

Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química



**Análisis de riesgos por incendio, explosión y accidente tóxico en el
área de tratamiento de la Planta de Procesamiento de Crudo de la
EPEP Centro**

TRABAJO DE DIPLOMA

Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico.

Autora: María Alejandra Carrera Cruz

Tutor: Ing. Yoney López Hervis, Dr.C.

Matanzas, Cuba.

2022

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, María Alejandra Carrera Cruz, declaro que soy la única autora de este Trabajo de Diploma y lo pongo a disposición de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro y de la Universidad de Matanzas, para hacer uso del mismo con el objetivo y finalidad que se estime conveniente.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Tribunal.

Firma.

Miembro del Tribunal.

Firma.

Miembro del Tribunal.

Firma.

Miembro del Tribunal.

Firma

**"Muere lentamente quien no viaja,
quien no lee, quien no oye música,
quien no encuentra gracias en sí
mismo."**

Pablo Neruda

DEDICATORIA

A mis padres
A mi tía materna
A mis abuelos

AGRADECIMIENTOS

Con la culminación del presente Trabajo de Diploma hoy cierro en mi vida una de las etapas más importante y decisiva para mí. Lo que una vez fue un anhelo hoy se ha convertido en algo real. Este sueño cumplido no había sido posible sin el apoyo de todas esas personas que me han ayudado a llegar hasta aquí, y sería en vano comenzar a mencionar nombres, sabiendo que siempre faltará alguien en la lista. Por eso doy gracias a todos los que me tendieron su mano y de una forma u otra creyeron en mí.

- **A Dios:**

Por darme la capacidad de seguir adelante a pesar de las duras pruebas de la vida y mantener mi fe siempre.

- **A mi tutor Ing. Yoney López Hervis, Dr.C.**

Por dedicar su tiempo en la realización de este trabajo para que fuese posible y quedara de la mejor manera.

- **A Alejandro Días Linares:**

Por extenderme su mano y siempre estar ahí presente para todas mis dudas.

- **A mis padres:**

Por ser mi apoyo mayor en toda mi trayectoria estudiantil y en mi vida en general. Por ser la base de tanto esfuerzo y sacrificio. A ustedes dedico este logro tan esperado. Mamá y papá: sepan que es de ustedes casi tanto como mío.

- **A mi tía materna:**

Por estar siempre al tanto de mis resultados y de mi bienestar. Por disfrutar de todos mis logros y estar orgullosa de mi. Por todos sus gestos de amor y su preocupación por lograr mi satisfacción académica.

- **A mis abuelos:**

Por dejarme ser su niña pequeña y complacerme en todo lo que pudieron. Además de apoyarme hasta el final en todas mis decisiones y caprichos.

- **A mi amor bello, Víctor:**

Por ser ese hombre que siempre he querido a mi lado y a quien debo mi amor; porque a pesar de mi carácter y mi mal genio has sabido cómo llevar la situación y hacerme feliz. Por regalarme una convivencia tan especial y amorosa día a día. Por apoyarme en cada decisión y complacerme en cada locura. Te amo.

Gracias a todos.

Resumen

El presente trabajo se realiza en la Planta de Procesamiento de Crudo perteneciente a la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro. En él se analizan los riesgos por incendio, explosión y accidente tóxico en la EPEPC. Primero, se describen las características y propiedades físico-químicas de las sustancias involucradas en el proceso. Luego se evalúan mediante el Software *ALOHA* las áreas de atmósferas peligrosas para los distintos escenarios, siendo el de mayor área la *BLEVE*; provocando que hasta el tanque más pequeño ubicado en del área de tratamiento de crudo ocasione daños a la planta y a la zona exterior. A partir del Índice de *Mond* se determina cuáles son los factores más influyentes en la gravedad de los accidentes industriales con sustancias peligrosas para tener una imagen general de todas aquellas variables que afectan a sus probabilidades de ocurrencia (frecuencia), efectos y consecuencias. Obteniéndose que para todos los Índices calculados existen variaciones en la categoría, desde ligero hasta muy catastrófico y muy extremo. Se determinan también, las afectaciones humanas mediante *Probit* por efectos de radiación térmica y sobrepresión.

