de análisis de riesgos.
2. A través de las redes bayesianas y del IUPP se determinó que el tanque 17 es el más propenso a detonar la cadena de eventos y que la probabilidad conjunta del efecto dominó de accidentes toma un valor elevado de 42,48 %.
3. Las pérdidas totales debido al carácter continuado de accidentes son 8 352 759 USD y son ocho veces mayor que sin efecto dominó.
4. Producto al efecto dominó de accidentes de incendio y explosión se deteriora la calidad ambiental en un 90% y se expulsan a la atmósfera grandes cantidades de humo, monóxido y dióxido de carbono.
5. Todas las personas expuestas a un radio de 300 metros respecto al origen del accidente en el área poseen una vulnerabilidad máxima y siguen siendo vulnerables hasta un radio de 1000 metros.

RECOMENDACIONES

Basadas en las conclusiones obtenidas y para la extensión futura del presente trabajo, se realizan las siguientes recomendaciones:

1. Adaptar el Índice de Incendio y Explosión de Dow para las condiciones reales del país donde se aplique, con vista a obtener valores más realistas de pérdidas por paralización de la producción y máximos días probables perdidos.
2. Aplicar la secuencia metodológica propuesta para otras áreas de almacenamiento de hidrocarburos y para emitir un criterio conjunto de peligrosidad del área industrial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abdolhamidzadeh, B; Rashtchian, D; Morshedi, M. (2009). Statistical survey of domino past accidents. In: Proc. 8th World Congress of Chemical Engineering.
2. Abdolhamidzadeh, Bahman; Abbasi, Tasneem; Rashtchian, D; Abbasi, S.A. (2010). A new method for assessing domino effect in chemical process industry. Elsevier. Pages 416-426. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.08.063.
3. Abdolhamidzadeh, T Abbasi, D. Rashtchian, S.A. Abbasi. (2011). Domino effect in process-industry accidents – An inventory of past events and identification of some patterns. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Volume 24. No. 5. P 575-593.
4. Aboud, Alyaa. (2008). Planning of petrochemical industry under environmental risk and safety considerations. Waterloo, Ontario, Canadá. 200 p. Tesis en opción al grado de Máster de Ciencias Aplicadas en Ingeniería Química. Universidad de Waterloo.
5. Aissani, N; Guitarni, I.H.M; Lounis, Z. (2018). Decision process for safety based on Bayesian approach. IEEE.
6. AIChE. (1994). Dow's fire and explosion index hazard classification guide. 7th Ed. New York. Published by the American Institute of Chemical Engineers. New York, NY 10017. ISBN 0 8169 0623 8.

7. Alileche, N; Olivier, D; Estel, L; Cozzani, V. (2016). Analysis of domino effect in the process industry using the event tree method. Safety Science. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2015.12.028>.
8. Allen, Nigel. (2009). Hazards of high flash point liquids in relation to the ATEX 137 Directive. Symposium Series. No. 155.
9. ALOHA. (2016). EPA Software. Disponible en : www.epa.gov/comeoaloha-software.
10. Antonioni, G., Spadoni, G., Cozzani, V. (2009). Application of domino effect quantitative risk assessment to an extended industrial area. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Vol. 22. No 5. p 614-624.
11. API. (2016). In-situ burning. The fate of burned oil. Regulatory and Scientific Affairs Department. API Publication. Disponible en: <http://www.api.org>.
12. Atkinson, G; Coldrick, S; Gant, S; Cusco, L. (2015). Flammable vapor cloud generation from overfilling tanks: Learning the lessons from Buncefield. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 35, pp. 329-338. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2014.11.011>.
13. Atkinson, Graham. (2017 a). Development of Heavy vapour Clouds in very low wind speeds. Elsevier. [en línea] Pages 162-172. [citado 18 diciembre 2018]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2017.04.011>. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.04.011.

14. Atkinson, Graham; Cowpe, Edmund; Halliday, Julie; Painter, David. (2017 b). A review of very large vapour cloud explosions: Cloud formation and explosion severity. Elsevier. [en línea] Pages 367-375. [citado 18 diciembre 2018]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2017.03.021>. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.03.021.
15. Bagster, D.F; Pitblado, R.M. (1991). The estimation of domino incident frequencies: an approach. Process Safety Environment. Vol 69, p196.
16. Behnaz, Hosseinnia; Nima, Khakzad; Genserik, Reniers. (2018). Multi-plant emergency response for tackling major accidents in chemical industrial areas. Safety Science. [en línea]. [citado 7 junio 2018]. Vol. 102. 275-289. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.11.003>.
17. BEVI. (2009). Reference Manual BEVI Risk Assessments. Versión 3.2. Netherlands.
18. Birk; Albrecht Michael; Heymes, Frederic; Aprin, Laurent; Slagen, Pierre; Eyssette, Roland; Laurent, Pierre. (2016). Near field blast effects from BLEVE. Chemical Engineering Transactions. Vol 48, p 283-288. DOI: 103303/CET1648048.
19. Blengini, G.A., Blagoeva, D., Dewulf, J., Torres de Matos, C., Nita, V., Vidal-Legaz, B., Latunussa, C.E.L., Kayam, Y., Talens Peirò, L., Baranzelli, C., Manfredi, S., Mancini, L., Nuss, P., Marmier, A., Alves-Dias, P., Pavel, C., Tzimas, E., Mathieux, F., Pennington, D. and Ciupagea, C. (2017). Assessment of the Methodology for Establishing the EU List of Critical Raw Materials, Publications

Office of the European Union, Luxemburg. 978-92-79-69612-1, doi:10.2760/73303, JRC106997.

20. Bouhamed, Heni; Afi, Masmoudi; Therry, Lecroq; Ahmed, Rebaï. (2015). Structure Space of Bayesian Networks Is Dramatically Reduced by Subdividing It in Sub-Networks. *Journal of Computational and Applied Mathematics* 287. Pages 48–62. DOI: 10.1016/j.cam.2015.02.055.
21. Cai, B; Liu, Y; Fan, Q. (2018). A multiphase dynamic Bayesian networks methodology for the determination of safety integrity levels. *Reliability Engineering and System Safety*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2016.01.018>.
22. CAMEO. (2019). Developed by: Emergency Response Division National Oceanic and Atmospheric Administration. Office of Emergency Management United States Environmental Protection Agency. Versión 2.7.
23. Carol, Sergio. (2001). Una nueva metodología para la predicción de la gravedad de los accidentes industriales aplicando el análisis histórico. Barcelona, España. 289 p. Tesis presentada para optar al grado de Doctor Ingeniero Industrial. Universidad de Barcelona.
24. Casal, Joaquim; Darbra, Rosa-Mari. (2013). Analysis of past accidents and relevant case-histories. Elsevier. Pages 12-29.
25. Casal, Joaquín; Montiel, Helena; Planas, Eulalia; Vílchez, Juan. (2002). Análisis del riesgo en instalaciones industriales. 2da ed. Barcelona: Ediciones UPC. 362 p.

26. CCPS, (Center for Chemical Process Safety). (2000). Evaluating Process Safety in the Chemical Industry: A User's Guide to Quantitative Risk Analysis. American Institute of Chemical Engineers, New York (USA).
27. CCPS. (2008). Guidelines for Hazard Evaluation Procedures. Third ed. Center for the Chemical Process Safety, AIChE. New York (USA).
28. Chang, J.; Cheng, L. (2006) A study of storage tank accidents. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Vol. 19 p 51-59. doi:10.1016/j.jlp.2005.05.015
29. Changlong, Zhu; Juncheng, Jiang; Xiongjun, Yuan. (2012). Study on ignition probability of flammable materials after leakage accidents. Procedia Engineering. [en línea]. Volume 45. Pages 435-441 [citado 15 diciembre 2018]. Disponible en www.elsevier.com/locate/procedia. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.182.
30. Chen, C; Reniers, G; Zhang, L. (2018 a). An innovative methodology for quickly modeling the spatial-temporal evolution of domino accidents triggered by fire". Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 54, pp. 312-324, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.04.012>.
31. Chen, F; Zhang, M.G; Song, J; Zheng, F. (2018 b). of Conference. Risk Analysis on Domino Effect caused by pool fire in Petroliferous Tank Farm. En: Engineering, P. (ed.), 2017 8th International Conference on Fire Science and Fire Protection Engineering (on the Development of Performance-based Fire Code). Elsevier, vol. 211, pp. 46-54. [en línea] [citado 5 enero 2019]. Disponible en www.elsevier.com/locate/procedia. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.136.

32. Chen, Qinqin; Jia, Qian; Yuna, Zengwei; Huang, Lei. (2013). Environmental risk source management system for the petrochemical industry. *Process Safety and Environmental Protection* [en línea]. PSEP-343. [citado 22 enero 2018]. DOI: 10.1016/j.psep.2013.01.004. Disponible en: www.elsevier.com/locate/psep.
33. Chen, X ; Wu, Z ; Chen, W ; Kang, R ; He, X ; Miao, Y (2019) Selection of key indicators for reputation loss in oil and gas pipeline failure event. *Engineering Failure Analysis*. Vol. 99. p 69-84. Disponible en línea en: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.071>
34. Clini, F; Darbra, R.M, Casal, Joaquim. (2018). Historical analysis of accidents involving domino effect.
35. Conesa, V. (2000). Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. Madrid. 3ra ed. Edición Mundi-prensa. 401 p.
36. Conrady, Stefan; Lionel Jouffe. (2015). Bayesian Networks and BayesiaLab. A practical Introduction for Researchers. Pages 13-22.
37. Cozzani V., Antonioni G., Khakzad N., Khan F., Taveau J., Reniers G. (2013). Quantitative Assessment of Risk Caused by Domino Accidents. *Domino Effects in the Process Industries, Modeling, Prevention and Managing*. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
38. Cozzani, V., Gubinelli, G., & Salzano, E. (2006). Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. *Journal of Hazardous Material*. Vol. 129(1-3), 1-21.

39. Cozzani, Valerio; Salzano, Ernesto; Campedel, Michela; Sabatini, Martina; Spadoni, Gigliola. (2007). The assessment of major accident hazards caused by external events. IChemE Symposium Series. No. 153.
40. Cuesta-Santos, Osvaldo; Sosa, Carlos; Iraola, Caridad. (2017). Inventario nacional de emisiones atmosféricas de las principales fuentes fijas. Revista Cubana de Meteorología. Vol. 23. No. 2. P 178-190. ISSN: 0864-151X.
41. Darbra, R.M.; Palacios, A. ; Casal, J., 2010. “Domino effect in chemical accidents: Main features and accident sequences”. Journal of Hazardous Materials, 183, pp. 565-573, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.07.061.
42. Delvosalle, C., Fievez, C., Brohez, S. (1998). Domino effects phenomena: definition, overview and classification. European Seminar on Domino Effects. Ed. Direction Chemical Risks. Federal Ministry of Employment. Bruselas. p 5-15.
43. Denat, Tom. (2017). Creation of a Biodiversity Severity Index to evaluate the risks of accidental pollutions in the industry: a multi-criteria sorting approach. París. 270 p. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias. Universidad de París.
44. Djelosevic, M. ; Tepic, G., 2019. “Identification of fragmentation mechanism and risk analysis due to explosion of cylindrical tank”. Journal of Hazardous Materials, 362, pp. 17-35, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.09.013>.
45. Economic Indicators. (2019). Chemical Engineering Plant Cost Index, CEPCI. [en línea]. [citado 2 junio 2019]. Disponible en <http://www.chemengonline.com/pci>.

46. Fabbri, L Binda, M Bruinen de Bruin, Y. (2017). Accident Damage Analysis Module (ADAM) – Technical Guidance, EUR 28732 EN, 2017, ISBN 978-92-79-71879-3, doi:10.2760/719457.
47. Garg, Amit; Kazunari, Kainou; Pulles, Tinus. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. [en línea]. [citado 3 abril 2018]. Disponible en <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=incoll&nr=888>.
48. Gill, Joel C; Malamund, Bruce D. (2016). Hazard interactions and interaction networks (cascades) within multi-hazard methodologies. *Earth Syst. Dynam.* [En línea]. 659–679. [Citado: 23 agosto 2016]. DOI:10.5194/esd-7-659-2016. Disponible en www.earth-syst-dynam.net/7/659/2016/.
49. Goerlandt, Floris; Khakzad, Nima; Reniers, Genserik. (2017). Validity and validation of safety related quantitative risk analysis: A review. *Safety Science*. [en línea]. Volume 99. Pages 127-139. [citado 31 enero 2018]. Disponible en www.elsevier.com/locate/ssci. DOI: 10.1016/j.ssci.2016.08.023.
50. Gorrens, B; De Clerck, W; De Jongh, K; Aerts, M. (2009). Domino effecten van en naar Seveso-inrichtingen. Rep. 07.0007. Flemish Ministry of Environment, Nature and Energy, Brussels (Belgium).
51. Gunasekera, M y Edwards, D. (2003). Estimating the Environmental Impact of Catastrophic Chemical Release to the Atmosphere, An Index Method for Ranking Alternative Chemical Process Routs. *Trans IChemE*. Vol. 81. P 463-474.

52. Guo, Song; Peng, Minjun; Ruan, Jifeng; Wam, Wei. (2013). Cause analysis of the fire and explosion during crude oil desulfurization in China. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. [En línea]. 961-967 p. [citado: 29 septiembre 2013]. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/jlp>.
53. Gyenes, Zsuzsanna; Wood, Maureen; Struckl, Michael. (2017). *Handbook of Scenarios for Assessing Major Chemical Accident Risks*. EUR 28518 EN. DOI:10.2760/884152.
54. Hadjisophocleous y Benichou. (2016). *Fire safety design guidelines for federal buildings*. [en línea]. NRC Publications Archive. [citado 20 junio 2017]. Disponible en <https://nparc.nrc-cnrc.gc.ca/eng/view/fulltext/?id=063cc389-d483-4a62-aa43-b163cf01138d>.
55. Hemmatian, Behrouz; Planas-Cauchí, Eulàlia; Casal, Joaquim. (2014). Analysis of methodologies and uncertainties in the prediction of BLEVE blast. *Chemical Engineering Transactions*. Vol 36, p 541-546. DOI: 10.3303/CET1436091.
56. HSE (Health and Safety Executive). (1984). *The Control of Major Hazards, Third Report of the HSC Advisory Committee on Major Hazards*. HMSO, London (UK).
57. HSE. (2016). *Prevention of fire and explosion, and emergency response on offshore installations*. Third edition. ISBN 978 0 7176 6326 2.
58. HSE. (2018). *Annual Science Review. Helping Great Britain work well*. [en línea] [citado 15 enero 2019]. Disponible en: <http://www.hse.gov.uk/horizons/>.

59. Huang, Yimiao. (2017). Quantitative risk analysis for explosion safety of oil and gas facilities. 147 p. Tesis presentada para obtener el grado científico de Doctor en Filosofía en la Universidad Occidental de Australia.
60. Hugin. (2019). Gasvaerksvej 5. DK-9000 Aalborg. Denmark. Lite 8.7.
61. Huyen, D.T; Tram, L.T. (2018). Development of a Procedure for Evaluating the Impacts of the Accidental Emission of Hazardous Chemicals, Case Study in Ho Chi Minh City, Vietnam. Environmental Management. DOI: 10.1007/s00267-017-0979-0.
62. ICI. (1985). Imperial Chemical Industries. The Mond Index. Second edition. ICI, Warrington.
63. INSHT. (1995). Índices de riesgo de procesos químicos. INSHT, Barcelona.
64. Jensen, F.V; Nielsen, T.D. (2007). Bayesian Networks and Decision Graphs. Second ed. Springer. New York, (USA).
65. Jie, Li; Genserik, Reniers; Cozzani, Valerio; Faisal, Khan. (2017). A bibliometric analysis of peer-reviewed publications on domino effects in the process industry. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JLP.2016.06.003>.
66. Jongejan R.B., Jonkman S.N., Maaskant B. (2010). The potential use of individual and societal risk criteria within the Dutch flood safety policy. (Parte 1): basic principles, in Press. Proceedings of ESREL 2009.

67. Kabir, G; Sadiq, R; Tesfamariam, S. (2015). A fuzzy Bayesian belief network for safety assessment of oil and gas pipelines. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2015.1053093>.
68. Kabir, S ; Papadopoulos, Y. (2018). A review of applications of fuzzy sets to safety and reliability engineering. *International Journal of Approximate Reasoning*. Vol. 100 p 29-55. Disponible en línea en: <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2018.05.005>
69. Kabir, S ; Papadopoulos, Y. (2019). Applications of Bayesian network and Petri nets in safety, reliability and risk assessments: A review. *Safety Science*. Vol. 115 p 154-175. Disponible en línea en: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.009>
70. Kadri, Farid; Chatelet, Eric; Lallement, Patrick. (2013). The assessment of risk caused by fire and explosion in chemical process industry: A domino effect based study. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*. Vol. 3. No 2. P 66-76.
71. Khakzad, N; Khan, F.I; Amyotte, P; Cozzani, V. (2013). Domino effect analysis using Bayesian networks. *Risk Analysis*, Vol 33, p 292–303.
72. Khakzad, Nima; Amyotte, Paul; Cozzani, Valerio; Reniers, Genserik; Pasman, Hans. (2018). How to address model uncertainty in the escalation of domino effects? Elsevier. [en línea] [citado 10 enero 2019]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.03.001>. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.03.001.
73. Khan, F. Abbasi, S. (1998). Models for domino effect analysis in the chemical process industries. *Process Safety. Prog.* 17. p. 107–123.

74. Kidam, Kamarizan; Hurme, Markku. (2013). Analysis of equipment failures as contributors to chemical process accidents. *Process Safety and Environmental Protection*. [en línea]. Volume 91. Issues 1-2. January-March 2013. [en línea]. Pages 61-78. [citado 23 diciembre 2018]. Disponible en www.elsevier.com/locate/psep. DOI: 10.1016/j.psep.2012.02.001.
75. Kouk, H ; Siti, Z ; Ezutah, U. (2018). Integrating fuzzy expert system and scoring system for safety performance evaluation of offshore oil and gas platforms in Malaysia. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 56 p 32-45. Disponible en línea en: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.08.005>
76. Koulinas, G ; Marhavilas, P ; Demesouka, O ; Vavatsikos, D ; Koulouriotis, D. (2019). Risk analysis and assessment in the worksites using the fuzzy analytical hierarchy process and a quantitative technique: A case study for the Greek construction sector. *Safety Science*. Vol 112 p 96-104. Disponible en línea en: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.10.017>
77. Kourniotis, S.P; Kiranoudis, C.T; Markatos, N.C. (2000). Statistical analysis of domino chemical accidents. *Journal of Hazardous Materials* 71, 239–252.
78. Kumar, R., 2018. Truth or Dare: Quantitative security risk analysis using attack trees. Doctorado. India: University of Twente.
79. Landucci, G; Necci, A; Antonioni, G; Argenti, F; Cozzani, V. (2017). Risk assessment of mitigated domino scenarios in process facilities. *Reliability*

Engineering and System Safety, 160, pp. 37-53. DOI:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2016.11.023>.

80. Laurent, André; Perrin, Laurent; Dufaud, Oliver. (2016). Consequence Assessments of a Cold BLEVE. Can we do it better? Chemical Engineering Transactions. Vol 48, p 211-216. DOI: 10.3303/CET1648036.
81. Lees, F.P. (1996). Loss Prevention in the Process Industries. Second ed. Butterworth-Heinemann. Oxford (UK).
82. Lees, F.P. (2005). In: Mannan, S. (Ed.), Loss Prevention in the Process Industries, third ed. Butterworth-Heinemann, Oxford (UK).
83. Lees, F.P. (2012). Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control, fourth edition. ED. Mannan S., Elsevier Butterworth-Heinemann.
84. Leoni, L; Toroody, A.B; Carlo, F.D; Paltrinieri, N. (2019). Developing a risk-based maintenance model for a Natural Gas Regulating and Metering Station using Bayesian Network. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 57, pp. 17-24, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.11.003>.
85. Maaskant, B; Jonkman, S.N; Jongejan, R.B. (2010). The use of individual and societal risk criteria within the Dutch flood safety policy (part 2): estimation of the individual and societal risk for the dike rings in the Netherlands.

86. Machado, R. ; Roman, F., 2017. "Effect of tank diameter on thermal behavior of gasoline and diesel storage tanks fires". Journal of Hazardous Materials, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.052>.
87. Manual de Operaciones. (2018). Terminal 320. División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas. Cuba.
88. Matlab. (2013). Produced by U.S and international patents. Versión 8.1.0.604.
89. Mishra; Bhushan-Kirti; Wehrstedt, Klaus-Dieter; Krebs, Holger. (2015). Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE) of peroxy-fuels. Experiments and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. Elsevier. Pages 149-152. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.02.082.
90. Moya, B. (2013). Consulta personal. Especialista principal en Meteorología. CITMA. Matanzas.
91. Mukhim, E.D; Abbasi, T; Tauseef, S.M; Abbasi, S.A. (2018). An Assessment of the Appropriateness of the Prescribed "Safe Distances" for Siting Hazardous Process Units to Prevent Domino Effect. Advances in Fire and Process Safety, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7281-9_5.
92. Mukhim, Euginia-Diana; Abbasi, Tasneem; Tauseef, S.M; Abbasi, S.A. (2017). Domino effect in chemical process industries triggered by overpressure. Formulation of equipment-specific probits. Elsevier. [en línea] Pages 263-273. [citado 25 febrero 2019]. Disponible en www.elsevier.com/locate/psep. DOI: 10.1016/j.psep.2017.01.004.

93. Neapolitan, Richard E. (2004). Learning Bayesian Networks. Editorial Elsevier.
94. Necci, Amos (2015). Cascading events triggering industrial accidents: Quantitative Assessment of NaTech and Domino Scenarios. Bologna. 204 p. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad de Bologna.
95. NFPA. (1994). Fire Protection Handbook. NFPA, Quincy, USA.
96. Nomen, Rosa; Sempere, Julia; Mariotti, Valeria. (2014). QRA including domino effect as a tool for Engineering Design. Procedia Engineering. [en línea]. Vol. 84, p 23-32 [citado 5 enero 2019]. Disponible en www.elsevier.com/locate/procedia. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.406.
97. Nwabueze, Dili. (2016). Liquid hydrocarbon storage tank fires- How prepared is your facility? Chemical Engineering Transactions [en línea]. Vol. 48, p 301-306. [citado 1 febrero 2019]. Disponible en: www.aidic.it/cet. DOI: 10.3303/CET1648051.
98. Paris, L., 2019. "An engineer-based methodology to perform Explosion Risk Analyses". Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 57, pp. 254-272, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.12.009>.
99. Pirrone, N., 2018. "Conference Proceedings of the CNR-Institute of atmospheric pollution research". En: Ambiente.
100. PNUMA. (1999). Control de riesgos de accidentes mayores. Manual práctico. 2da ed. Ginebra: Ediciones de Oficina Internacional de Trabajo. 182 p.

101. Poljanšek, K., Marin Ferrer, M., De Groeve, T., Clark, I. (2017). Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less. EUR 28034 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-92-79-60678-6, doi:10.2788/688605, JRC102482.
102. Post, J.G; Bottelberghs, P.H; Vijgen, L.J; Matthijsen, A.J.C.M. (2003). Instrument Domino Effecten. RIVM, Bilthoven (The Netherlands).
103. Quebec Minister of Energy and Natural Resources. (2015). Public Health Issues related to gas and oil hydrocarbon exploration and production. Environmental Health and toxicology branch. Quebec.
104. Reniers, Genserik; Cozzani, Valerio. (2013). Domino Effects in the Process Industries. Modeling, Prevention and Managing. Elsevier. 372 p.
105. Reniers, Genserik; Khakzad, Nima. (2017). Revolutionizing safety and security in the chemical and process industry: applying the CHESS concept. Integrated Security Science. [en línea]. Vol 2. No. 15. [citado 7 diciembre 2017]. ISSN: 2468-4546. DOI: 10.18757/jiss.2017.1.1547.
106. Renjith.V.R; Madhu.G. (2010). Individual and societal risk analysis and mapping of human vulnerability to chemical accidents in the vicinity of an industrial area. India. Pages 135-148.
107. Resolución No. 55. (2017). Ministerio de Finanzas y Precios. Habana. Cuba.
108. Sánchez, E.Y; Represa, S; Mellado, D; Balbi, K.B; Acquesta, A.D; Colman, J.E; Porta, A.A. (2018). Risk analysis of technological hazards: Simulation of

- scenarios and application of a local vulnerability index. *Journal of Hazardous Materials*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.03.034>.
109. Sanmiquel, Lluís; Bascompta, Marc; Rossell; Antiocoi, Hernán; Guash, Eduard. (2018). Analysis of occupational accidents in underground and surface mining in Spain using data-mining techniques. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. [en línea]. Vol.15. No. 462. [citado 16 mayo 2018]. DOI: 10.3390/ijerph15030462. Disponible en: www.mdpi.com/journal/ijerph.
110. Sharma, Vaibhav; Nandan, Abhishek; Anwar, Nihal. (2018). Study and analysis of storage tank hazards and its mitigation measures using bow tie diagram. *Research and Reviews: Journal of Engineering and Technology*. Vol. 7. Marzo. e-ISSN: 2319-9873.
111. Shawn, P; Urbanski, Wei, M. (2009) Chemical Composition of Wildland Fire Emissions. *Developments in Environmental Science, Volume 8* ISSN: 1474-8177/DOI:10.1016/S1474-8177(08)00004-1
112. Shi, Jihao; Zhu, Yuang; Khan, Faisal; Chen, Guoming. (2019). Application of Bayesian Regularization Artificial Neural Network in explosion risk analysis of fixed offshore platform. Elsevier. [en línea] Vol. 57, p 131-141. [citado 8 enero 2019]. Disponible en www.elsevier.com/locate/jlp. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.10.009.
113. Shuai, M ; Chengzhi, W ; Shiwen, Y ; Hao, G ; Jufang, Yu ; Hui, Ho. (2018) Review on Economic Loss Assessment of Power Outages. *Procedia Computer*

Science. Vol. 130 p 1158-1163. Disponible en línea en:
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.151>

114. Simon, Christophe; Mechri, Walid; Capizzi, Guillaume. (2019). Assessment of Safety Integrity Level by simulation of Dynamic Bayesian Networks considering test duration. Elsevier. [en línea] Vol. 57, p 101-113. [citado 8 enero 2019]. Disponible en www.elsevier.com/locate/jlp. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.11.002.
115. Smith, D ; Veitch, B ; Khan, F ; Taylor, R. (2016). Understanding industrial safety: Comparing fault tree, Bayesian network and FRAM approaches. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Disponible en línea en:
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.11.016>
116. Spirtes, P; Glymour, C; Scheines, R. (2000). Causación, predicción y búsqueda. MIT Press, computación adaptativa y aprendizaje automático. Segunda edición.
117. Spoelstra M, Mahesh S, Heezen P, Kooi E. Domino effects at LPG and Propane Storage Sites in the Netherlands. (2015). *Reliability Engineering and System Safety*. [En línea].143, 2015, pp. 85–90.
118. Tauseef, S. M.; Abassi, Tasneem; Pompapathi, V.; Abassi, S. A. (2018). Case studies of 28 major accidents of fire/explosions in storage tank farms in the backdrop of available codes/standards/models for safely configuring such tank farms. *Process Safety and Environment Protection*. [En línea].331-338 p. [Citado en: 14 septiembre 2018]. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/psep>.

119. Tewarson, Archibald. (2008). Smoke emissions in fires. FM Global. 1151 Boston-Providence Turnpike. Norwood. MA 02062. USA.
120. Uijt de Haag, P.A.M; Ale, B.J.M. (1999). Guidelines for Quantitative Risk Assessment (Purple Book). Committee for the Prevention of Disasters, The Hague (NL).
121. User's Manual ALOHA. (2016). U.S. Environmental Protection Agency. Office of Emergency Washington, D.C.
122. Vairo, T; Reverberi, A.P; Milazzo, M.F; Fabiano, B. (2018). Ageing and Creeping Management in Major Accident Plants according to Seveso III Directive. Chemical Engineering Transactions, 67, pp. 403-410. DOI: 10.3303/CET1867068.
123. Vallee, A; Bernuchon, E; Hourtolou, D. (2002). MICADO: Méthode pour l'identification et la caractérisation des effets dominos, Rep. INERIS-DRA-2002-25472, Direction des Risques Accidentels, Paris (France).
124. Vallinayagam, R.; Vedharaj, S.; An, Yanzhao; Dawood, Alaaeldin; Izadi Najafabadi, Mohammad; Somers, Bart; Johansson, Bengt. (2017). Combustion stratification for naphtha from CI combustion to PPC. SAE Technical Paper Series. [en línea]. 13 p. [citado 11 abril 2018]. Disponible en <http://hdl.handle.net/10754/625129>. DOI: 10.4271/2017-01-0745.
125. Vieira, E. M. A; Silva, J. M. N; Silva, L. B (2017). Modeling Bayesian Networks from a conceptual framework for occupational risk analysis. Production,

- 27, e20162239. [en línea] [citado 28 diciembre 2018] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.223916>. DOI: 10.1590/0103-6513.223916.
126. Villa, Valeria; Cozzani, Valerio. (2016) Application of Bayesian Networks to Quantitative Assessment of Safety Barriers' Performance in the Prevention of Major Accidents. *Chemical Engineering Transactions*, 53, p 151-156. DOI: 10.3303/CET1653026.
127. Vipin, K.; Pandey, S.K.; Tauseef, S.M.; Abbasi, T. ; Abbasi, S.A., 2018. "Pool Fires in Chemical Process Industries: Occurrence, Mechanism, Management". *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 18 (3), DOI: 10.1007/s11668-018-0517-2.
128. Wang, N.; Xu, C.; Du, X.L. ; Zhang, M.J., 2017. "A risk assessment method of deep excavation based on Bayesian analysis and expert elicitation". *Int J Syst Assur Eng Manag*, DOI: 10.1007/s13198-017-0689-2.
129. Wang, Y; Yang, H; Yuan, X; Cao, Y. (2018) of Conference. An improved Bayesian network method for fault diagnosis. En: Elsevier (ed.), IFAC. Elsevier. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.09.443.
130. Wells, Geoff. (2003). Major Hazards and their management. Gulf Publishing Company. Houston, Texas.315 p.
131. Yazdi, M, (2019). A review paper to examine the validity of Bayesian network to build rational consensus in subjective probabilistic failure analysis. *Int J Syst Assur Eng Manag*, pp. 18. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13198-018-00757-7>.

132. Zarel, E ; Khakzad, N ; Cozzani, V ; Reniers, G. (2019). Safety analysis of process systems using Fuzzy Bayesian Network (FBN). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 57 p 7-16. Disponible en línea en: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.10.011>
133. Zarranejad, A. y Ahmadi, O. (2016). Fire and explosion risk assessment in a chemical Company by the application of Dow fire and explosion index. *JOHE*, Summer. Vol 4. No. 3.
134. Zerrouki, H; Smadi, H. (2016). Bayesian Belief Network Used in the Chemical and Process Industry: A Review and Application. *J Fail. Anal. and Preven.* DOI: 10.1007/s11668-016-0231-x.
135. Zhang, Laobing; Landucci, Gabriele; Reniers, Genserik; Khakzad, Nima; Zhou, Jianfeng. (2017). DAMS: A model to assess domino effects by using agent-based modeling and simulation. *Society for Risk Analysis*. DOI: 10.1111/risa.12955.
136. Zhao, R ; Liu, Silin ; Liu, Y ; Zhang, L ; Li, Y. (2018). A safety vulnerability assessment for chemical enterprises. A hybrid of a data envelopment analysis and fuzzy decision-making. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Disponible en línea en: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.08.018>
137. Zheng, F; Zhang, M.G; Song, J.; Chen, F. (2018) of Conference. Analysis on risk of multi-factor disaster and disaster control in oil and gas storage tank. En: Elsevier (ed.), 2017 8th International Conference on Fire Science and Fire

Protection Engineering (on the development of performance-based fire code).
Procedia Engineering, vol. 211, pp. 1058-1064.

138. Zhou, Y ; Li, C ; Zhou, C. (2018). Using Bayesian network for safety risk analysis of diaphragm Wall defelction based on field data. *Reliability Engineering and System Safety*. Disponible en línea en: <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.07.014>
139. Zhou, Yi; Zhao, Xiaogang; Zhao Jianyu; Chen, Du. (2016). Research on fire and explosion accidents of oil depots. *Chemical Engineering Transactions*. [en línea]. Vol. 51. [citado 7 diciembre 2017]. ISBN: 978-88-95608-43-3. ISSN: 2283-9216. DOI: 10.3303/CET1651028. Disponible en: www.aidic.it/cet.

ANEXOS

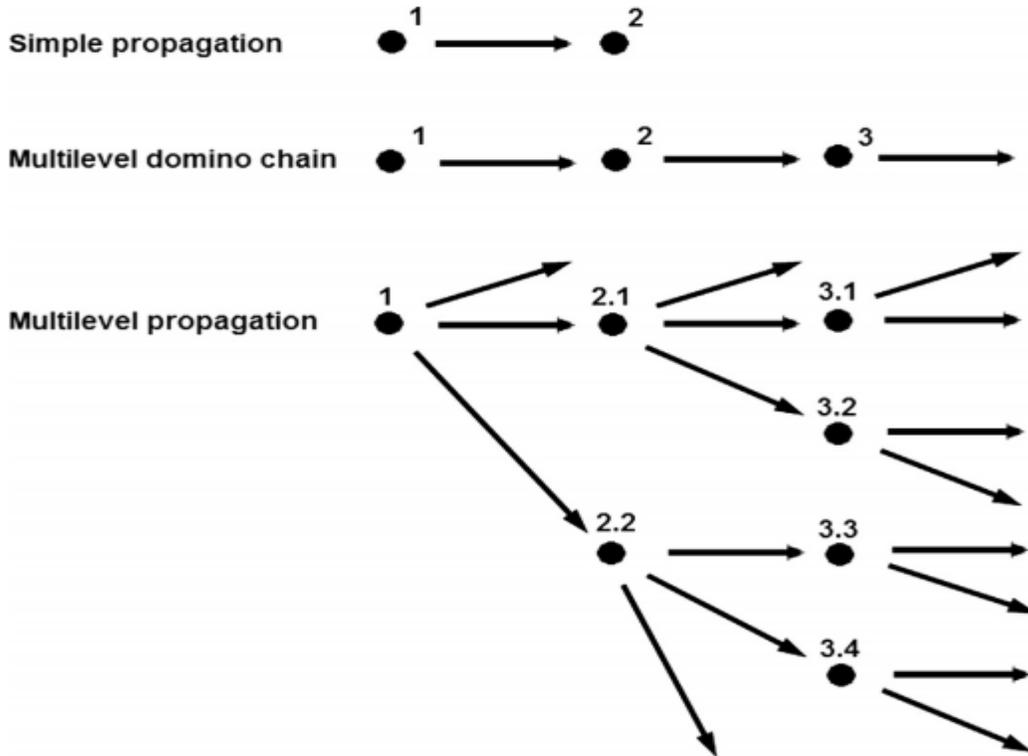
Anexo 1: Definiciones dadas para efecto dominó por diferentes autores.

Autor (es).	Efecto dominó / Definición de accidente.
Tercer informe del Comité Asesor sobre Riesgos Mayores (HSE, 1984).	Los efectos de accidentes mayores en otras plantas en el sitio o sitios cercanos.
Bagster y Pitblado, (1991).	Una pérdida de la contención de un elemento de la planta que resulta de un incidente importante en una unidad de planta cercana.
Lees, (1996).	Un evento en una unidad que causa un evento adicional en otra unidad.
Khan y Abbasi, (1998).	Una cadena de accidentes o situaciones en las que una cantidad de fuego / explosión / proyectil / tóxico generada por un accidente en una unidad en una industria causa accidentes secundarios y de orden superior en otras unidades.
Delvosalle <i>et al.</i> , (1998).	Una cascada de accidentes (efecto dominó) en la que las consecuencias de un accidente previo se incrementan para el (los) siguiente (s), tanto espacial como temporalmente, lo que lleva a un accidente mayor.
Uijt de Haag y Ale, (1999).	El efecto de que la pérdida de contención de una instalación lleva a la pérdida de contención de otras instalaciones.
CCPS, (2000).	Un accidente que comienza en un elemento y puede afectar a elementos cercanos por impacto térmico, de explosión o de fragmentos.
Vallee <i>et al.</i> , (2002).	Un fenómeno accidental que afecta a una o más instalaciones en un establecimiento que puede causar un fenómeno accidental en un establecimiento adyacente, lo que lleva a un aumento general de las consecuencias.
Post <i>et al.</i> , (2003).	Un accidente grave en una llamada empresa expuesta como resultado de un accidente grave en una llamada empresa causante. Un efecto dominó es un evento posterior que ocurre como consecuencia de un accidente de dominó.
Lees, (2005).	Un factor para tener en cuenta el peligro que puede ocurrir si la fuga de un material peligroso puede provocar la escalada del incidente, por ejemplo. una pequeña fuga que se incendia y daña por impacto de la llama en

	una tubería o recipiente más grande con el posterior derrame de un gran inventario de materiales peligrosos.
Cozzani <i>et al.</i> , (2006).	Secuencias accidentales que tienen al menos tres características comunes: (1) un escenario accidental primario, que inicia la secuencia de accidentes dominó; (2) la propagación del evento primario, debido a un vector de escalado generado por los efectos físicos del escenario primario, que resulta en el daño, como mínimo, de una parte del equipamiento secundario; y (3) uno o más eventos secundarios (es decir, incendio, explosión y dispersión tóxica), que involucran daños en partes de equipos (el número de eventos secundarios suele ser el mismo que el de los elementos dañados de la planta).
Bozzolan y Messias de Oliveira Neto, (2007).	Un accidente en el que un evento primario que se produce en un equipo primario se propaga a un equipo cercano, lo que desencadena uno o más eventos secundarios con graves consecuencias para las plantas industriales.
Gorrens <i>et al.</i> , (2009).	Un accidente importante en una instalación llamada secundaria que es causada por la falla de una fuente de peligros externa.
Antonioni <i>et al.</i> , (2009).	La propagación de un evento de accidente primario a unidades cercanas, causando su daño y otros eventos de accidentes secundarios, lo que resulta en un escenario general más grave que el evento primario que desencadenó el escalado.

Fuente: Adaptado de Reniers (2010) y Abdolhamidzadeh et al. (2011).

Anexo 2: Ejemplos de propagación simple, cadena de dominó de múltiples niveles y patrones de propagación en paralelo de múltiples niveles.



Anexo 3: Clasificación de los índices de riesgo según su grado de descripción.

Basados en la definición de riesgo. (grado de descripción bajo).	Basados en la carga de fuego. (grado de descripción medio).	Basados en la peligrosidad de las sustancias. (grado de descripción alto).
Fine SEPTRI HRN	MESERI Gretener Eric Purt Carga de fuego ponderada Coeficientes K Coeficientes α	IFAL F&EI (de Dow) Mond (de ICI) UCSIP IRPQ (de INSHT) CEI (de Dow)

Fuente: Carol, (2001).

Anexo 4: Caracterización tecnológica de los tanques dentro de la Terminal-320.

Tanque	Sustancia almacenada	Capacidad nominal (m ³)	Diámetro del tanque (m)	Altura operacional (m)	Diámetro de la tubería (m)	
					Entrada	Salida
T-1	Diesel	8542	35,0	6,660	0,3048	0,2032
T-24	Diesel	11341	34,2	10,600	0,3048	0,3048
T-25	Diesel	11411	34,2	10,600	0,3048	0,2032
T-4	Diesel	10996	34,2	10,800	0,3048	0,2032
T-26	Diesel	11608	34,2	10,600	0,3048	0,3048
T-18	Gasolina de aviación	2316	15,5	10,500	0,2032	0,1524
T-74	Gasolina de aviación	1186	11,0	10,500	0,1524	0,1524
T-19	Gasolina de aviación	745	10,2	8,000	0,1524	0,1524
T-13	Turbo-combustible	11147	36,5	9,600	0,3048	0,3048
T-22	Turbo-combustible	10885	34,2	10,700	0,3048	0,3048
T-23	Turbo-combustible	11524	34,2	10,600	0,3048	0,3048
T-17	Nafta	4647	22,0	10,950	0,3048	0,2032
T-30	Fuel oil	10914	34,2	10,500	0,6096	0,4064
T-38	Fuel oil	10919	34,2	10,600	0,3556	0,3048

Fuente: Manual de operaciones de la DTCCM, (2018).

Anexo 5: Datos de las sustancias involucradas en el proceso.

Parámetros	U/M	Nafta solvente
Destilación inicial	°C	55
Destilación final	°C	200
Densidad a 15 °C	g/cm ³	0,75
Azufre total	% m/m	0,05
Temperatura de autoignición	°C	225
Punto de ebullición a 1 atm	°C	68,9

Fuente: Catálogo de sustancias de la DTCCM.

Parámetros	U/M	Turbocombustible
Destilación inicial	°C	140
Destilación final	°C	300
Viscosidad a 40 °C	mm ² /s	1,0-1,9
Azufre total	% m/m	0,25
Temperatura de inflamación	°C	38

Fuente: Catálogo de sustancias de la DTCCM.

Parámetros	U/M	Gasolina de aviación
Destilación inicial	°C	140
Destilación final	°C	300
Densidad a 15 °C	kg/m ³	775,0-840.0
Azufre total	% m/m	0,30
Temperatura de inflamación	°C	40

Fuente: Catálogo de sustancias de la DTCCM.

Parámetros	U/M	Diesel
Destilación inicial	°C	200
Destilación final	°C	400
Densidad a 15 °C	g/cm ³	0,82-0,87
Azufre total	% m/m	0,80
Temperatura de inflamación	°C	45

Fuente: Catálogo de sustancias de la DTCCM.

Anexo 6: Función Probit en *Matlab*.

```
f = @(x) exp(-x.^2/2);
```

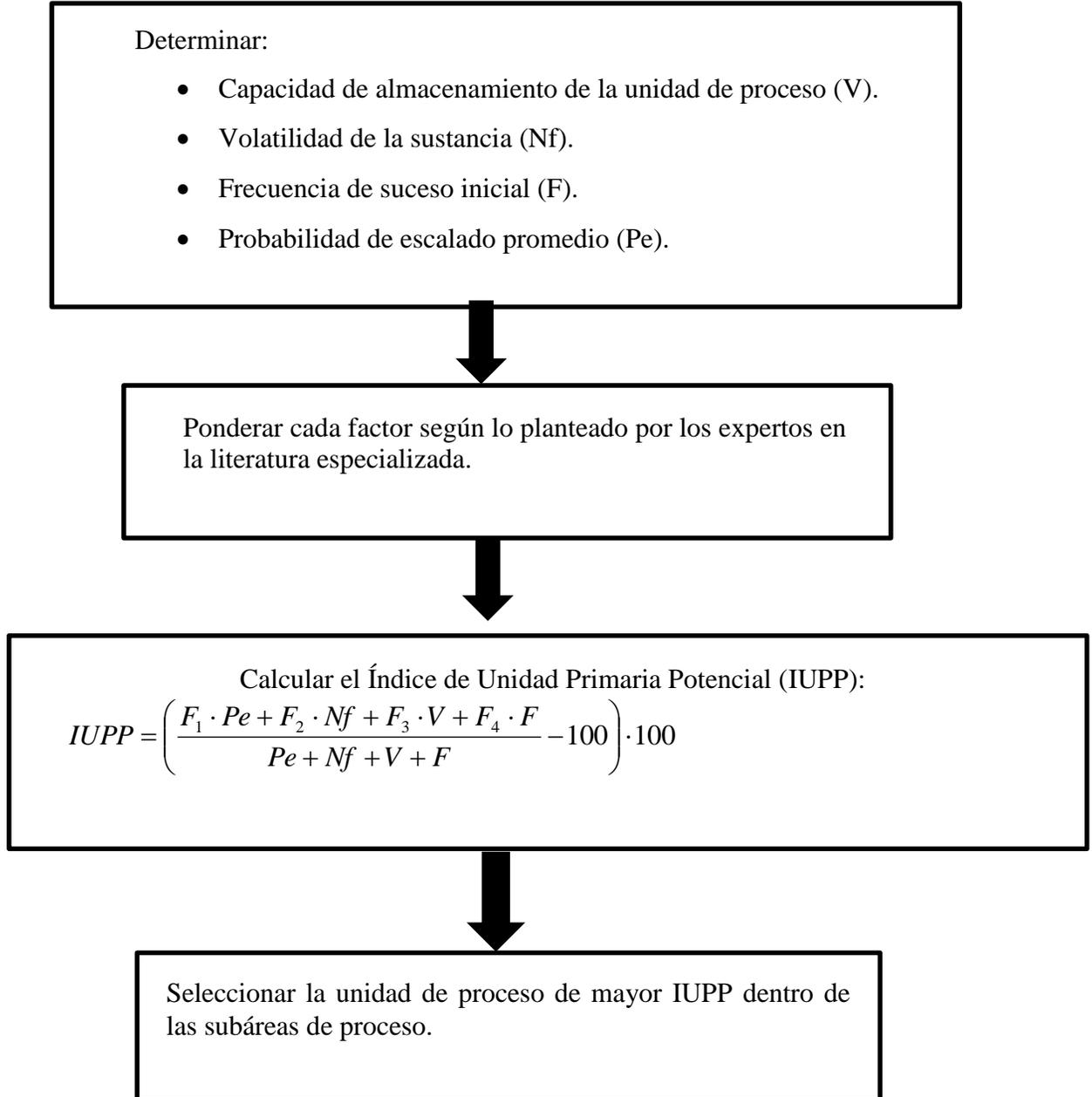
```
Y=input('Probit ');
```

```
Q = integral(f,-Inf,Y-5);
```

```
P = ((1/(2*pi))^0.5)*Q;
```

```
disp(['P ' num2str(P)]);
```

Anexo 7: Algoritmo para determinar el IUPP



Anexo 8: Tablas de probabilidad para definir los nodos L_i y DL_i .