Abstract

The present work is carried out at the Crude Oil Processing Plant belonging to the Perforation and Petroleum Extraction Center Enterprise. It analyzes the risks of fire, explosion and toxic accident at the Enterprise. First, the characteristics and physicochemical properties of the substances involved in the process are described. Then, using the *ALOHA* Software, the areas of dangerous atmospheres are evaluated for the different scenarios, the one with the largest area being BLEVE; causing even the smallest tank located in the crude oil treatment area to cause damage to the plant and the outside area. From the *Mond* index, it is determined which are the most influential factors in the severity of industrial accidents with dangerous substances in order to have a general image of all those variables that affect their probabilities of occurrence (frequency), effects and consequences. Obtaining that for all the calculated indices there are variations in the category, from light to very catastrophic and very extreme. Human affectations are also determined by means of *Probit* due to the effect of thermal radiation and overpressure.

Tabla de contenido

Introducción	1
Capítulo 1: Análisis bibliográfico	4
1.1 Características y propiedades físico-químicas de las sustancias involucradas en el proceso.....	4
1.2 Principales escenarios de riesgos.....	7
1.2.1 Incendio y explosión.....	12
1.3 Métodos de análisis y evaluación de riesgos en procesos tecnológicos.....	13
1.3.1 Métodos de análisis cualitativos y cuantitativos o semicuantitativos.....	13
1.4 Evaluación de atmosferas peligrosas. Softwares más utilizados.....	23
1.4.1 Peligros que presentan los tanques de almacenamiento de petróleo.....	25
1.5 Método para la determinación de afectaciones humanas. Ecuaciones <i>Probit</i>	26
1.6 Conclusiones parciales del capítulo 1.....	26
Capítulo 2: Materiales y métodos	28
2.1 Descripción del proceso tecnológico de producción de petróleo en la EPEP-Centro.....	28
2.1.1 Descripción del caso estudio.....	29
2.2 Características de las sustancias sujetas a análisis.....	30
2.3 Descripción de las técnicas de análisis y evaluación a utilizar.....	32
2.3.1 Metodología empleada para el cálculo del Índice de <i>Mond</i>	32
2.3.2 Software <i>ALOHA</i> . Características fundamentales y su aplicación en la evaluación de las consecuencias de los accidentes industriales.....	38
2.3.3 Establecimiento de las condiciones de trabajo con el software.....	42
2.4 Método <i>Probit</i>	43
2.4.1 Método <i>Probit</i> de vulnerabilidad a radiaciones térmicas.....	44
2.4.2 Método <i>Probit</i> de vulnerabilidad a explosiones.....	45
Capítulo 3: Análisis de los resultados	47
3.1 Resultados obtenidos en el cálculo del Índice de <i>Mond</i>	47
3.2 Análisis y evaluación de las áreas de atmósferas peligrosas obtenidas mediante <i>ALOHA</i> en el área de tratamiento de crudo.....	62
3.2.1 Análisis y evaluación de las áreas de atmósferas peligrosas obtenidas para el escenario <i>Pool Fire</i>	62
3.2.2 Análisis y evaluación de las áreas de atmósferas peligrosas obtenidas para el escenario BLEVE.....	66
3.3 Análisis de resultados alcanzados por <i>Probit</i>	69

3.3.1 Análisis de vulnerabilidad por efectos de radiación térmica.....	70
3.3.1.1 Análisis de vulnerabilidad por efecto de la radiación térmica generada por el <i>Pool Fire</i>	70
3.3.1.2 Análisis de vulnerabilidad por efecto de la radiación térmica generada por el BLEVE.....	71
3.3.2 Análisis del efecto de la sobrepresión en caso de ocurrir una explosión producto de un BLEVE.....	71
3.4 Conclusiones parciales del capítulo 3.....	72
Conclusiones.....	73
Recomendaciones.....	74
Bibliografía.....	75
Anexos.....	79

Introducción

La industria petrolera es una de las más importantes a escala mundial. Esta industria evidencia cada día más su desarrollo y crecimiento; situación por la cual se requiere de esfuerzos técnicos e investigativos para lograr la estabilidad tecnológica y la seguridad industrial que necesita.