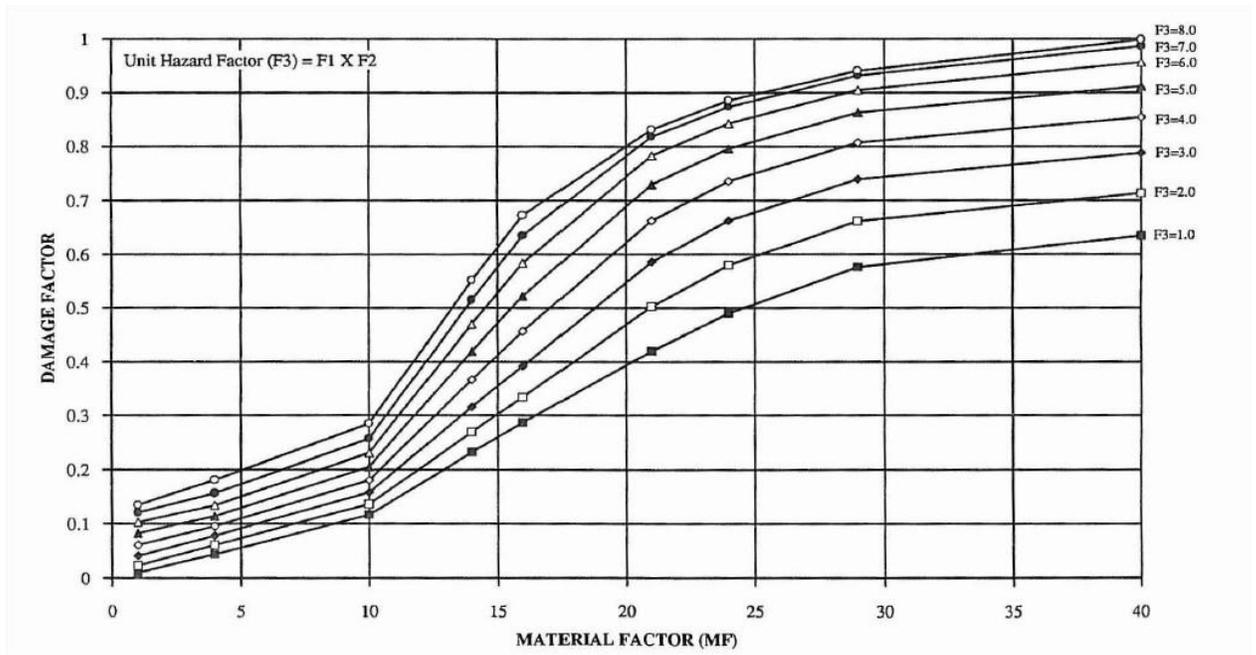
Tabla de probabilidad para definir los nodos L_i

Unidades iésimas		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

Tabla de probabilidad para definir los nodos DL_i

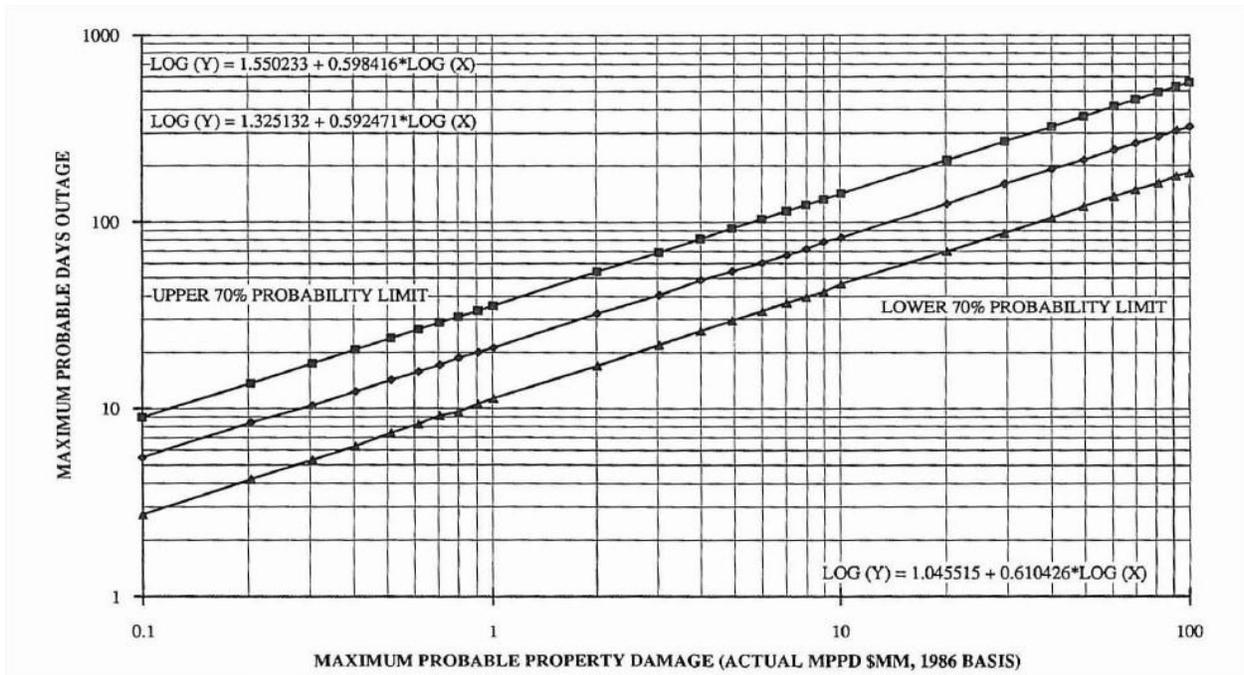
Nodos		P ($DL_i/ X_1, L_1$)	
Unidad Primaria X_1	L_i	Accidente	Seguro
Accidente	Accidente	1	0
Accidente	Seguro	0	1
Seguro	Accidente	0	1
Seguro	Seguro	0	1

Anexo 9: Gráfico para determinar el factor de daño en el F&EI.



Fuente: AIChE, (1994).

Anexo 10: Gráfico para determinar los máximos días probables de parada de producción en el F&EI.



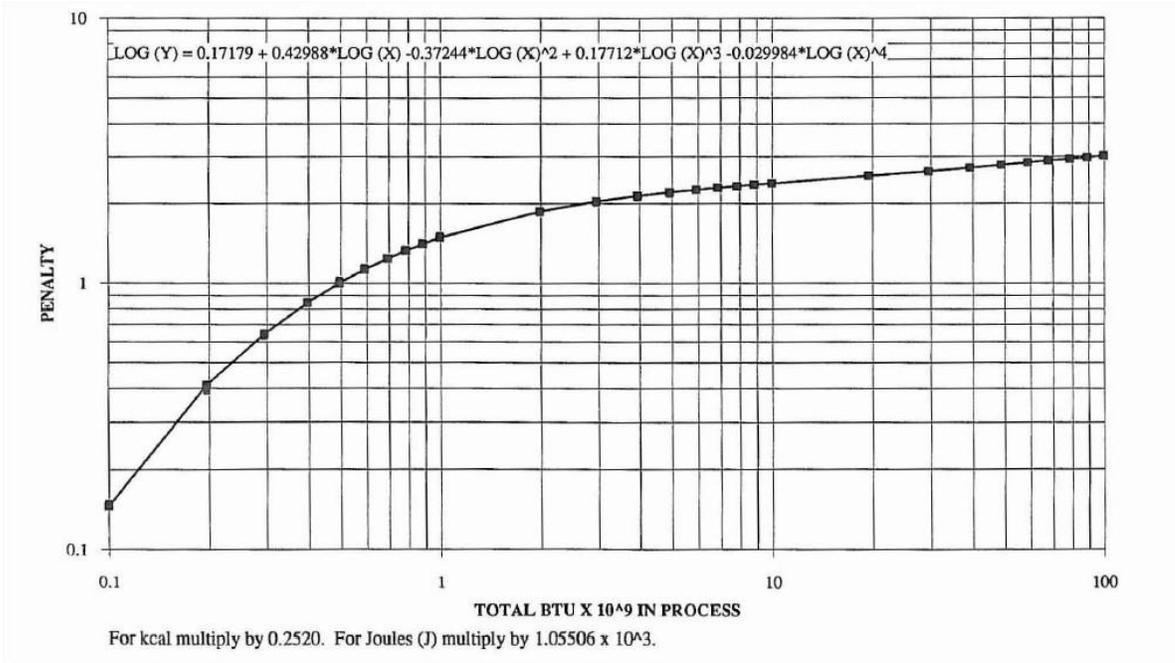
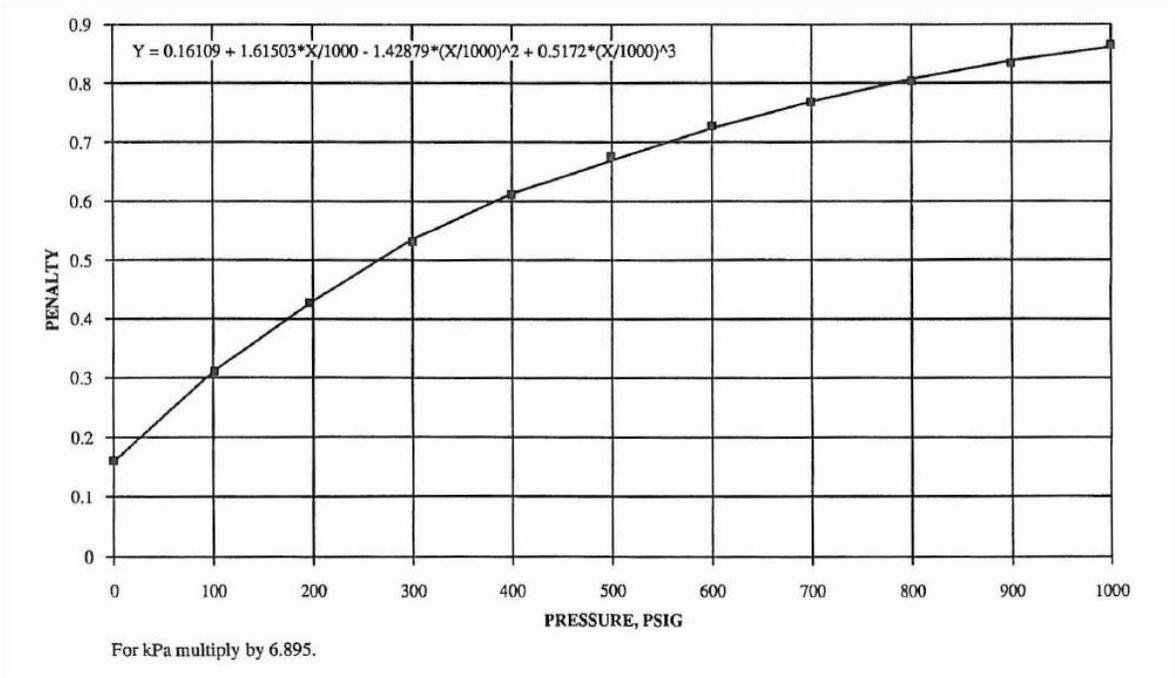
Fuente: AIChE, (1994).

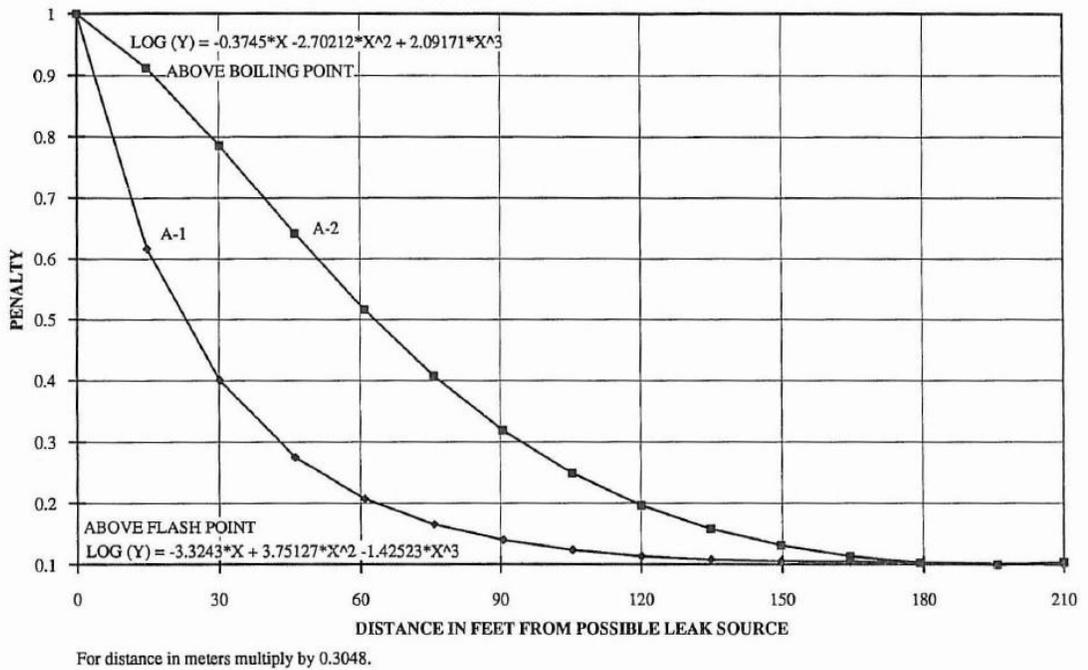
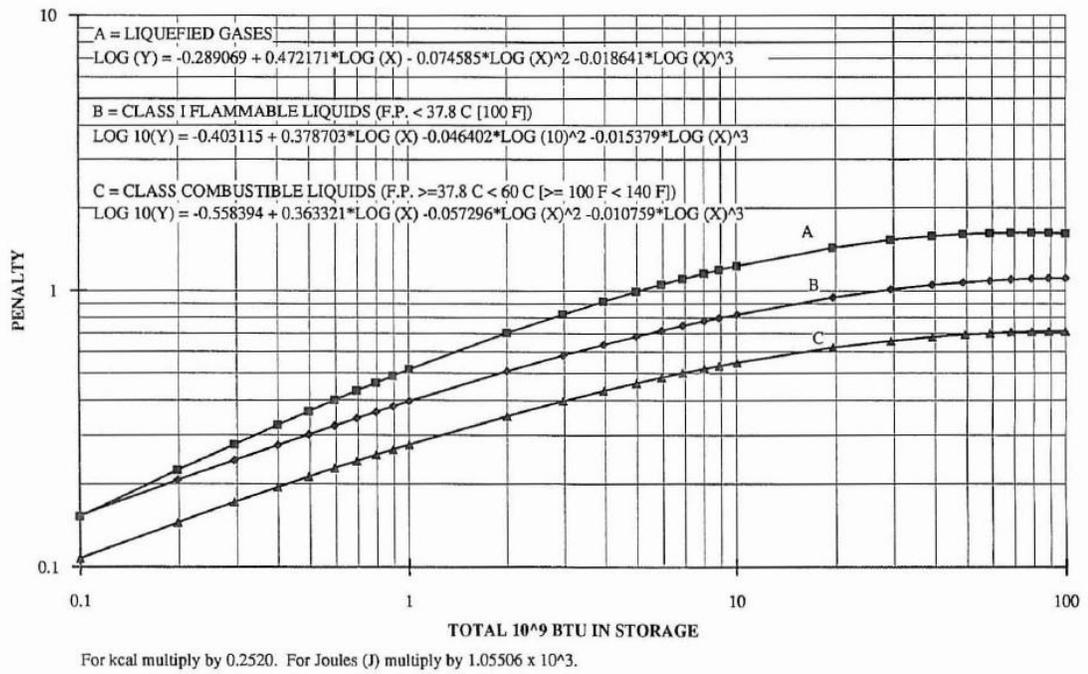
Anexo 11: Grado de peligrosidad en función del valor del F&EI

Grado de peligrosidad para el F&EI	
Rango del F&EI	Grado de peligrosidad
1 – 60	Ligero
61 – 96	Moderado
97 – 127	Intermedio
128 – 158	Intenso
159 – superior	Severo

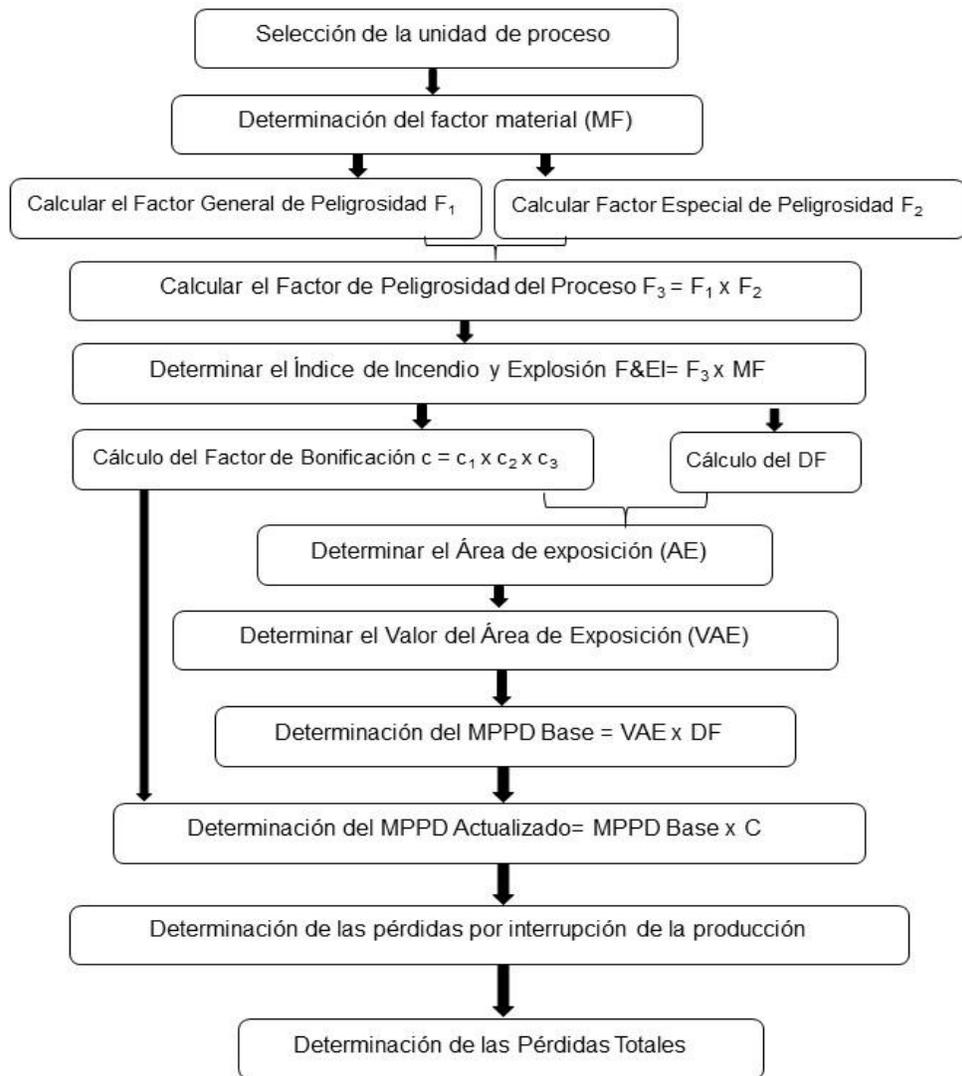
Fuente: AIChE, (1994).

Anexo 12: Otros gráficos que se utilizan en la determinación del F&EI.





Anexo 13: Procedimiento de cálculo del F&EI.



Fuente: AIChE, (1994).

Anexo 14: Factor másico de conversión a humo para diferentes hidrocarburos

Sustancia	€ (Factor de emisión g/kg)
Diesel	0,017
Fuel oíl	0,027
Nafta	0,011
Turbo combustible	0,019
Gasolina de aviación	0,007

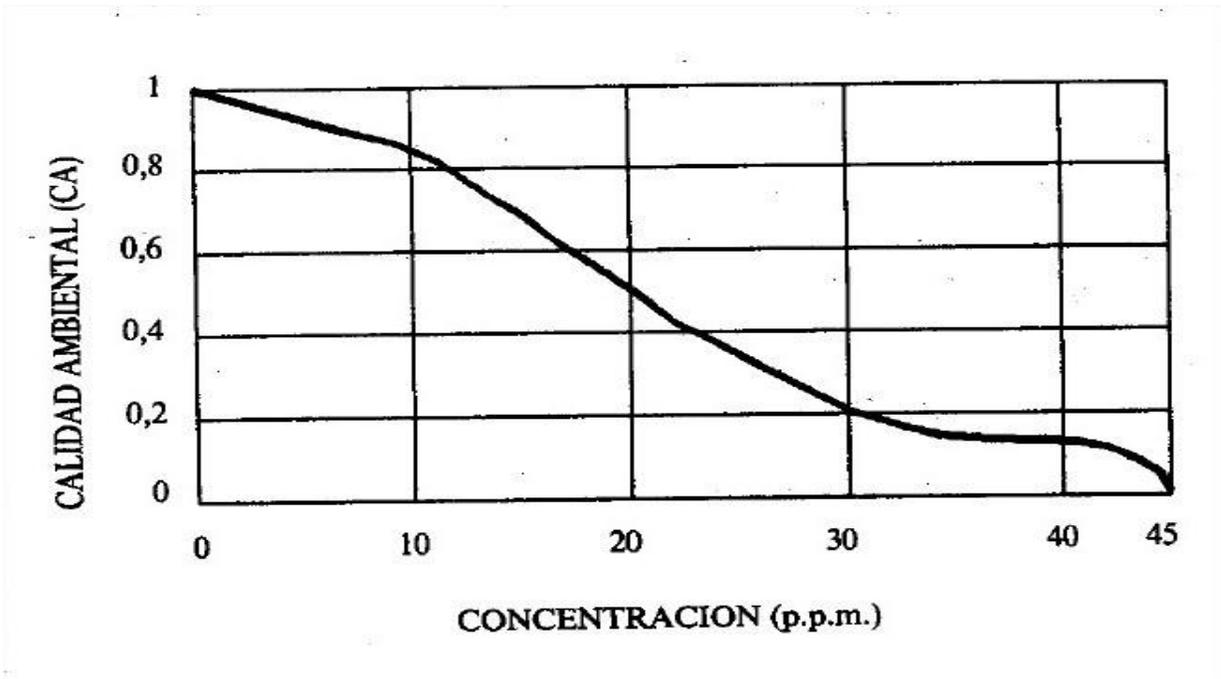
Fuente: Shawn, (2009).

Anexo 15: Factor de emisión de dióxido de carbono.

Sustancia	Factor de emisión de CO₂ (Kg/TJ)
Turbo combustible	71 500
Diesel	74 100
Nafta	73 300
Fuel oil	71 900
Gasolina de aviación	70 000

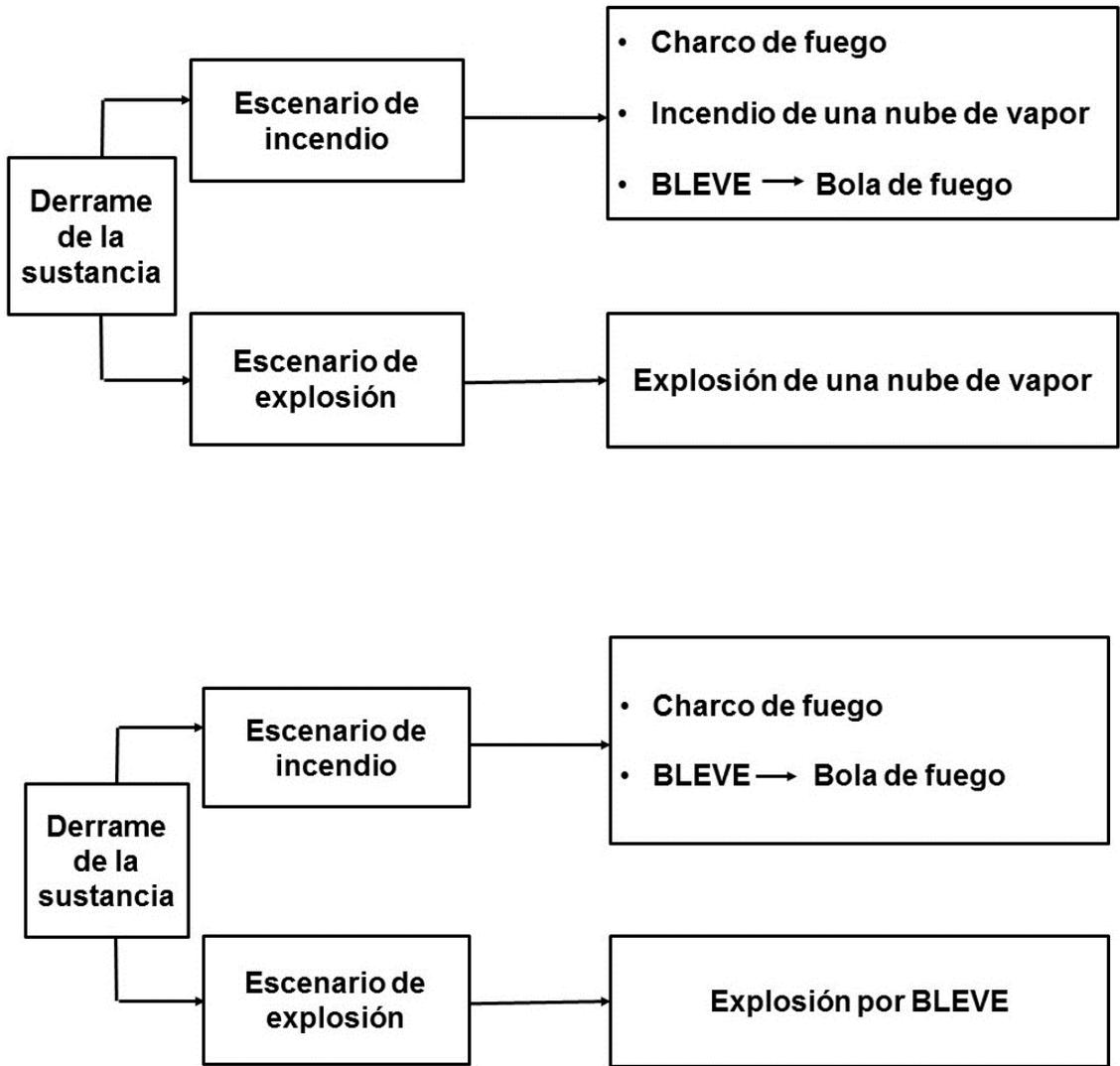
Fuente: IPCC, (2006)

Anexo 16: Gráfico de calidad ambiental vs concentración de monóxido de carbono.



Fuente: Conesa, (2000).

Anexo 17: Posibles escenarios a partir de un derrame de gasolina de aviación y nafta (figura 1) y de turbocombustible, fuel oil y diesel (figura 2)



Anexo 18: Resultados de las corridas de ALOHA.

Tanque origen	Condición	Tanque afectado	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	Rumbo	Sobrepresión (psi)
1	Día Tmm	24	260	0,598	ESE	
		25	210	0,96		
		4	83	7,71		
		26	150	2,04		
		18	167	1,6		
		74	196	1,12		
		19	192	1,17		
		13	171	1,52		
		22	221	0,857		
		23	271	0,546		
		17	90	6,44		
		30	107	4,37		
		38	167	1,6		
		Día Tmxm	24	260		0,568
	25		210	0,911		
	4		83	7,22		
	26		150	1,93		
	18		167	1,52		
	74		196	1,06		
	19		192	1,11		
	13		171	1,44		
	22		221	0,814		
	23		271	0,518		
	17		90	6,04		
	30		107	4,12		
	38		167	1,52		
	Noche Tmm		24	260	0,586	CALMA
		25	210	0,92		
		4	83	6,27		
		26	150	1,87		
		18	167	1,49		
		74	196	1,06		
		19	192	1,11		
		13	171	1,42		
		22	221	0,826		
		23	271	0,536		
17		90	5,33			
30		107	3,76			
38		167	1,49			

	Noche Tmxm	24	260	0,553		
		25	210	0,869		
		4	83	5,9		
		26	150	1,77		
		18	167	1,41		
		74	196	1,01		
		19	192	1,05		
		13	171	1,34		
		22	221	0,78		
		23	271	0,506		
		17	90	5,02		
		30	107	3,55		
		38	167	1,41		
		24	Día Tmm	1		
25	54			14,1		
4	270			0,541		
26	110			3,55		
18	210			0,92		
74	177			1,32		
19	228			0,773		
13	124			2,78		
22	86			5,84		
23	68			9,23		
17	172			1,4		
30	210			0,92		
38	145			2,01		
Día Tmxm	1		260	0,553		
	25		54	13,2		
	4		270	0,51		
	26		110	3,35		
	18		210	0,87		
	74		177	1,25		
	19		228	0,731		
	13		124	2,62		
	22		86	5,5		
	23		68	8,67		
	17		172	1,32		
	30		210	0,87		
	38		145	1,9		
Noche Tmm	1	260	0,586	CALMA		
	25	54	0,92			

		4	270	6,27		
		26	110	1,87		
		18	210	1,49		
		74	177	1,06		
		19	228	1,11		
		13	124	1,42		
		22	86	0,826		
		23	68	0,536		
		17	172	5,33		
		30	210	3,76		
		38	145	1,49		
	Noche Tmxm	1	260	0,553		
		25	54	0,869		
		4	270	5,9		
		26	110	1,77		
		18	210	1,41		
		74	177	1,01		
		19	228	1,05		
		13	124	1,34		
		22	86	0,78		
		23	68	0,506		
		17	172	5,02		
		30	210	3,55		
38	145	1,41				
25	Día Tmm	1	210	0,92	SW	
		24	54	14,1		
		4	218	0,85		
		26	57	12,8		
		18	170	1,44		
		74	146	1,98		
		19	194	1,09		
		13	85	5,98		
		22	68	9,23		
		23	86	5,84		
		17	119	3,02		
		30	165	1,53		
	38	110	3,55			
	Día Tmxm	1	210	0,87		
		24	54	13,2		
4		218	0,803			
26		57	12			

		18	170	1,36				
		74	146	1,87				
		19	194	1,03				
		13	85	5,63				
		22	68	8,67				
		23	86	5,5				
		17	119	2,85				
		30	165	1,45				
		38	110	3,35				
	Noche Tmm	1	210	0,92			CALMA	
		24	54	14,1				
		4	218	0,85				
		26	57	12,8				
		18	170	1,44				
		74	146	1,98				
		19	194	1,09				
		13	85	5,98				
		22	68	9,23				
		23	86	5,84				
		17	119	3,02				
		30	165	1,53				
	38	110	3,55					
	Noche Tmxm	1	210	0,87				
		24	54	13,2				
		4	218	0,803				
		26	57	12				
		18	170	1,36				
		74	146	1,87				
		19	194	1,03				
		13	85	5,63				
		22	68	8,67				
		23	86	5,5				
		17	119	2,85				
		30	165	1,45				
	38	110	3,35					
	4	Día Tmm	1	83			6,61	SE
			24	270			0,549	
			25	218			0,867	
26			164	1,59				
18			110	3,7				
74			149	1,95				

		19	127	2,74	CALMA	
		13	152	1,87		
		22	206	0,979		
		23	260	0,595		
		17	107	3,92		
		30	176	1,37		
		38	217	0,876		
	Día Tmxm	1	83	5,9		
		24	270	0,51		
		25	218	0,803		
		26	164	1,46		
		18	110	3,35		
		74	149	1,79		
		19	127	2,5		
		13	152	1,72		
		22	206	0,905		
		23	260	0,553		
		17	107	3,55		
		30	176	1,26		
		38	217	0,811		
	Noche Tmm	1	83	6,27		
		24	270	0,541		
		25	218	0,85		
		26	164	1,55		
		18	110	3,55		
		74	149	1,89		
		19	127	2,64		
		13	152	1,82		
		22	206	0,958		
		23	260	0,586		
		17	107	3,76		
		30	176	1,34		
		38	217	0,859		
	Noche Tmxm	1	83	5,9		
		24	270	0,51		
		25	218	0,803		
		26	164	1,46		
		18	110	3,35		
74		149	1,79			
19		127	2,5			
13		152	1,72			

26		22	206	0,905						
		23	260	0,553						
		17	107	3,55						
		30	176	1,26						
		38	217	0,811						
	Día Tmm		1	150	1,87	SSW				
			24	110	3,55					
			25	57	12,8					
			4	164	1,55					
			18	141	2,13					
			74	130	2,52					
			19	166	1,51					
			13	67	9,49					
			22	89	5,45					
			23	130	2,52					
17			62	11						
30			122	2,87						
38			91	5,21						
Día Tmxm				1	150			1,77		
				24	110			3,35		
	25	57		12						
	4	164		1,46						
	18	141		2,01						
	74	130		2,38						
	19	166		1,43						
	13	67		8,91						
	22	89		5,14						
	23	130		2,38						
	17	62		10,3						
	30	122		2,71						
	38	91		4,91						
	Noche Tmm			1	150	1,87	CALMA			
				24	110	3,55				
25			57	12,8						
4			164	1,55						
18			141	2,13						
74			130	2,52						
19			166	1,51						
13			67	9,49						
22			89	5,45						
23			130	2,52						

		17	62	11		
		30	122	2,87		
		38	91	5,21		
	Noche Tmxm	1	1,77	0,553		
		24	3,35	0,869		
		25	12	5,9		
		4	1,46	1,77		
		18	2,01	1,41		
		74	2,38	1,01		
		19	1,43	1,05		
		13	8,91	1,34		
		22	5,14	0,78		
		23	2,38	0,506		
		17	10,3	5,02		
		30	2,71	3,55		
38	4,91	1,41				
18	Día Tmm	1	167	0,664	S	no
		24	210	0,41	ESE	no
		25	170	0,64	SE	no
		4	110	1,59	SSW	no
		26	141	0,947	SE	no
		74	45	9,16	ENE	no
		19	29	18,9	NNE	no
		13	86	2,63	SE	no
		22	129	1,14	ESE	no
		23	177	0,588	ESE	no
		17	120	1,33	SSE	no
		30	221	0,368	SSE	no
	38	226	0,351	SE	no	
	Día Tmxm	1	167	0,627	S	0,514
		24	210	0,387	ESE	0,139
		25	170	0,604	SE	0,305
		4	110	1,5	SSW	1,05
		26	141	0,895	SE	0,391
		74	45	8,58	ENE	no
		19	29	17,6	NNE	6,36
		13	86	2,48	SE	0,793
		22	129	1,08	ESE	0,258
		23	177	0,555	ESE	0,172
17		120	1,25	SSE	0,761	
30	221	0,348	SSE	0,335		

		38	226	0,332	SE	0,212
	Noche Tmm	1	167	0,664	CALMA	6,36
		24	210	0,41		1,43
		25	170	0,64		4,94
		4	110	1,59		6,36
		26	141	0,947		6,36
		74	45	9,16		6,36
		19	29	18,9		6,36
		13	86	2,63		6,36
		22	129	1,14		6,36
		23	177	0,588		3,11
		17	120	1,33		6,36
		30	221	0,368		1,25
		38	226	0,351		1,18
		Noche Tmxm	1	167		0,627
	24		210	0,387	6,36	
	25		170	0,604	6,36	
	4		110	1,5	6,36	
	26		141	0,895	6,36	
	74		45	8,58	6,36	
	19		29	17,6	6,36	
	13		86	2,48	6,36	
	22		129	1,08	6,36	
	23		177	0,555	6,36	
	17		120	1,25	6,36	
	30		221	0,348	4,53	
38	226	0,332	3,52			
74	Día Tmm	1	196	0,273	SSW	no
		24	177	0,34	SE	no
		25	146	0,517	SE	no
		4	149	0,495	SSW	no
		26	130	0,666	SSE	no
		18	45	6,52	WSW	no
		19	51	5,04	WNW	no
		13	66	2,91	SE	no
		22	92	1,42	ESE	no
		23	136	0,603	ESE	no
		17	131	0,655	S	no
		30	230	0,193	S	no
		38	220	0,213	SSE	no
		Día Tmxm	1	196	0,259	SSW

		24	177	0,323	SE	no	
		25	146	0,49	SE	no	
		4	149	0,468	SSW	0,402	
		26	130	0,63	SSE	0,382	
		18	45	6,03	WSW	6,36	
		19	51	4,68	WNW	0,765	
		13	66	2,73	SE	no	
		22	92	1,33	ESE	No	
		23	136	0,571	ESE	No	
		17	131	0,62	S	0,446	
		30	230	0,183	S	0,22	
		38	220	0,202	SSE	0,198	
	Noche Tmm	CALMA	1	196	0,268		0,615
			24	177	0,332		0,705
			25	146	0,498		0,923
			4	149	0,477		0,896
			26	130	0,635		1,11
			18	45	5,39		6,36
			19	51	4,25		6,36
			13	66	2,56		6,36
			22	92	1,3		2,6
			23	136	0,578		1,03
			17	131	0,625		1,1
			30	230	0,191		0,498
	38	220	0,21		0,528		
	Noche Tmxm		1	196	0,253		1,31
			24	177	0,314		1,73
			25	146	0,471		4,94
			4	149	0,451		4,07
			26	130	0,6		6,36
			18	45	5,07		6,36
			19	51	4,01		6,36
			13	66	2,42		6,36
			22	92	1,23		6,36
			23	136	0,546		6,36
			17	131	0,591		6,36
			30	230	0,181		0,935
	38	220	0,198		1,02		
19	Día Tmm	1	192	0,28	S	no	
		24	228	0,195	SE	no	
		25	194	0,274	SE	no	

		4	127	0,667	SSW	no
		26	166	0,38	SE	no
		18	29	11,7	SSW	no
		74	51	4,25	ESE	no
		13	108	0,935	SE	no
		22	143	0,52	ESE	no
		23	188	0,293	ESE	no
		17	149	0,477	SSE	no
		30	250	0,161	SSE	no
		38	251	0,159	SE	no
	Día Tmxm	1	192	0,265	S	0,281
		24	228	0,184	SE	0,132
		25	194	0,259	SE	0,16
		4	127	0,63	SSW	0,536
		26	166	0,359	SE	0,195
		18	29	10,9	SSW	no
		74	51	4,01	ESE	no
		13	108	0,884	SE	0,337
		22	143	0,492	ESE	6,36
		23	188	0,276	ESE	no
		17	149	0,451	SSE	0,364
		30	250	0,152	SSE	0,189
	38	251	0,15	SE	0,117	
	Noche Tmm	1	192	0,28	CALMA	0,528
		24	228	0,195		0,421
		25	194	0,274		0,521
		4	127	0,667		0,975
		26	166	0,38		0,644
		18	29	11,7		6,36
		74	51	4,25		6,36
		13	108	0,935		1,36
		22	143	0,52		0,8
		23	188	0,293		0,544
		17	149	0,477		0,751
		30	250	0,161		0,373
		38	251	0,159		0,371
	Noche Tmxm	1	192	0,265		1,43
		24	228	0,184		0,953
25		194	0,259		1,39	
4		127	0,63		6,36	
26		166	0,359		2,46	

		18	29	10,9		6,36
		74	51	4,01		6,36
		13	108	0,884		6,36
		22	143	0,492		6,36
		23	188	0,276		1,52
		17	149	0,451		6,36
		30	250	0,152		0,796
		38	251	0,15		0,79
13	Día Tmm	1	171	1,42	S	
		24	124	2,79		
		25	85	6,04		
		4	152	1,82		
		26	67	9,62		
		18	86	5,9		
		74	66	9,9		
		19	108	3,71		
		22	53	14,8		
		23	105	3,93		
		17	86	5,9		
		30	178	1,31		
	38	155	1,75			
	Día Tmxm	1	171	1,34		
		24	124	2,64		
		25	85	5,64		
		4	152	1,72		
		26	67	9,04		
		18	86	5,56		
		74	66	9,3		
		19	108	3,5		
		22	53	13,8		
		23	105	3,71		
		17	86	5,56		
		30	178	1,24		
	38	155	1,65			
	Noche Tmm	1	171	1,42	CALMA	
		24	124	2,79		
		25	85	6,04		
		4	152	1,82		
		26	67	9,62		
		18	86	5,9		
		74	66	9,9		

		19	108	3,71					
		22	53	14,8					
		23	105	3,93					
		17	86	5,9					
		30	178	1,31					
		38	155	1,75					
	Noche Tmxm	1	171	1,34					
		24	124	2,64					
		25	85	5,69					
		4	152	1,72					
		26	67	9,04					
		18	86	5,56					
		74	66	9,3					
		19	108	3,5					
		22	53	13,8					
		23	105	3,71					
		17	86	5,56					
		30	178	1,24					
		38	155	1,65					
		22	Día Tmm	1			221	0,827	SSW
	24			86			5,9		
	25			68			9,35		
	4			206			0,96		
	26			89			5,5		
18	129			2,57					
74	92			5,14					
19	143			2,07					
13	53			14,8					
23	51			15,8					
17	134			2,37					
30	211			0,912					
38	169			1,46					
Día Tmxm	1			221	0,781				
	24		86	5,56					
	25		68	8,79					
	4		206	0,907					
	26		89	5,19					
	18		129	2,43					
	74		92	4,85					
	19		143	1,96					
	13		53	13,8					

		23	51	14,8	CALMA			
		17	134	2,24				
		30	211	0,862				
		38	169	1,38				
	Noche Tmm	1	221	0,827				
		24	86	5,9				
		25	68	9,35				
		4	206	0,96				
		26	89	5,5				
		18	129	2,57				
		74	92	5,14				
		19	143	2,07				
		13	53	14,8				
		23	51	15,8				
		17	134	2,37				
		30	211	0,912				
		38	169	1,46				
		Noche Tmxm	1	221		0,781		
	24		86	5,56				
	25		68	8,79				
	4		206	0,907				
	26		89	5,19				
	18		129	2,43				
	74		92	4,85				
	19		143	1,96				
	13		53	13,8				
	23		51	14,8				
	17		134	2,24				
	30		211	0,862				
	38		169	1,38				
	23		Día Tmm	1		271	0,536	SW
		24		68		9,35		
		25		86		5,9		
		4		260		0,586		
		26		130		2,53		
		18		177		1,32		
		74		136		2,3		
		19		188		1,16		
13		105		3,93				
22		51		15,8				
17		181		1,26				

		30	249	0,642	CALMA	
		38	194	1,09		
	Día Tmxm	1	271	0,507		
		24	68	8,79		
		25	86	5,56		
		4	260	0,553		
		26	130	2,39		
		18	177	1,25		
		74	136	2,17		
		19	188	1,1		
		13	105	3,71		
		22	51	14,8		
		17	181	1,19		
		30	249	0,607		
		38	194	1,03		
		Noche Tmm	1	271		0,536
	24		68	9,35		
	25		86	5,9		
	4		260	0,586		
	26		130	2,53		
	18		177	1,32		
	74		136	2,3		
	19		188	1,16		
	13		105	3,93		
	22		51	15,8		
	17		181	1,26		
	30		249	0,642		
	38		194	1,09		
	Noche Tmxm		1	271		0,507
		24	68	8,79		
		25	86	5,56		
		4	260	0,553		
		26	130	2,39		
		18	177	1,25		
		74	136	2,17		
		19	188	1,1		
		13	105	3,71		
		22	51	14,8		
17		181	1,19			
30		249	0,607			
38		194	1,03			

17	Día Tmm	1	90	5,18	SW	6,36
		24	172	1,38	ENE	0,592
		25	119	2,96	ENE	0,985
		4	107	3,67	W	6,36
		26	62	10,5	ENE	6,36
		18	120	2,91	NNW	1,86
		74	131	2,43	N	1,75
		19	149	1,86	NNW	1,19
		13	86	5,66	NNE	5,39
		22	134	2,32	NE	1,09
		23	181	1,24	NE	0,718
		30	101	4,12	SSE	6,36
		38	115	3,17	SE	2,4
	Día Tmxm	1	90	4,87	SW	6,36
		24	172	1,3	ENE	0,867
		25	119	2,79	ENE	1,53
		4	107	3,46	W	6,36
		26	62	9,81	ENE	6,36
		18	120	2,74	NNW	6
		74	131	2,29	N	5,3
		19	149	1,76	NNW	1,6
		13	86	5,32	NNE	6,36
		22	134	2,19	NE	1,69
		23	181	1,17	NE	0,953
		30	101	3,88	SSE	6,36
		38	115	2,99	SE	6,36
	Noche Tmm	1	90	5,18	CALMA	6,36
		24	172	1,38		6,36
		25	119	2,96		6,36
		4	107	3,67		6,36
		26	62	10,5		6,36
		18	120	2,91		6,36
		74	131	2,43		6,36
		19	149	1,86		6,36
		13	86	5,66		6,36
		22	134	2,32		6,36
		23	181	1,24		6,36
		30	101	4,12		6,36
38		115	3,17	6,36		
Noche Tmxm	1	90	4,87		6,36	
	24	172	1,3		6,36	

		25	119	2,79		6,36
		4	107	3,46		6,36
		26	62	9,81		6,36
		18	120	2,74		6,36
		74	131	2,29		6,36
		19	149	1,76		6,36
		13	86	5,32		6,36
		22	134	2,19		6,36
		23	181	1,17		6,36
		30	101	3,88		6,36
		38	115	2,99		6,36
30	Día Tmm	1	107	15	NE	
		24	210	3,67		
		25	165	6,15		
		4	176	5,36		
		26	122	11,5		
		18	221	3,29		
		74	230	3,02		
		19	250	2,52		
		13	178	5,23		
		22	211	3,63		
		23	249	2,55		
		17	101	16,8		
		38	78	27,3		
		Día Tmxm	1	107		14,1
	24		210	3,47		
	25		165	5,81		
	4		176	5,06		
	26		122	10,9		
	18		221	3,11		
	74		230	2,85		
	19		250	2,39		
	13		178	4,94		
	22		211	3,43		
	23		249	2,41		
	17		101	15,8		
	38		78	25,5		
	Noche Tmm		1	107	15	CALMA
		24	210	3,67		
		25	165	6,15		
		4	176	5,36		

		26	122	11,5		
		18	221	3,29		
		74	230	3,02		
		19	250	2,52		
		13	178	5,23		
		22	211	3,63		
		23	249	2,55		
		17	101	16,8		
		38	78	27,3		
	Noche Tmxm	1	107	14,1		
		24	210	3,47		
		25	165	5,81		
		4	176	5,06		
		26	122	10,9		
		18	221	3,11		
		74	230	2,85		
		19	250	2,39		
		13	178	4,94		
		22	211	3,43		
		23	249	2,41		
		17	101	15,8		
		38	78	25,5		
		38	Día Tmm	1		
24	145			2,74		
25	110			4,9		
4	217			1,16		
26	91			7,24		
18	226			1,07		
74	220			1,13		
19	251			0,854		
13	155			2,38		
22	169			1,98		
23	194			1,98		
17	115			4,46		
30	78			9,87		
Día Tmxm	1		167	1,92		
	24	145	2,59			
	25	110	4,63			
	4	217	1,1			
	26	91	6,84			
	18	226	1,01			

		74	220	1,07	CALMA	
		19	251	0,807		
		13	155	2,25		
		22	169	1,88		
		23	194	1,4		
		17	115	4,22		
		30	78	9,3		
	Noche Tmm	1	167	2,03		
		24	145	2,74		
		25	110	4,9		
		4	217	1,16		
		26	91	7,24		
		18	226	1,07		
		74	220	1,13		
		19	251	0,854		
		13	155	2,38		
		22	169	1,98		
		23	194	1,48		
		17	115	4,46		
		30	78	9,87		
	Noche Tmxm	1	167	1,92		
		24	145	2,59		
		25	110	4,63		
		4	217	1,1		
		26	91	6,84		
		18	226	1,01		
		74	220	1,07		
		19	251	0,807		
		13	155	2,25		
		22	169	1,88		
23		194	1,4			
17		115	4,22			
30		78	9,3			

Anexo 19: Alcance del escenario charco de fuego en el tanque 1.



Figura a: Alcance del escenario charco de fuego en el tanque 1

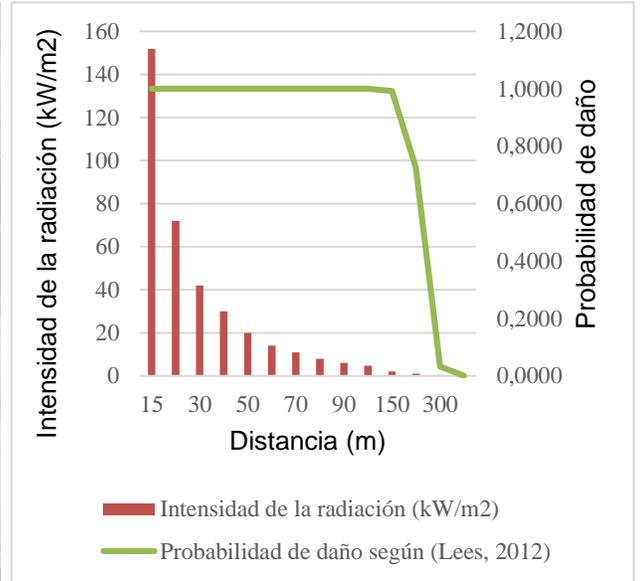


Figura b: Distancia vs radiación y probabilidad de daño en el tanque 1

Anexo 20: Alcance del escenario charco de fuego en el tanque 19.



Figura a: Alcance del escenario charco de fuego en el tanque 19

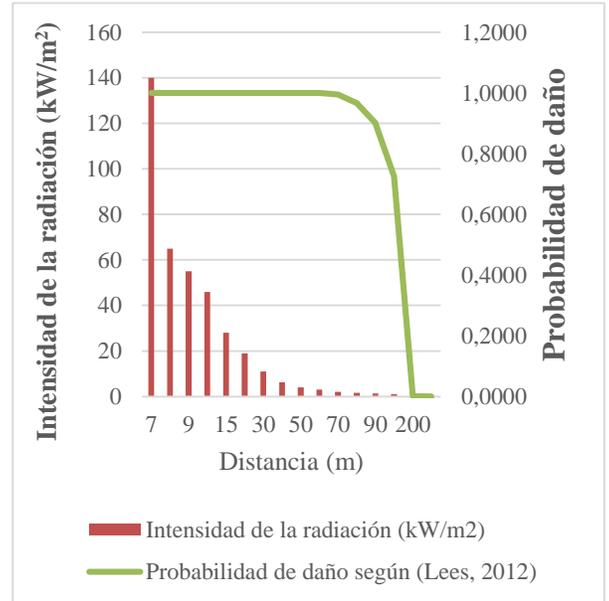


Figura b: Distancia vs radiación y probabilidad de daño en el tanque 19

Anexo 21: Distancia entre equipos y fuente en el rumbo del viento.

Tanque origen	Tanque afectado	Rumbo	Distancia a la fuente (m)
17	30	SSE	101
	38	SE	115
	1	SW	90
	4	W	107
	26	ENE	62
	25	ENE	119
	24	ENE	172
	13	NNE	86
	22	NE	134
	23	NE	181
	18	NNW	120
	19	NNW	149
	74	N	131
19	30	SSE	250
	17	SSE	149
	38	SE	251
	26	SE	166
	25	SE	194
	24	SE	228
	13	SE	108
	1	S	192
	4	SSW	127
	18	SSW	29
	23	ESE	188
	74	ESE	51
	22	ESE	143

Anexo 22: Alcance del escenario explosión de una nube de vapor en el tanque 19.



Figura a: Alcance del escenario explosión de una nube de vapor en el tanque 19

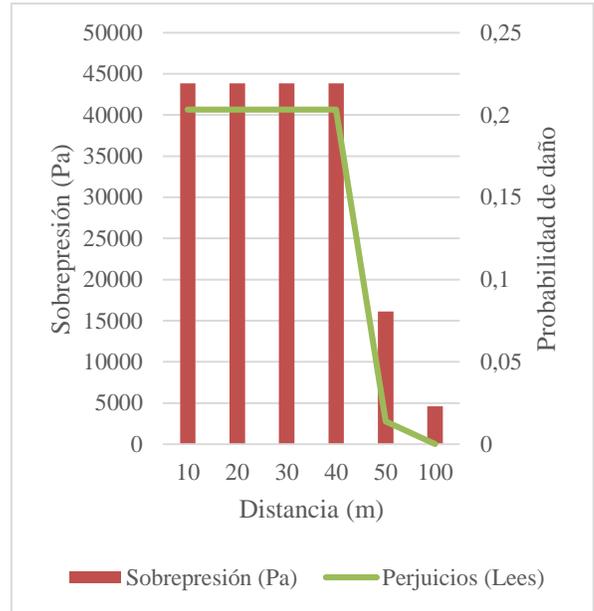


Figura b: Distancia vs sobrepresión y probabilidad de daño en el tanque 19

Anexo 23: Resultados de la simulación en el *software* ALOHA para BLEVE más bola de fuego.

	Tanques						
Parámetros	1	24, 25, 4, 26, 13, 22, 23, 38	18	74	19	17	30
Diámetro de la bola de fuego (m)	960	992	643	542	444	813	992
Duración (s)	42	43	31	27	23	37	43
Distancia que alcanza la radiación de 10,0 kW/m ² (zona roja) (m)	1900	2000	1300	1100	929	1600	2000
Distancia que alcanza la radiación de 5,0 kW/m ² (zona naranja) (m)	2700	2800	1900	1600	1300	2300	2800
Distancia que alcanza la radiación de 2,0 kW/m ² (zona amarilla) (m)	4200	4300	2900	2500	2000	3600	4300

Anexo 24: Resultados de la simulación en el *software* ALOHA para BLEVE más bola de fuego para el tanque 1.



Figura a: Alcance de las radiaciones de la bola de fuego en el tanque 1

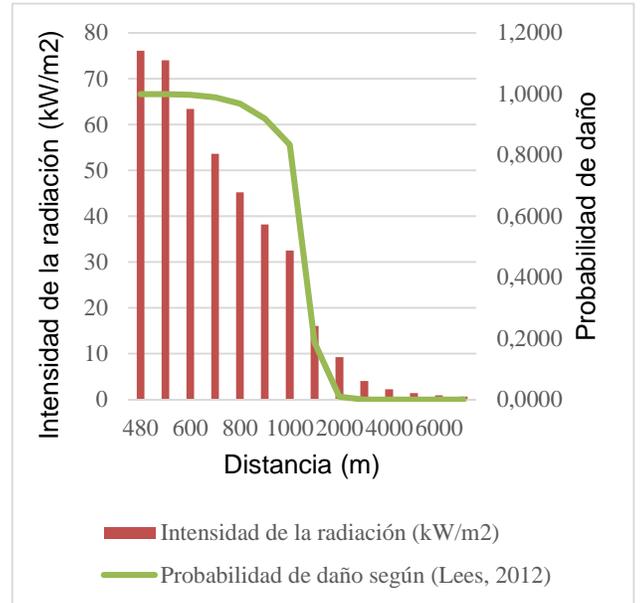


Figura b: Distancia vs radiación y probabilidad de daño en el tanque 1

Anexo 25: Resultados de la simulación en el *software* ALOHA para BLEVE más bola de fuego para el tanque 19.



Figura a: Alcance de las radiaciones de la bola de fuego en el tanque 19

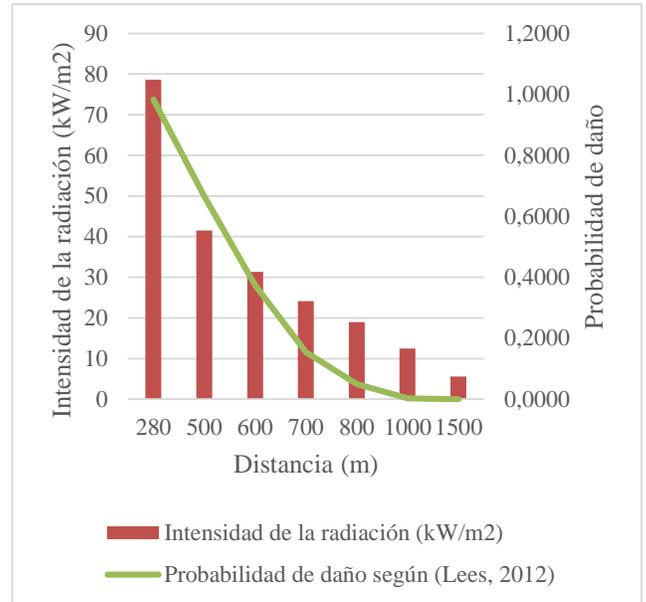


Figura b: Distancia vs radiación y probabilidad de daño en el tanque 19

Anexo 26: Distancia entre los tanques en la T-320.

Tanques	Distancia (m)													
	1	24	25	4	26	18	74	19	13	22	23	17	30	38
1	-	260	210	83	150	167	196	192	171	221	271	90	107	167
24	260	-	54	270	110	210	177	228	124	86	68	172	210	145
25	210	54	-	218	57	170	146	194	85	68	86	119	165	110
4	83	270	218	-	164	110	149	127	152	206	260	107	176	217
26	150	110	57	164	-	141	130	166	67	89	130	62	122	91
18	167	210	170	110	141	-	45	29	86	129	177	120	221	226
74	196	177	146	149	130	45	-	51	66	92	136	131	230	220
19	192	228	194	127	166	29	51	-	108	143	188	149	250	251
13	171	124	85	152	67	86	66	108	-	53	105	86	178	155
22	221	86	68	206	89	129	92	143	53	-	51	134	211	169
23	271	68	86	260	130	177	136	188	105	51	-	181	249	194
17	90	172	119	107	62	120	131	149	86	134	181	-	101	115
30	107	210	165	176	122	221	230	250	178	211	249	101	-	78
38	167	145	110	217	91	226	220	251	155	169	194	115	78	-

Anexo 27: Resultados de los valores de los vectores de escalado y la probabilidad de escalado.

Tanques	Valores de intensidad de radiación (kW/m ²)						
	1	24	25	4	26	18	74
1	-	0,598	0,96	7,71	2,04	1,6	1,12
24	0,586	-	14,1	0,541	3,55	0,92	1,32
25	0,92	14,1	-	0,85	12,8	1,44	1,98
4	6,27	0,541	0,85	-	1,55	3,55	1,89
26	1,87	3,55	12,8	1,55	-	2,13	2,52
18	0,664	0,41	0,64	1,59	0,947	-	9,16
74	0,268	0,332	0,498	0,477	0,635	5,39	-
19	0,28	0,195	0,274	0,667	0,38	11,7	4,25
13	1,42	2,79	6,04	1,82	9,62	5,9	9,9
22	0,827	5,9	9,35	0,96	5,5	2,57	5,14
23	0,536	9,35	5,9	0,586	2,53	1,32	2,3
17	5,18	1,38	2,96	3,67	10,5	2,91	2,43
30	15	3,67	6,15	5,36	11,5	3,29	3,02
38	2,03	2,74	4,9	1,16	7,24	1,07	1,13

Tanques	Valores de intensidad de radiación (kW/m ²)						
	19	13	22	23	17	30	38
1	1,17	1,52	0,857	0,546	6,44	4,37	1,6
24	0,773	2,78	5,84	9,23	1,4	0,92	2,01
25	1,09	5,98	9,23	5,84	3,02	1,53	3,55
4	2,64	1,82	0,958	0,586	3,76	1,34	0,859
26	1,51	9,49	5,45	2,52	11	2,87	5,21
18	18,9	2,63	1,14	0,588	1,33	0,368	0,351
74	4,25	2,56	1,3	0,578	0,625	0,191	0,21
19	-	0,935	0,52	0,293	0,477	0,161	0,159
13	3,71	-	14,8	3,93	5,9	1,31	1,75
22	2,07	14,8	-	15,8	2,37	0,912	1,46
23	1,16	3,93	15,8	-	1,26	0,642	1,09
17	1,86	5,66	2,32	1,24	-	4,12	3,17
30	2,52	5,23	3,63	2,55	16,8	-	27,3
38	0,854	2,38	1,98	1,48	4,46	9,87	-

Tanques	Valores de sobrepresión (psi)						
	1	24	25	4	26	18	74
17	6,36	0,592	0,985	6,36	6,36	1,86	1,75
18	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	-	6,36
19	1,43	0,953	1,39	6,36	2,46	6,36	6,36
74	1,31	1,73	4,94	4,07	6,36	6,36	-

Tanques	Valores de sobrepresión (psi)						
	19	13	22	23	17	30	38
17	1,19	5,39	1,09	0,718	-	6,36	2,4
18	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	4,53	3,52
19	-	6,36	6,36	1,52	6,36	0,796	0,79
74	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	0,191	0,935

Tanques	Probabilidad de escalado por radiación (kW/m ²)						
	1	24	25	4	26	18	74
1	-	0	0	$4,75 \cdot 10^{-2}$	$5,17 \cdot 10^{-7}$	0	0
24	0	-	$3,48 \cdot 10^{-1}$	0	$5,57 \cdot 10^{-4}$	0	0
25	0	$3,48 \cdot 10^{-1}$	-	0	$2,81 \cdot 10^{-1}$	0	$3,02 \cdot 10^{-7}$
4	$1,74 \cdot 10^{-2}$	0	0	-	$4,11 \cdot 10^{-7}$	$1,42 \cdot 10^{-4}$	0
26	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$5,38 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-1}$	0	-	$8,76 \cdot 10^{-7}$	0
18	0	0	0	0	$3,52 \cdot 10^{-7}$	-	$3,67 \cdot 10^{-2}$
74	0	0	0	0	0	$7,14 \cdot 10^{-3}$	-
19	0	0	0	0	0	$1,09 \cdot 10^{-1}$	$3,49 \cdot 10^{-4}$
13	0	$8,16 \cdot 10^{-5}$	$1,54 \cdot 10^{-2}$	$1,43 \cdot 10^{-6}$	$1,19 \cdot 10^{-1}$	$4,40 \cdot 10^{-3}$	$5,16 \cdot 10^{-2}$
22	0	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-1}$	0	$9,64 \cdot 10^{-3}$	$5,67 \cdot 10^{-6}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$
23	0	$1,06 \cdot 10^{-1}$	$1,36 \cdot 10^{-2}$	0	$3,75 \cdot 10^{-5}$	0	$1,43 \cdot 10^{-6}$
17	$4,40 \cdot 10^{-3}$	0	$1,31 \cdot 10^{-4}$	$6,41 \cdot 10^{-4}$	$1,61 \cdot 10^{-1}$	$1,81 \cdot 10^{-5}$	$2,56 \cdot 10^{-6}$
30	$3,45 \cdot 10^{-1}$	$6,87 \cdot 10^{-4}$	$1,70 \cdot 10^{-2}$	$7,55 \cdot 10^{-3}$	$2,12 \cdot 10^{-1}$	$5,44 \cdot 10^{-5}$	$1,98 \cdot 10^{-5}$
38	$2,44 \cdot 10^{-6}$	$6,95 \cdot 10^{-5}$	$4,80 \cdot 10^{-3}$	0	$3,84 \cdot 10^{-2}$	0	0

Tanques	Probabilidad de escalado por radiación (kW/m ²)						
	19	13	22	23	17	30	38
1	0	0	0	0	$9,14 \cdot 10^{-3}$	$2,12 \cdot 10^{-3}$	$3,71 \cdot 10^{-7}$
24	0	$7,53 \cdot 10^{-6}$	$7,14 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-1}$	0	0	$3,73 \cdot 10^{-6}$
25	0	$1,43 \cdot 10^{-2}$	$9,68 \cdot 10^{-2}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$	$4,07 \cdot 10^{-5}$	0	$5,01 \cdot 10^{-4}$
4	$7,46 \cdot 10^{-7}$	$1,92 \cdot 10^{-6}$	0	0	$3,49 \cdot 10^{-4}$	0	0
26	$3,56 \cdot 10^{-6}$	$1,09 \cdot 10^{-1}$	$8,20 \cdot 10^{-3}$	$3,45 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-1}$	$9,57 \cdot 10^{-5}$	$6,39 \cdot 10^{-3}$
18	$3,82 \cdot 10^{-1}$	$4,61 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	0
74	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0	0
19	-	0	0	0	0	0	0
13	$1,08 \cdot 10^{-4}$	-	$3,78 \cdot 10^{-1}$	$1,14 \cdot 10^{-3}$	$5,54 \cdot 10^{-3}$	0	$9,21 \cdot 10^{-7}$
22	$4,33 \cdot 10^{-7}$	$3,82 \cdot 10^{-1}$	-	$4,44 \cdot 10^{-1}$	$4,50 \cdot 10^{-6}$	0	0
23	0	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$4,29 \cdot 10^{-1}$	-	0	0	0
17	0	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$1,46 \cdot 10^{-5}$	0	-	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$2,08 \cdot 10^{-4}$
30	$3,24 \cdot 10^{-6}$	$6,76 \cdot 10^{-3}$	$5,78 \cdot 10^{-4}$	$3,91 \cdot 10^{-5}$	$3,59 \cdot 10^{-1}$	-	$8,34 \cdot 10^{-1}$
38	0	$1,98 \cdot 10^{-5}$	$3,24 \cdot 10^{-6}$	$3,73 \cdot 10^{-6}$	$9,04 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-1}$	-

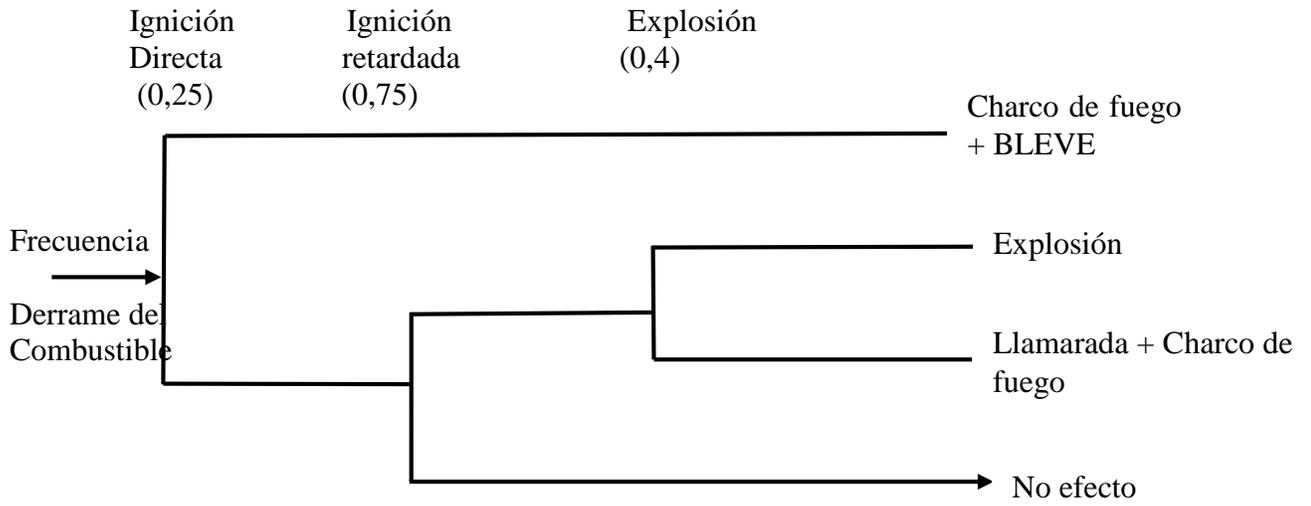
Tanques	Probabilidad de escalado por sobrepresión (psi)						
	1	24	25	4	26	18	74
17	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$
18	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	-	$9,83 \cdot 10^{-1}$
19	$6,43 \cdot 10^{-2}$	$6,04 \cdot 10^{-3}$	$5,59 \cdot 10^{-2}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$4,41 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$
74	$4,09 \cdot 10^{-2}$	0,14457	$9,33 \cdot 10^{-1}$	$8,48 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	0,983	-

Tanques	Probabilidad de escalado por sobrepresión (psi)						
	19	13	22	23	17	30	38
17	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	-	$9,83 \cdot 10^{-1}$
18	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,01 \cdot 10^{-1}$	$7,52 \cdot 10^{-1}$
19	-	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$8,53 \cdot 10^{-2}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$1,59 \cdot 10^{-3}$	$1,49 \cdot 10^{-3}$
74	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,39 \cdot 10^{-3}$	$5,23 \cdot 10^{-3}$

Anexo 28: Resultados del registro histórico de la T-320.

Tanques	Sustancia	Cantidad de derrames
1	Diesel	0,7
24		0,3
25		0,3
4		0,3
26		0,3
18	Gasolina de aviación	0,2
74		0,2
19		0,2
13	Turbo	0,1
22		0,1
23		0,1
17	Nafta	0,3
30	Fuel oil	0,1
38		0,1

Anexo 29: Árbol de eventos para las diferentes sustancias analizadas.



Anexo 30: Factores que contribuyen a la propagación del accidente

Tanques	Sustancia	Volumen (m ³)	Número de inflamabilidad (Nf)	Frecuencia del suceso inicial (F)	Probabilidad de escalado promedio (P _e)
1	Diesel	8542	2	0,7	4,5170·10 ⁻³
24	Diesel	11341	2	0,3	3,5238·10 ⁻²
25	Diesel	11411	2	0,3	5,8003·10 ⁻²
4	Diesel	10996	2	0,3	1,3792·10 ⁻³
26	Diesel	11608	2	0,3	3,9208·10 ⁻²
18	Gasolina de aviación	2316	3	0,2	4,9558·10 ⁻¹
74	Gasolina de aviación	1186	3	0,2	3,4119·10 ⁻¹
19	Gasolina de aviación	745	3	0,2	2,5627·10 ⁻¹
13	Turbocombustible	11147	2	0,1	4,4240·10 ⁻²
22	Turbocombustible	10885	2	0,1	7,3728·10 ⁻²
23	Turbocombustible	11524	2	0,1	4,2222·10 ⁻²
17	Nafta	4647	3	0,3	4,9836·10 ⁻¹
30	Fuel oil	10914	2	0,1	1,3712·10 ⁻¹
38	Fuel oil	10919	2	0,5	1,2860·10 ⁻²

Anexo 31: Valores del IUPP para cada unidad de proceso dentro de cada subárea.

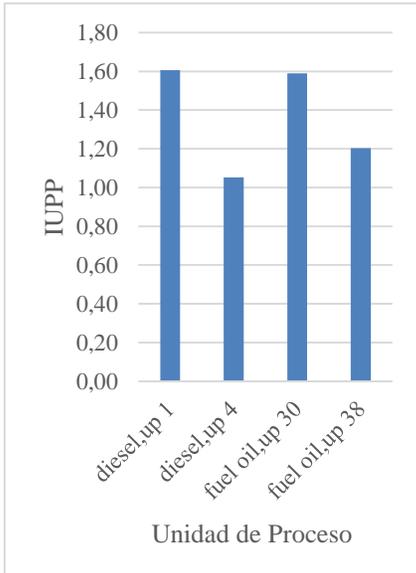


Figura a: Unidad de proceso vs IUPP en la subárea 1

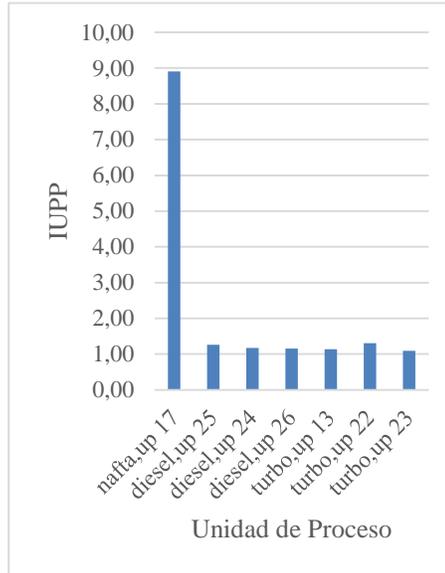


Figura b: Unidad de proceso vs IUPP en la subárea 2

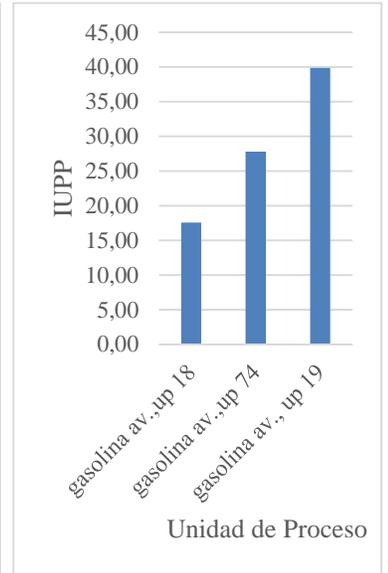


Figura c: Unidad de proceso vs IUPP en la subárea 3

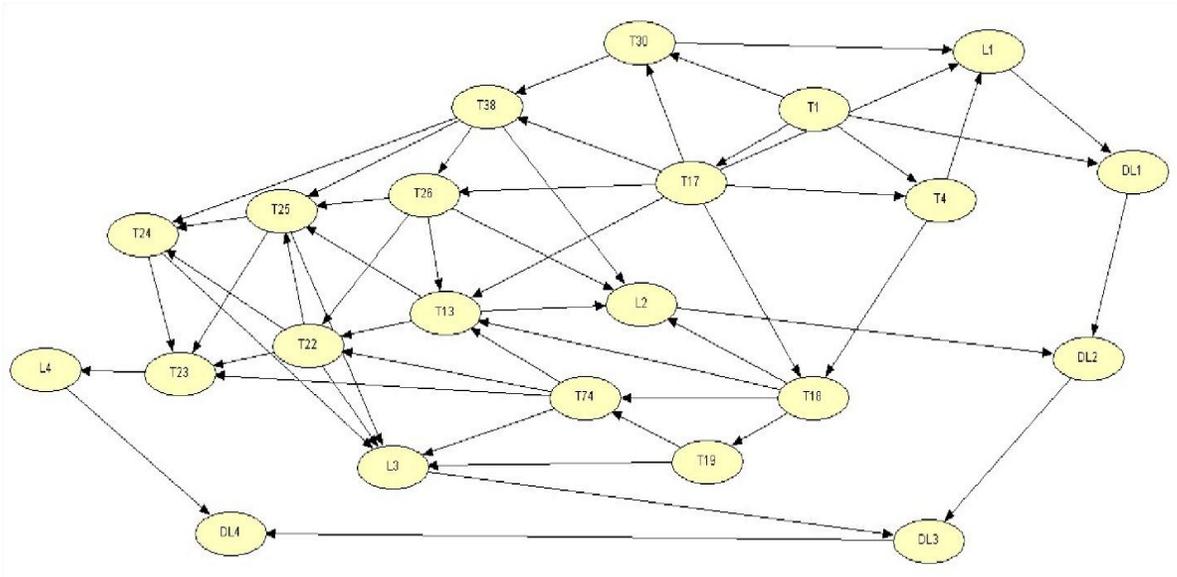
Anexo 32: Resultados de las redes bayesianas elaboradas.

Primario Tanque 1	L1	L2	L3	L4	DL1	DL2	DL3	DL4
Probabilidad previa	0,83	0,16	0,13	0,13	0,83	0,16	0,13	0,13
Accidente en el tanque 1	5,82	1,09	0,91	0,9	5,82	1,09	0,91	0,9
Accidente en el tanque 30	100	96,86	80,79	80,03	100	96,86	80,79	80,03
Accidente en el tanque 17	100	100	99,27	98,63	100	100	99,27	98,63
Accidente en el tanque 4	100	16,43	16,17	16,06	100	16,43	16,17	16,06
Accidente en el tanque 38	100	100	83,58	82,8	100	100	83,58	82,8
Accidente en el tanque 26	100	100	98,78	97,94	100	100	98,78	97,94
Accidente en el tanque 13	100	100	99,24	98,57	100	100	99,24	98,57
Accidente en el tanque 18	100	100	100	100	100	100	100	100
Accidente en el tanque 25	100	100	100	98,27	100	100	100	98,27
Accidente en el tanque 22	100	100	100	98,63	100	100	100	98,63
Accidente en el tanque 74	100	100	100	100	100	100	100	100
Accidente en el tanque 19	100	100	100	100	100	100	100	100
Accidente en el tanque 24	100	100	100	98,51	100	100	100	98,51
Accidente en el tanque 23	100	100	100	100	100	100	100	100

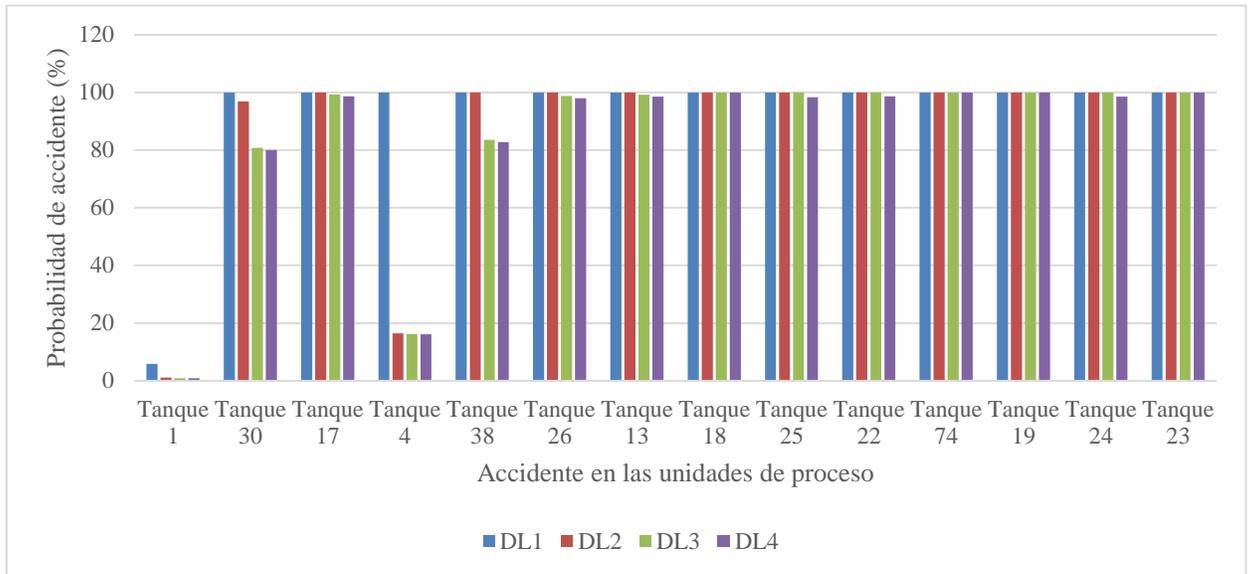
Primario Tanque 17	L1	L2	L3	DL1	DL2	DL3
Probabilidad previa	14,25	14,15	14,08	14,25	14,15	14,08
Accidente en el tanque 17	100	99,27	98,63	100	99,27	98,63
Accidente en el tanque 30	100	99,27	98,63	100	99,27	98,63
Accidente en el tanque 1	100	99,27	98,63	100	99,27	98,63
Accidente en el tanque 4	100	99,27	98,63	100	99,27	98,63
Accidente en el tanque 38	100	99,27	98,63	100	99,27	98,63
Accidente en el tanque 26	100	99,27	98,63	100	99,27	98,63
Accidente en el tanque 13	100	99,27	98,63	100	99,27	98,63
Accidente en el tanque 18	100	100	100	100	100	100
Accidente en el tanque 25	100	100	98,95	100	100	98,95
Accidente en el tanque 22	100	100	99,65	100	100	99,65
Accidente en el tanque 74	100	100	100	100	100	100
Accidente en el tanque 19	100	100	100	100	100	100
Accidente en el tanque 24	100	100	99,1	100	100	99,1
Accidente en el tanque 23	100	100	100	100	100	100

Primario Tanque 19	L1	L2	L3	DL1	DL2	DL3
Probabilidad previa	9,5	9,5	9,36	9,5	9,5	9,36
Accidente en el tanque 19	100	100	98,55	100	100	98,55
Accidente en el tanque 18	100	100	98,55	100	100	98,55
Accidente en el tanque 74	100	100	98,55	100	100	98,55
Accidente en el tanque 4	100	100	98,58	100	100	98,58
Accidente en el tanque 17	100	100	100	100	100	100
Accidente en el tanque 13	100	100	98,55	100	100	98,55
Accidente en el tanque 22	100	100	98,55	100	100	98,55
Accidente en el tanque 23	100	100	98,56	100	100	98,56
Accidente en el tanque 1	100	100	100	100	100	100
Accidente en el tanque 30	100	100	100	100	100	100
Accidente en el tanque 38	100	100	100	100	100	100
Accidente en el tanque 26	100	100	100	100	100	100
Accidente en el tanque 25	100	100	100	100	100	100
Accidente en el tanque 24	100	100	100	100	100	100

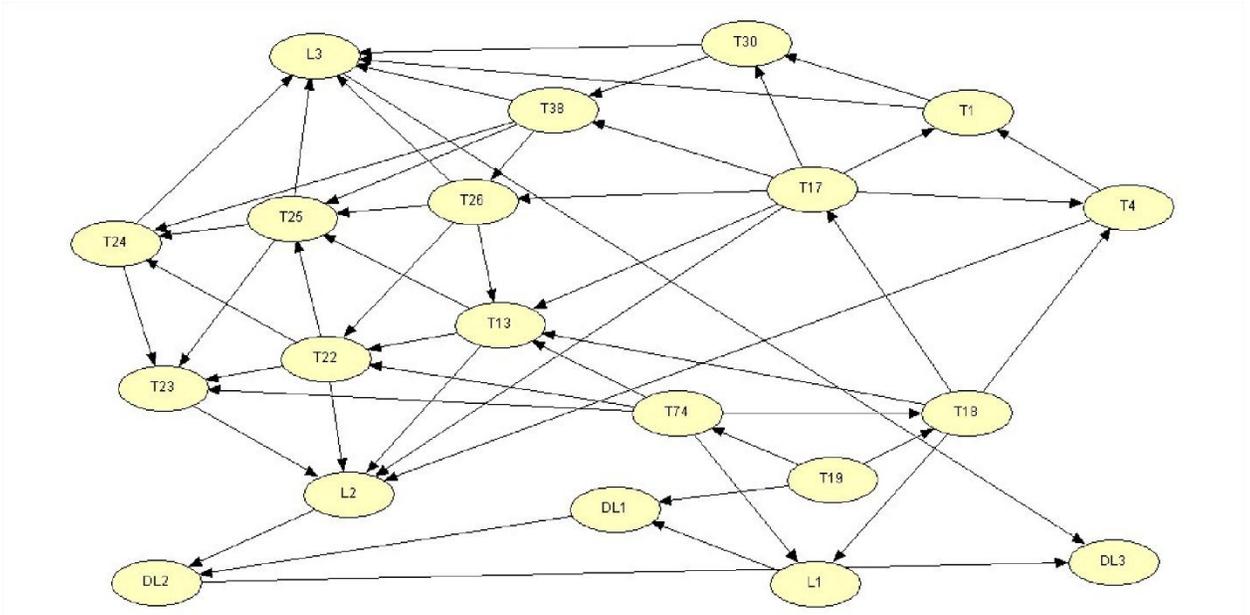
Anexo 33: Red bayesiana de probabilidades para el tanque 1.



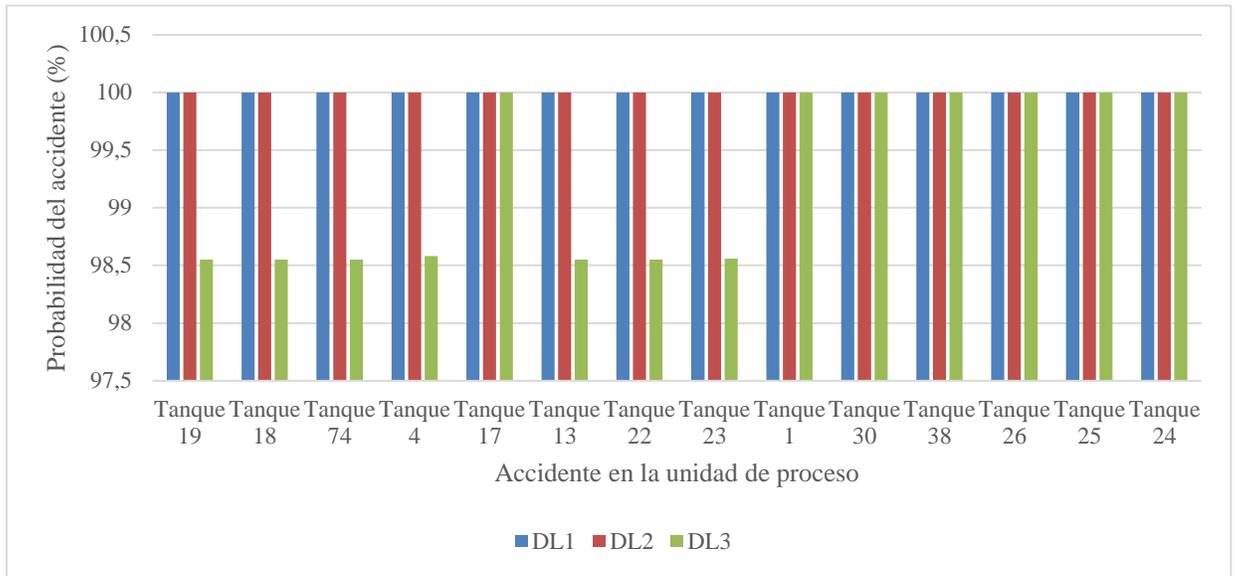
Anexo 34: Accidente en las unidades de proceso vs probabilidad de accidente para red bayesiana en el tanque 1.



Anexo 35: Red bayesiana de probabilidades para el tanque 19.



Anexo 36: Accidente en las unidades de proceso vs probabilidad de accidente para red bayesiana en el tanque 19.



Anexo 37: Resultados de la aplicación del Índice Dow de Incendio y Explosión

Unidad de Proceso		1: Tanque 1
		diesel
Factor Material (MF)		10
1. Factor general de peligrosidad del proceso	Rango de penalización	Penalización empleada
Factor Base	1,00	1,00
A. Reacciones químicas exotérmicas	-	-
B. Procesos endotérmicos	-	-
C. Manejo del material y transferencia	0,25 - 1,05	0,25
D. Unidades de procesos interiores o encerradas	-	-
E. Acceso	-	-
F. Drenaje y control de derrames	0,25 - 0,50	0,50
Cantidad en metros cúbicos		
Factor general de peligrosidad del proceso (F1)		1,75
2. Factor especial de peligrosidad del proceso	Rango de penalización	Penalización empleada
Factor Base	1,00	1,00
A. Materiales tóxicos	0,20 - 0,80	0,00
B. Presión sub-atmosférica	-	-
C. Operación dentro o fuera del rango de inflamabilidad		
1. Tanques que almacenan líquidos inflamables	0,50	
2. Equipos de procesos dentro o cerca del rango	0,30	0,30
3. Procesos siempre están dentro del rango	0,80	
D. Explosión de polvo	-	-
E. Presión		
Presión de operación		
Presión de alivio		
F. Baja temperatura	-	
G. Cantidad de material inflamable o inestable		0,70
Cantidad en kg o lb		
Hc en BTU		206,10

1. Líquidos o gases en proceso		
2. Líquidos o gases en almacenamiento		
H. Corrosión y erosión	0,10 - 0,75	0,20
I. Escape por juntas y embalaje	0,10 - 1,50	0,30
J. Uso de equipamiento incendiado		
K. Sistema de intercambio de calor con aceite caliente	-	
L. Equipos de rotación	0,50	
Factor especial de peligrosidad del proceso (F2)		2,50
Factor de peligrosidad de la Unidad de Proceso (F3)		4,38
Índice de Incendio y explosión (F&EI)		43,75
Grado de peligrosidad según el F&EI		Ligero
Factores de bonificación por control de pérdidas	Rango de bonificación	Bonificación empleada
1. Factor de bonificación por Control del Proceso C1		
a. Poder de emergencia	0,98	1,00
b. Enfriamiento	0,97 - 0,99	0,97
c. Control de explosión	0,84 - 0,98	1,00
d. Parada de emergencia	0,96 - 0,99	1,00
e. Control computarizado	0,93 - 0,99	1,00
f. Gas inerte	0,94 - 0,96	1,00
g. Instrucciones o procedimientos de operación	0,91 - 0,99	0,92
1. Puesta en marcha	0,50	0,50
2. Parada rutinaria	0,50	0,00
3. Condiciones normales	0,50	0,50
4. Operación a baja capacidad	0,50	0,50
5. Operación a reciclo total	0,50	0,00
6. Operación por encima de la capacidad de diseño	1,00	0,00
7. Puesta en marcha después de una breve parada	1,00	1,00
8. Puesta en marcha tras parada por	1,00	1,00

mantenimiento		
9. Procedimientos de mantenimiento	1,50	1,50
10. Parada de emergencia	1,50	2,50
11. Modificación o adiciones al equipo o tuberías	2,00	2,00
12. Condiciones anormales previsibles	3,00	3,00
h. Revisión sobre químicos reactivos	0,91 - 0,98	0,91
i. Otros análisis de peligrosidad del proceso	0,91 - 0,98	0,97
1. Análisis de cuantificación de riesgos	0,91	
2. Análisis de consecuencias detalladas	0,93	
3. Análisis de árbol de fallos	0,93	
4. Estudios HAZOP	0,94	0,94
5. Modos de fallas y análisis de efectos (FMEA)	0,94	
6. Revisiones de seguridad ambiental	0,96	
7. Estudios Qué pasa si?	0,96	0,96
8. Evaluaciones de lista de chequeo	0,98	
9. Gestión de la revisión del cambio	0,98	
1. Factor de bonificación por Control del Proceso C1		0,78
2. Factor de bonificación por aislamiento del material	Rango de bonificación	Bonificación empleada
a. Válvulas de control remotas	0,96 - 0,98	1,00
b. Depósito trasvase para emergencias	0,96 - 0,98	1,00
c. Drenajes	0,91 - 0,97	1,00
d. Sistemas de bloqueo	0,98	1,00
2. Factor de bonificación por aislamiento del material		1,00
3. Factor de bonificación por protección contra incendios	Rango de bonificación	Bonificación empleada
a. Detección de la fuga	0,94 - 0,98	1,00
b. Acero estructural	0,95 - 0,98	1,00
c. Agua contra incendios	0,94 - 0,97	1,00
d. Sistemas especiales	0,91	1,00
e. Sistemas de rociadores	0,74 - 0,97	0,81
f. Cortinas de agua	0,97 - 0,98	1,00

g. Espuma	0,92 - 0,97	0,94
h. Extintores portátiles y monitores	0,93 - 0,98	0,98
i. Protección de cables	0,94 - 0,98	0,94
3. Factor de bonificación por protección contra incendios		0,70
Factores de bonificación por control de pérdidas		0,55
		1: Tanque 1
Resumen del análisis de riesgo para la unidad de proceso		Valor
1. Índice de Incendio y Explosión (F&EI)		43,75
2. Radio de exposición (m)		11,20
3. Área de exposición		394,18
4. Valor del área de exposición		3.730.835,70
5. Factor de daño		0,20
6. Máximo daño probable a la propiedad (base) (MPPD)		746.167,14
7. Factores de bonificación por control de pérdidas		0,55
8. Máximo daño probable a la propiedad (actualizado)		410.770,48
9. Máximos días probables perdidos (MPDO)		8,55
10. Interrupción del negocio (BI)		237.695,57
11. Pérdidas totales		648.466,04
Datos además		
Costo del equipo original		771.800,00
Año del costo del equipo original		2005
Índice de costo del año del costo original		468,20
Índice de costo del año 2018		603,10
Costo del material que contiene		3.555.624,96
Costo de otro equipo dentro del radio de exposición en 2018		0,00
Costo total		4.549.799,63
Valor de la producción de 2018		14.492.187,22

Unidad de Proceso	2: Tanque 24	3: Tanque 25
	Diesel	diesel
Factor Material (MF)	10	10

1. Factor general de peligrosidad del proceso	Penalización empleada	Penalización empleada
Factor Base	1,00	1,00
A. Reacciones químicas exotérmicas		
B. Procesos endotérmicos		
C. Manejo del material y transferencia	0,25	0,25
D. Unidades de procesos interiores o encerradas		
E. Acceso		
F. Drenaje y control de derrames	0,50	0,50
Cantidad en metros cúbicos		
Factor general de peligrosidad del proceso (F1)	1,75	1,75
2. Factor especial de peligrosidad del proceso	Penalización empleada	Penalización empleada
Factor Base	1,00	1,00
A. Materiales tóxicos	0,00	0,00
B. Presión sub-atmosférica	-	-
C. Operación dentro o fuera del rango de inflamabilidad		
1. Tanques que almacenan líquidos inflamables		
2. Equipos de procesos dentro o cerca del rango	0,30	0,30
3. Procesos siempre están dentro del rango		
D. Explosión de polvo	-	-
E. Presión		
Presión de operación		
Presión de alivio		
F. Baja temperatura		
G. Cantidad de material inflamable o inestable	0,70	0,70
Cantidad en kg o lb		
Hc en BTU	312,00	283,90
1. Líquidos o gases en proceso		
2. Líquidos o gases en almacenamiento		
H. Corrosión y erosión	0,20	0,20
I. Escape por juntas y embalaje	0,30	0,30

J. Uso de equipamiento incendiado		
K. Sistema de intercambio de calor con aceite caliente		
L. Equipos de rotación		
Factor especial de peligrosidad del proceso (F2)	2,50	2,50
Factor de peligrosidad de la Unidad de Proceso (F3)	4,38	4,38
Índice de Incendio y explosión (F&EI)	43,75	43,75
Grado de peligrosidad según el F&EI	Ligero	Ligero
Factores de bonificación por control de pérdidas	Bonificación empleada	Bonificación empleada
1. Factor de bonificación por Control del Proceso C1		
a. Poder de emergencia	1,00	1,00
b. Enfriamiento	0,97	0,97
c. Control de explosión	1,00	1,00
d. Parada de emergencia	1,00	1,00
e. Control computarizado	1,00	1,00
f. Gas inerte	1,00	1,00
g. Instrucciones o procedimientos de operación	0,92	0,92
1. Puesta en marcha	0,50	0,50
2. Parada rutinaria	0,00	0,00
3. Condiciones normales	0,50	0,50
4. Operación a baja capacidad	0,50	0,50
5. Operación a reciclo total	0,00	0,00
6. Operación por encima de la capacidad de diseño	0,00	0,00
7. Puesta en marcha después de una breve parada	1,00	1,00
8. Puesta en marcha tras parada por mantenimiento	1,00	1,00
9. Procedimientos de mantenimiento	1,50	1,50
10. Parada de emergencia	2,50	2,50
11. Modificación o adiciones al	2,00	2,00

equipo o tuberías		
12. Condiciones anormales previsibles	3,00	3,00
h. Revisión sobre químicos reactivos	0,91	0,91
i. Otros análisis de peligrosidad del proceso	0,97	0,97
1. Análisis de cuantificación de riesgos		
2. Análisis de consecuencias detalladas		
3. Análisis de árbol de fallos		
4. Estudios HAZOP	0,94	0,94
5. Modos de fallas y análisis de efectos (FMEA)		
6. Revisiones de seguridad ambiental		
7. Estudios Qué pasa si?	0,96	0,96
8. Evaluaciones de lista de chequeo		
9. Gestión de la revisión del cambio		
1. Factor de bonificación por Control del Proceso C1	0,78	0,78
2. Factor de bonificación por aislamiento del material	Bonificación empleada	Bonificación empleada
a. Válvulas de control remotas	1,00	1,00
b. Depósito trasvase para emergencias	1,00	1,00
c. Drenajes	1,00	1,00
d. Sistemas de bloqueo	1,00	1,00
2. Factor de bonificación por aislamiento del material	1,00	1,00
3. Factor de bonificación por protección contra incendios	Bonificación empleada	Bonificación empleada
a. Detección de la fuga	1,00	1,00
b. Acero estructural	1,00	1,00
c. Agua contra incendios	1,00	1,00
d. Sistemas especiales	1,00	1,00
e. Sistemas de rociadores	0,81	0,81
f. Cortinas de agua	1,00	1,00
g. Espuma	0,94	0,94
h. Extintores portátiles y monitores	0,98	0,98

i. Protección de cables	0,94	0,94
3. Factor de bonificación por protección contra incendios	0,70	0,70
Factores de bonificación por control de pérdidas	0,55	0,55
Resumen del análisis de riesgo para la unidad de proceso	Valor	Valor
1. Índice de Incendio y Explosión (F&EI)	43,75	43,75
2. Radio de exposición (m)	11,20	11,20
3. Área de exposición	394,18	394,18
4. Valor del área de exposición	5.450.468,85	5.450.468,85
5. Factor de daño	0,20	0,20
6. Máximo daño probable a la propiedad (base) (MPPD)	1.090.093,77	1.090.093,77
7. Factores de bonificación por control de pérdidas	0,55	0,55
8. Máximo daño probable a la propiedad (actualizado)	600.104,61	600.104,61
9. Máximos días probables perdidos (MPDO)	10,71	10,71
10. Interrupción del negocio (BI)	297.548,83	297.548,83
11. Pérdidas totales	897.653,43	897.653,43
Datos además		
Costo del equipo original	965.400,00	965.400,00
Año del costo del equipo original	2005	2005
Índice de costo del año del costo original	468,20	468,20
Índice de costo del año 2018	603,10	603,10
Costo del material que contiene	5.403.357,62	5.403.357,62
Costo de otro equipo dentro del radio de exposición en 2018	0,00	0,00
Costo total	6.646.913,23	6.646.913,23
Valor de la producción de 2018	14.492.187,22	14.492.187,22
Unidad de Proceso	4: Tanque 4	5: Tanque 26
	Diesel	Diesel

Factor Material (MF)	10	10
1 Factor general de peligrosidad del proceso	Penalización empleada	Penalización empleada
Factor Base	1,00	1,00
A. Reacciones químicas exotérmicas		
B. Procesos endotérmicos		
C. Manejo del material y transferencia	0,25	0,25
D. Unidades de procesos interiores o encerradas		
E. Acceso		
F. Drenaje y control de derrames	0,50	0,50
Cantidad en metros cúbicos		
Factor general de peligrosidad del proceso (F1)	1,75	1,75
2. Factor especial de peligrosidad del proceso	Penalización empleada	Penalización empleada
Factor Base	1,00	1,00
A. Materiales tóxicos	0,00	0,00
B. Presión sub-atmosférica	-	-
C. Operación dentro o fuera del rango de inflamabilidad		
1. Tanques que almacenan líquidos inflamables		
2. Equipos de procesos dentro o cerca del rango	0,30	0,30
3. Procesos siempre están dentro del rango		
D. Explosión de polvo	-	-
E. Presión		
Presión de operación		
Presión de alivio		
F. Baja temperatura		
G. Cantidad de material inflamable o inestable	0,70	0,70
Cantidad en kg o lb		
Hc en BTU	273,60	303,50
1. Líquidos o gases en proceso		
2. Líquidos o gases en almacenamiento		
H. Corrosión y erosión	0,20	0,20

I. Escape por juntas y embalaje	0,30	0,30
J. Uso de equipamiento incendiado		
K. Sistema de intercambio de calor con aceite caliente		
L. Equipos de rotación		
Factor especial de peligrosidad del proceso (F2)	2,50	2,50
Factor de peligrosidad de la Unidad de Proceso (F3)	4,38	4,38
Índice de Incendio y explosión (F&EI)	43,75	43,75
Grado de peligrosidad según el F&EI	Ligero	Ligero
Factores de bonificación por control de pérdidas	Bonificación empleada	Bonificación empleada
1. Factor de bonificación por Control del Proceso C1		
a. Poder de emergencia	1,00	1,00
b. Enfriamiento	0,97	0,97
c. Control de explosión	1,00	1,00
d. Parada de emergencia	1,00	1,00
e. Control computarizado	1,00	1,00
f. Gas inerte	1,00	1,00
g. Instrucciones o procedimientos de operación	0,92	0,92
1. Puesta en marcha	0,50	0,50
2. Parada rutinaria	0,00	0,00
3. Condiciones normales	0,50	0,50
4. Operación a baja capacidad	0,50	0,50
5. Operación a reciclo total	0,00	0,00
6. Operación por encima de la capacidad de diseño	0,00	0,00
7. Puesta en marcha después de una breve parada	1,00	1,00
8. Puesta en marcha tras parada por mantenimiento	1,00	1,00
9. Procedimientos de mantenimiento	1,50	1,50
10. Parada de emergencia	2,50	2,50

11. Modificación o adiciones al equipo o tuberías	2,00	2,00
12. Condiciones anormales previsibles	3,00	3,00
h. Revisión sobre químicos reactivos	0,91	0,91
i. Otros análisis de peligrosidad del proceso	0,97	0,97
1. Análisis de cuantificación de riesgos		
2. Análisis de consecuencias detalladas		
3. Análisis de árbol de fallos		
4. Estudios HAZOP	0,94	0,94
5. Modos de fallas y análisis de efectos (FMEA)		
6. Revisiones de seguridad ambiental		
7. Estudios Qué pasa si?	0,96	0,96
8. Evaluaciones de lista de chequeo		
9. Gestión de la revisión del cambio		
1. Factor de bonificación por Control del Proceso C1	0,78	0,78
2. Factor de bonificación por aislamiento del material	Bonificación empleada	Bonificación empleada
a. Válvulas de control remotas	1,00	1,00
b. Depósito trasvase para emergencias	1,00	1,00
c. Drenajes	1,00	1,00
d. Sistemas de bloqueo	1,00	1,00
2. Factor de bonificación por aislamiento del material	1,00	1,00
3. Factor de bonificación por protección contra incendios	Bonificación empleada	Bonificación empleada
a. Detección de la fuga	1,00	1,00
b. Acero estructural	1,00	1,00
c. Agua contra incendios	1,00	1,00
d. Sistemas especiales	1,00	1,00
e. Sistemas de rociadores	0,81	0,81
f. Cortinas de agua	1,00	1,00
g. Espuma	0,94	0,94

h. Extintores portátiles y monitores	0,98	0,98
i. Protección de cables	0,94	0,94
3. Factor de bonificación por protección contra incendios	0,70	0,70
Factores de bonificación por control de pérdidas	0,55	0,55
Resumen del análisis de riesgo para la unidad de proceso	Valor	Valor
1. Índice de Incendio y Explosión (F&EI)	43,75	43,75
2. Radio de exposición (m)	11,20	11,20
3. Área de exposición	394,18	394,18
4. Valor del área de exposición	5.545.686,83	5.450.468,85
5. Factor de daño	0,20	0,20
6. Máximo daño probable a la propiedad (base) (MPPD)	1.109.137,37	1.090.093,77
7. Factores de bonificación por control de pérdidas	0,55	0,55
8. Máximo daño probable a la propiedad (actualizado)	610.588,24	600.104,61
9. Máximos días probables perdidos (MPDO)	10,82	10,71
10. Interrupción del negocio (BI)	300.617,67	297.548,83
11. Pérdidas totales	911.205,91	897.653,43
Datos además		
Costo del equipo original	976.400,00	965.400,00
Año del costo del equipo original	2005	2005
Índice de costo del año del costo original	468,20	468,20
Índice de costo del año 2018	603,10	603,10
Costo del material que contiene	5.505.307,73	5.403.357,62
Costo de otro equipo dentro del radio de exposición en 2018	0,00	0,00
Costo total	6.763.032,72	6.646.913,23
Valor de la producción de 2018	14.492.187,22	14.492.187,22

Unidad de Proceso	6: Tanque 18	7: Tanque 74
--------------------------	---------------------	---------------------

	gasolina aviación	gasolina aviación
Factor Material (MF)	16	16
1. Factor general de peligrosidad del proceso	Penalización empleada	Penalización empleada
Factor Base	1,00	1,00
A. Reacciones químicas exotérmicas		
B. Procesos endotérmicos		
C. Manejo del material y transferencia	0,85	0,85
D. Unidades de procesos interiores o encerradas		
E. Acceso		
F. Drenaje y control de derrames	0,50	0,50
Cantidad en metros cúbicos		
Factor general de peligrosidad del proceso (F1)	2,35	2,35
2. Factor especial de peligrosidad del proceso	Penalización empleada	Penalización empleada
Factor Base	1,00	1,00
A. Materiales tóxicos	0,20	0,20
B. Presión sub-atmosférica	-	-
C. Operación dentro o fuera del rango de inflamabilidad		
1. Tanques que almacenan líquidos inflamables	0,50	0,50
2. Equipos de procesos dentro o cerca del rango		
3. Procesos siempre están dentro del rango		
D. Explosión de polvo	-	-
E. Presión		
Presión de operación		
Presión de alivio		
F. Baja temperatura		
G. Cantidad de material inflamable o inestable	1,10	1,05
Cantidad en kg o lb		
Hc en BTU	65,00	43,00
1. Líquidos o gases en proceso		
2. Líquidos o gases en almacenamiento		

H. Corrosión y erosión	0,20	0,20
I. Escape por juntas y embalaje	0,30	0,30
J. Uso de equipamiento incendiado		
K. Sistema de intercambio de calor con aceite caliente		
L. Equipos de rotación		
Factor especial de peligrosidad del proceso (F2)	3,30	3,25
Factor de peligrosidad de la Unidad de Proceso (F3)	7,75	7,64
Índice de Incendio y explosión (F&EI)	124,08	122,20
Grado de peligrosidad según el F&EI	Intermedio	Intermedio
Factores de bonificación por control de pérdidas	Bonificación empleada	Bonificación empleada
1. Factor de bonificación por Control del Proceso C1		
a. Poder de emergencia	1,00	1,00
b. Enfriamiento	0,97	0,97
c. Control de explosión	1,00	1,00
d. Parada de emergencia	1,00	1,00
e. Control computarizado	1,00	1,00
f. Gas inerte	1,00	1,00
g. Instrucciones o procedimientos de operación	0,92	0,92
1. Puesta en marcha	0,50	0,50
2. Parada rutinaria	0,00	0,00
3. Condiciones normales	0,50	0,50
4. Operación a baja capacidad	0,50	0,50
5. Operación a reciclo total	0,00	0,00
6. Operación por encima de la capacidad de diseño	0,00	0,00
7. Puesta en marcha después de una breve parada	1,00	1,00
8. Puesta en marcha tras parada por mantenimiento	1,00	1,00
9. Procedimientos de mantenimiento	1,50	1,50

10. Parada de emergencia	2,50	2,50
11. Modificación o adiciones al equipo o tuberías	2,00	2,00
12. Condiciones anormales previsibles	3,00	3,00
h. Revisión sobre químicos reactivos	0,91	0,91
i. Otros análisis de peligrosidad del proceso	0,97	0,97
1. Análisis de cuantificación de riesgos		
2. Análisis de consecuencias detalladas		
3. Análisis de árbol de fallos		
4. Estudios HAZOP	0,94	0,94
5. Modos de fallas y análisis de efectos (FMEA)		
6. Revisiones de seguridad ambiental		
7. Estudios Qué pasa si?	0,96	0,96
8. Evaluaciones de lista de chequeo		
9. Gestión de la revisión del cambio		
1. Factor de bonificación por Control del Proceso C1	0,78	0,78
2. Factor de bonificación por aislamiento del material	Bonificación empleada	Bonificación empleada
a. Válvulas de control remotas	1,00	1,00
b. Depósito trasvase para emergencias	1,00	1,00
c. Drenajes	1,00	1,00
d. Sistemas de bloqueo	1,00	1,00
2. Factor de bonificación por aislamiento del material	1,00	1,00
3. Factor de bonificación por protección contra incendios	Bonificación empleada	Bonificación empleada
a. Detección de la fuga	1,00	1,00
b. Acero estructural	1,00	1,00
c. Agua contra incendios	1,00	1,00
d. Sistemas especiales	1,00	1,00
e. Sistemas de rociadores	0,81	0,81
f. Cortinas de agua	1,00	1,00

g. Espuma	0,94	0,94
h. Extintores portátiles y monitores	0,98	0,98
i. Protección de cables	0,94	0,94
3. Factor de bonificación por protección contra incendios	0,70	0,70
Factores de bonificación por control de pérdidas	0,55	0,55
Resumen del análisis de riesgo para la unidad de proceso	Valor	Valor
1. Índice de Incendio y Explosión (F&EI)	124,08	122,20
2. Radio de exposición (m)	31,77	31,29
3. Área de exposición	3.170,61	3.075,26
4. Valor del área de exposición	2.052.570,76	918.637,37
5. Factor de daño	0,65	0,64
6. Máximo daño probable a la propiedad (base) (MPPD)	1.334.170,99	587.927,92
7. Factores de bonificación por control de pérdidas	0,55	0,55
8. Máximo daño probable a la propiedad (actualizado)	734.470,90	323.658,63
9. Máximos días probables perdidos (MPDO)	12,07	7,43
10. Interrupción del negocio (BI)	335.386,96	206.392,16
11. Pérdidas totales	1.069.857,87	530.050,79
Datos además		
Costo del equipo original	514.400,00	457.200,00
Año del costo del equipo original	2005	2005
Índice de costo del año del costo original	468,20	468,20
Índice de costo del año 2018	603,10	603,10
Costo del material que contiene	1.055.026,28	531.358,85
Costo de otro equipo dentro del radio de exposición en 2018	785.497,43	0,00
Costo total	2.503.135,07	1.120.289,48
Valor de la producción de 2018	14.492.187,22	14.492.187,22

Unidad de Proceso	8: Tanque 19	9: Tanque 13
	gasolina aviación	turbocombustible
Factor Material (MF)	16	10
1. Factor general de peligrosidad del proceso	Penalización empleada	Penalización empleada
Factor Base	1,00	1,00
A. Reacciones químicas exotérmicas		
B. Procesos endotérmicos		
C. Manejo del material y transferencia	0,85	0,25
D. Unidades de procesos interiores o encerradas		
E. Acceso		
F. Drenaje y control de derrames	0,50	0,50
Cantidad en metros cúbicos		
Factor general de peligrosidad del proceso (F1)	2,35	1,75
2. Factor especial de peligrosidad del proceso	Penalización empleada	Penalización empleada
Factor Base	1,00	1,00
A. Materiales tóxicos	0,20	0,00
B. Presión sub-atmosférica	-	-
C. Operación dentro o fuera del rango de inflamabilidad		
1. Tanques que almacenan líquidos inflamables	0,50	
2. Equipos de procesos dentro o cerca del rango		0,30
3. Procesos siempre están dentro del rango		
D. Explosión de polvo	-	-
E. Presión		
Presión de operación		
Presión de alivio		
F. Baja temperatura		
G. Cantidad de material inflamable o inestable	0,95	0,70
Cantidad en kg o lb		
Hc en BTU	21,48	298,70
1. Líquidos o gases en proceso		
2. Líquidos o gases en		

almacenamiento		
H. Corrosión y erosión	0,20	0,20
I. Escape por juntas y embalaje	0,30	0,30
J. Uso de equipamiento incendiado		
K. Sistema de intercambio de calor con aceite caliente		
L. Equipos de rotación		
Factor especial de peligrosidad del proceso (F2)	3,15	2,50
Factor de peligrosidad de la Unidad de Proceso (F3)	7,40	4,38
Índice de Incendio y explosión (F&EI)	118,44	43,75
Grado de peligrosidad según el F&EI	Intermedio	Ligero
Factores de bonificación por control de pérdidas	Bonificación empleada	Bonificación empleada
1. Factor de bonificación por Control del Proceso C1		
a. Poder de emergencia	1,00	1,00
b. Enfriamiento	0,97	0,97
c. Control de explosión	1,00	1,00
d. Parada de emergencia	1,00	1,00
e. Control computarizado	1,00	1,00
f. Gas inerte	1,00	1,00
g. Instrucciones o procedimientos de operación	0,92	0,92
1. Puesta en marcha	0,50	0,50
2. Parada rutinaria	0,00	0,00
3. Condiciones normales	0,50	0,50
4. Operación a baja capacidad	0,50	0,50
5. Operación a reciclo total	0,00	0,00
6. Operación por encima de la capacidad de diseño	0,00	0,00
7. Puesta en marcha después de una breve parada	1,00	1,00
8. Puesta en marcha tras parada por mantenimiento	1,00	1,00

9. Procedimientos de mantenimiento	1,50	1,50
10. Parada de emergencia	2,50	2,50
11. Modificación o adiciones al equipo o tuberías	2,00	2,00
12. Condiciones anormales previsible	3,00	3,00
h. Revisión sobre químicos reactivos	0,91	0,91
i. Otros análisis de peligrosidad del proceso	0,97	0,97
1. Análisis de cuantificación de riesgos		
2. Análisis de consecuencias detalladas		
3. Análisis de árbol de fallos		
4. Estudios HAZOP	0,94	0,94
5. Modos de fallas y análisis de efectos (FMEA)		
6. Revisiones de seguridad ambiental		
7. Estudios Qué pasa si?	0,96	0,96
8. Evaluaciones de lista de chequeo		
9. Gestión de la revisión del cambio		
1. Factor de bonificación por Control del Proceso C1	0,78	0,78
2. Factor de bonificación por aislamiento del material	Bonificación empleada	Bonificación empleada
a. Válvulas de control remotas	1,00	1,00
b. Depósito trasvase para emergencias	1,00	1,00
c. Drenajes	1,00	1,00
d. Sistemas de bloqueo	1,00	1,00
2. Factor de bonificación por aislamiento del material	1,00	1,00
3. Factor de bonificación por protección contra incendios	Bonificación empleada	Bonificación empleada
a. Detección de la fuga	1,00	1,00
b. Acero estructural	1,00	1,00
c. Agua contra incendios	1,00	1,00
d. Sistemas especiales	1,00	1,00
e. Sistemas de rociadores	0,81	0,81

f. Cortinas de agua	1,00	1,00
g. Espuma	0,94	0,94
h. Extintores portátiles y monitores	0,98	0,98
i. Protección de cables	0,94	0,94
3. Factor de bonificación por protección contra incendios	0,70	0,70
Factores de bonificación por control de pérdidas	0,55	0,55
Resumen del análisis de riesgo para la unidad de proceso	Valor	Valor
1. Índice de Incendio y Explosión (F&EI)	118,44	43,75
2. Radio de exposición (m)	30,32	11,20
3. Área de exposición	2.888,92	394,18
4. Valor del área de exposición	2.034.378,56	5.290.996,12
5. Factor de daño	0,62	0,20
6. Máximo daño probable a la propiedad (base) (MPPD)	1.261.314,71	1.058.199,22
7. Factores de bonificación por control de pérdidas	0,55	0,55
8. Máximo daño probable a la propiedad (actualizado)	694.362,99	582.546,42
9. Máximos días probables perdidos (MPDO)	11,67	10,52
10. Interrupción del negocio (BI)	324.412,05	292.359,69
11. Pérdidas totales	1.018.775,03	874.906,11
Datos además		
Costo del equipo original	437.400,00	983.000,00
Año del costo del equipo original	2005	2005
Índice de costo del año del costo original	468,20	468,20
Índice de costo del año 2018	603,10	603,10
Costo del material que contiene	348.097,43	5.186.207,69
Costo de otro equipo dentro del radio de exposición en 2018	1.569.426,28	0,00
Costo total	2.480.949,47	6.452.434,30
Valor de la producción de 2018	14.492.187,22	14.492.187,22

Unidad de Proceso	10: Tanque 22	11: Tanque 23
	Turbocombustible	turbocombustible
Factor Material (MF)	10	10
1. Factor general de peligrosidad del proceso	Penalización empleada	Penalización empleada
Factor Base	1,00	1,00
A. Reacciones químicas exotérmicas		
B. Procesos endotérmicos		
C. Manejo del material y transferencia	0,25	0,25
D. Unidades de procesos interiores o encerradas		
E. Acceso		
F. Drenaje y control de derrames	0,50	0,50
Cantidad en metros cúbicos		
Factor general de peligrosidad del proceso (F1)	1,75	1,75
2. Factor especial de peligrosidad del proceso	Penalización empleada	Penalización empleada
Factor Base	1,00	1,00
A. Materiales tóxicos	0,00	0,00
B. Presión sub-atmosférica	-	-
C. Operación dentro o fuera del rango de inflamabilidad		
1. Tanques que almacenan líquidos inflamables		
2. Equipos de procesos dentro o cerca del rango	0,30	0,30
3. Procesos siempre están dentro del rango		
D. Explosión de polvo	-	-
E. Presión		
Presión de operación		
Presión de alivio		
F. Baja temperatura		
G. Cantidad de material inflamable o inestable	0,70	0,70
Cantidad en kg o lb		
Hc en BTU	292,30	289,50
1. Líquidos o gases en proceso		

2. Líquidos o gases en almacenamiento		
H. Corrosión y erosión	0,20	0,20
I. Escape por juntas y embalaje	0,30	0,30
J. Uso de equipamiento incendiado		
K. Sistema de intercambio de calor con aceite caliente		
L. Equipos de rotación		
Factor especial de peligrosidad del proceso (F2)	2,50	2,50
Factor de peligrosidad de la Unidad de Proceso (F3)	4,38	4,38
Índice de Incendio y explosión (F&EI)	43,75	43,75
Grado de peligrosidad según el F&EI	Ligero	Ligero
Factores de bonificación por control de pérdidas	Bonificación empleada	Bonificación empleada
1. Factor de bonificación por Control del Proceso C1		
a. Poder de emergencia	1,00	1,00
b. Enfriamiento	0,97	0,97
c. Control de explosión	1,00	1,00
d. Parada de emergencia	1,00	1,00
e. Control computarizado	1,00	1,00
f. Gas inerte	1,00	1,00
g. Instrucciones o procedimientos de operación	0,92	0,92
1. Puesta en marcha	0,50	0,50
2. Parada rutinaria	0,00	0,00
3. Condiciones normales	0,50	0,50
4. Operación a baja capacidad	0,50	0,50
5. Operación a reciclo total	0,00	0,00
6. Operación por encima de la capacidad de diseño	0,00	0,00
7. Puesta en marcha después de una breve parada	1,00	1,00
8. Puesta en marcha tras parada por	1,00	1,00

mantenimiento		
9. Procedimientos de mantenimiento	1,50	1,50
10. Parada de emergencia	2,50	2,50
11. Modificación o adiciones al equipo o tuberías	2,00	2,00
12. Condiciones anormales previsibles	3,00	3,00
h. Revisión sobre químicos reactivos	0,91	0,91
i. Otros análisis de peligrosidad del proceso	0,97	0,97
1. Análisis de cuantificación de riesgos		
2. Análisis de consecuencias detalladas		
3. Análisis de árbol de fallos		
4. Estudios HAZOP	0,94	0,94
5. Modos de fallas y análisis de efectos (FMEA)		
6. Revisiones de seguridad ambiental		
7. Estudios Qué pasa si?	0,96	0,96
8. Evaluaciones de lista de chequeo		
9. Gestión de la revisión del cambio		
1. Factor de bonificación por Control del Proceso C1	0,78	0,78
2. Factor de bonificación por aislamiento del material	Bonificación empleada	Bonificación empleada
a. Válvulas de control remotas	1,00	1,00
b. Depósito trasvase para emergencias	1,00	1,00
c. Drenajes	1,00	1,00
d. Sistemas de bloqueo	1,00	1,00
2. Factor de bonificación por aislamiento del material	1,00	1,00
3. Factor de bonificación por protección contra incendios	Bonificación empleada	Bonificación empleada
a. Detección de la fuga	1,00	1,00
b. Acero estructural	1,00	1,00
c. Agua contra incendios	1,00	1,00
d. Sistemas especiales	1,00	1,00

e. Sistemas de rociadores	0,81	0,81
f. Cortinas de agua	1,00	1,00
g. Espuma	0,94	0,94
h. Extintores portátiles y monitores	0,98	0,98
i. Protección de cables	0,94	0,94
3. Factor de bonificación por protección contra incendios	0,70	0,70
Factores de bonificación por control de pérdidas	0,55	0,55
Resumen del análisis de riesgo para la unidad de proceso	Valor	Valor
1. Índice de Incendio y Explosión (F&EI)	43,75	43,75
2. Radio de exposición (m)	11,20	11,20
3. Área de exposición	394,18	394,18
4. Valor del área de exposición	5.185.795,65	5.142.256,43
5. Factor de daño	0,20	0,20
6. Máximo daño probable a la propiedad (base) (MPPD)	1.037.159,13	1.028.451,29
7. Factores de bonificación por control de pérdidas	0,55	0,55
8. Máximo daño probable a la propiedad (actualizado)	570.963,70	566.169,97
9. Máximos días probables perdidos (MPDO)	10,39	10,34
10. Interrupción del negocio (BI)	288.901,59	287.462,04
11. Pérdidas totales	859.865,29	853.632,00
Datos además		
Costo del equipo original	969.800,00	965.400,00
Año del costo del equipo original	2005	2005
Índice de costo del año del costo original	468,20	468,20
Índice de costo del año 2018	603,10	603,10
Costo del material que contiene	5.074.917,67	5.027.488,80
Costo de otro equipo dentro del radio de exposición en 2018	0,00	0,00
Costo total	6.324.141,04	6.271.044,42

Valor de la producción de 2018	14.492.187,22	14.492.187,22
---------------------------------------	---------------	---------------

Unidad de Proceso	12: Tanque 17	13: Tanque 30
	Nafta	fuel oil
Factor Material (MF)	16	10
1. Factor general de peligrosidad del proceso	Penalización empleada	Penalización empleada
Factor Base	1,00	1,00
A. Reacciones químicas exotérmicas		
B. Procesos endotérmicos		
C. Manejo del material y transferencia	0,85	0,25
D. Unidades de procesos interiores o encerradas		
E. Acceso		
F. Drenaje y control de derrames	0,50	0,50
Cantidad en metros cúbicos		
Factor general de peligrosidad del proceso (F1)	2,35	1,75
2. Factor especial de peligrosidad del proceso	Penalización empleada	Penalización empleada
Factor Base	1,00	1,00
A. Materiales tóxicos	0,20	0,00
B. Presión sub-atmosférica	-	-
C. Operación dentro o fuera del rango de inflamabilidad		
1. Tanques que almacenan líquidos inflamables	0,50	
2. Equipos de procesos dentro o cerca del rango		0,30
3. Procesos siempre están dentro del rango		
D. Explosión de polvo	-	-
E. Presión		
Presión de operación		
Presión de alivio		
F. Baja temperatura		
G. Cantidad de material inflamable o inestable	1,20	0,70
Cantidad en kg o lb		
Hc en BTU	109,20	328,90

1. Líquidos o gases en proceso		
2. Líquidos o gases en almacenamiento		
H. Corrosión y erosión	0,20	0,20
I. Escape por juntas y embalaje	0,30	0,30
J. Uso de equipamiento incendiado		
K. Sistema de intercambio de calor con aceite caliente		
L. Equipos de rotación		
Factor especial de peligrosidad del proceso (F2)	3,40	2,50
Factor de peligrosidad de la Unidad de Proceso (F3)	7,99	4,38
Índice de Incendio y explosión (F&EI)	127,84	43,75
Grado de peligrosidad según el F&EI	Intenso	Ligero
Factores de bonificación por control de pérdidas	Bonificación empleada	Bonificación empleada
1. Factor de bonificación por Control del Proceso C1		
a. Poder de emergencia	1,00	1,00
b. Enfriamiento	0,97	0,97
c. Control de explosión	1,00	1,00
d. Parada de emergencia	1,00	1,00
e. Control computarizado	1,00	1,00
f. Gas inerte	1,00	1,00
g. Instrucciones o procedimientos de operación	0,92	0,92
1. Puesta en marcha	0,50	0,50
2. Parada rutinaria	0,00	0,00
3. Condiciones normales	0,50	0,50
4. Operación a baja capacidad	0,50	0,50
5. Operación a reciclo total	0,00	0,00
6. Operación por encima de la capacidad de diseño	0,00	0,00
7. Puesta en marcha después de una breve parada	1,00	1,00

8. Puesta en marcha tras parada por mantenimiento	1,00	1,00
9. Procedimientos de mantenimiento	1,50	1,50
10. Parada de emergencia	2,50	2,50
11. Modificación o adiciones al equipo o tuberías	2,00	2,00
12. Condiciones anormales previsibles	3,00	3,00
h. Revisión sobre químicos reactivos	0,91	0,91
i. Otros análisis de peligrosidad del proceso	0,97	0,97
1. Análisis de cuantificación de riesgos		
2. Análisis de consecuencias detalladas		
3. Análisis de árbol de fallos		
4. Estudios HAZOP	0,94	0,94
5. Modos de fallas y análisis de efectos (FMEA)		
6. Revisiones de seguridad ambiental		
7. Estudios Qué pasa si?	0,96	0,96
8. Evaluaciones de lista de chequeo		
9. Gestión de la revisión del cambio		
1. Factor de bonificación por Control del Proceso C1	0,78	0,78
2. Factor de bonificación por aislamiento del material	Bonificación empleada	Bonificación empleada
a. Válvulas de control remotas	1,00	1,00
b. Depósito trasvase para emergencias	1,00	1,00
c. Drenajes	1,00	1,00
d. Sistemas de bloqueo	1,00	1,00
2. Factor de bonificación por aislamiento del material	1,00	1,00
3. Factor de bonificación por protección contra incendios	Bonificación empleada	Bonificación empleada
a. Detección de la fuga	1,00	1,00
b. Acero estructural	1,00	1,00
c. Agua contra incendios	1,00	1,00

d. Sistemas especiales	1,00	1,00
e. Sistemas de rociadores	0,81	0,81
f. Cortinas de agua	1,00	1,00
g. Espuma	0,94	0,94
h. Extintores portátiles y monitores	0,98	0,98
i. Protección de cables	0,94	0,94
3. Factor de bonificación por protección contra incendios	0,70	0,70
Factores de bonificación por control de pérdidas	0,55	0,55
Resumen del análisis de riesgo para la unidad de proceso	Valor	Valor
1. Índice de Incendio y Explosión (F&EI)	127,84	43,75
2. Radio de exposición (m)	32,73	11,20
3. Área de exposición	3.365,68	394,18
4. Valor del área de exposición	1.910.699,48	4.605.975,50
5. Factor de daño	0,67	0,20
6. Máximo daño probable a la propiedad (base) (MPPD)	1.280.168,65	921.195,10
7. Factores de bonificación por control de pérdidas	0,55	0,55
8. Máximo daño probable a la propiedad (actualizado)	704.742,22	507.124,65
9. Máximos días probables perdidos (MPDO)	11,78	9,69
10. Interrupción del negocio (BI)	327.276,40	269.303,11
11. Pérdidas totales	1.032.018,62	776.427,76
Datos además		
Costo del equipo original	639.800,00	958.800,00
Año del costo del equipo original	2005	2005
Índice de costo del año del costo original	468,20	468,20
Índice de costo del año 2018	603,10	603,10
Costo del material que contiene	1.505.979,11	4.381.989,30
Costo de otro equipo dentro del radio de exposición en 2018	0,00	0,00

Costo total	2.330.121,32	5.617.043,29
Valor de la producción de 2018	14.492.187,22	14.492.187,22

Unidad de Proceso	14: Tanque 38
	fuel oil
Factor Material (MF)	10
1. Factor general de peligrosidad del proceso	Penalización empleada
Factor Base	1,00
A. Reacciones químicas exotérmicas	
B. Procesos endotérmicos	
C. Manejo del material y transferencia	0,25
D. Unidades de procesos interiores o encerradas	
E. Acceso	
F. Drenaje y control de derrames	0,50
Cantidad en metros cúbicos	
Factor general de peligrosidad del proceso (F1)	1,75
2. Factor especial de peligrosidad del proceso	Penalización empleada
Factor Base	1,00
A. Materiales tóxicos	0,00
B. Presión sub-atmosférica	-
C. Operación dentro o fuera del rango de inflamabilidad	
1. Tanques que almacenan líquidos inflamables	
2. Equipos de procesos dentro o cerca del rango	0,30
3. Procesos siempre están dentro del rango	
D. Explosión de polvo	-
E. Presión	
Presión de operación	
Presión de alivio	
F. Baja temperatura	
G. Cantidad de material inflamable o inestable	0,70
Cantidad en kg o lb	

Hc en BTU	298,40
1. Líquidos o gases en proceso	
2. Líquidos o gases en almacenamiento	
H. Corrosión y erosión	0,20
I. Escape por juntas y embalaje	0,30
J. Uso de equipamiento incendiado	
K. Sistema de intercambio de calor con aceite caliente	
L. Equipos de rotación	
Factor especial de peligrosidad del proceso (F2)	2,50
Factor de peligrosidad de la Unidad de Proceso (F3)	4,38
Índice de Incendio y explosión (F&EI)	43,75
Grado de peligrosidad según el F&EI	Ligero
Factores de bonificación por control de pérdidas	Bonificación empleada
1. Factor de bonificación por Control del Proceso C1	
a. Poder de emergencia	1,00
b. Enfriamiento	0,97
c. Control de explosión	1,00
d. Parada de emergencia	1,00
e. Control computarizado	1,00
f. Gas inerte	1,00
g. Instrucciones o procedimientos de operación	0,92
1. Puesta en marcha	0,50
2. Parada rutinaria	0,00
3. Condiciones normales	0,50
4. Operación a baja capacidad	0,50
5. Operación a reciclo total	0,00
6. Operación por encima de la capacidad de diseño	0,00
7. Puesta en marcha después de una	1,00

breve parada	
8. Puesta en marcha tras parada por mantenimiento	1,00
9. Procedimientos de mantenimiento	1,50
10. Parada de emergencia	2,50
11. Modificación o adiciones al equipo o tuberías	2,00
12. Condiciones anormales previsibles	3,00
h. Revisión sobre químicos reactivos	0,91
i. Otros análisis de peligrosidad del proceso	0,97
1. Análisis de cuantificación de riesgos	
2. Análisis de consecuencias detalladas	
3. Análisis de árbol de fallos	
4. Estudios HAZOP	0,94
5. Modos de fallas y análisis de efectos (FMEA)	
6. Revisiones de seguridad ambiental	
7. Estudios Qué pasa si?	0,96
8. Evaluaciones de lista de chequeo	
9. Gestión de la revisión del cambio	
1. Factor de bonificación por Control del Proceso C1	0,78
2. Factor de bonificación por aislamiento del material	Bonificación empleada
a. Válvulas de control remotas	1,00
b. Depósito trasvase para emergencias	1,00
c. Drenajes	1,00
d. Sistemas de bloqueo	1,00
2. Factor de bonificación por aislamiento del material	1,00
3. Factor de bonificación por protección contra incendios	Bonificación empleada
a. Detección de la fuga	1,00
b. Acero estructural	1,00

c. Agua contra incendios	1,00
d. Sistemas especiales	1,00
e. Sistemas de rociadores	0,81
f. Cortinas de agua	1,00
g. Espuma	0,94
h. Extintores portátiles y monitores	0,98
i. Protección de cables	0,94
3. Factor de bonificación por protección contra incendios	0,70
Factores de bonificación por control de pérdidas	0,55
Resumen del análisis de riesgo para la unidad de proceso	Valor
1. Índice de Incendio y Explosión (F&EI)	43,75
2. Radio de exposición (m)	11,20
3. Área de exposición	394,18
4. Valor del área de exposición	4.647.168,26
5. Factor de daño	0,20
6. Máximo daño probable a la propiedad (base) (MPPD)	929.433,65
7. Factores de bonificación por control de pérdidas	0,55
8. Máximo daño probable a la propiedad (actualizado)	511.660,03
9. Máximos días probables perdidos (MPDO)	9,74
10. Interrupción del negocio (BI)	270.727,46
11. Pérdidas totales	782.387,50
Datos además	
Costo del equipo original	965.400,00
Año del costo del equipo original	2005
Índice de costo del año del costo original	468,20
Índice de costo del año 2018	603,10
Costo del material que contiene	4.423.722,75
Costo de otro equipo dentro del radio	0,00

de exposición en 2018	
Costo total	5.667.278,36
Valor de la producción de 2018	14.492.187,22