En Cuba existen empresas que extraen, procesan y comercializan combustibles de diferentes tipos. Desde hace varias décadas cuenta con la posibilidad de explorar, explotar yacimientos, tratar crudos extraídos, comercializar y refinar petróleo nativo. En la provincia de Matanzas, particularmente, se encuentra la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro - "(EPEP-Centro)"-, la cual es la encargada de supervisar y regir toda la actividad petrolífera en la región central de Cuba. Entre sus tareas fundamentales se encuentra la perforación y extracción de yacimientos ubicados en la región y el tratamiento previo a su comercialización del petróleo crudo.

La Planta de Procesamiento de Crudos (PPC) perteneciente a la UEB Producción, es donde específicamente se trata el crudo extraído. El proceso de tratamiento implica un tratamiento termoquímico en varias etapas tecnológicas, las cuales son las encargadas de garantizar un petróleo crudo con la calidad requerida para ser vendido a los diferentes organismos, y posteriormente enviarlos por bombeo a través del oleoducto hacia la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas (DTCCM).

Las condiciones operacionales en dicho proceso resultan complejas y significativamente peligrosas; esto se debe precisamente a lo perjudicial que son las sustancias que se manejan, así como su potencial para provocar serios daños desde la perspectiva de la integridad y salud de las personas hasta el impacto ambiental y las afectaciones económicas. Constantemente la PPC como toda instalación acondicionada para el tratamiento de crudos está expuesta a la influencia de accidentes, fundamentalmente incendio y explosión. El análisis y la evaluación de estos riesgos para toda instalación que procese sustancias combustibles, cobra significativa importancia y puede ayudar a prevenir cualquier accidente. Esta temática se ha abordado mundialmente con la seriedad que implican sus resultados hace aproximadamente 33 años, período en que tuvo lugar el desastre tecnológico de Bhopal en la India, como resultado de una cadena de negligencias donde perdieron la vida alrededor de 3 000 personas y otras 20 000 quedaron inhabilitadas. Este drama constituye la mayor catástrofe ambiental industrial y es a la vez el inicio del actual análisis de riesgos en plantas químicas. Otros accidentes como la explosión del reactor nuclear en Chernóbil 2 años más tarde, considerado el desastre nuclear más importante en la historia y el incendio de los pozos petroleros en Kuwait provocado por Irak

en 1988, donde se quemaron 400 000 toneladas de petróleo diarias durante 5 días y se emitieron en forma de nube más de 105 000 toneladas de dióxido de azufre han reafirmado la imperante necesidad de realizar, analizar y divulgar análisis de riesgos en instalaciones de procesos (Hernández, 2017).

Cuba no ha sido exento a este tipo de catástrofe, ejemplo de esto lo tenemos en la tarde del viernes 5 de agosto del presente año, una descarga eléctrica impactó en el techo domo geodésico del tanque 52 de la Base de Supertanqueros de Matanzas, el depósito contenía unos 26 000 m³ de crudo nacional, alrededor del 50 % de su capacidad máxima; generando así el mayor incendio industrial de la historia del país. Otros tres contenedores de este tipo también sufrieron explosiones. Para el día 12 de agosto el cuerpo de Bomberos de Cuba a la 7:00 am declaró la liquidación del incendio. Todo esto trajo como consecuencia un centenar de heridos y varios muertos.

Dueñas (2018) analiza los posibles accidentes secundarios que se puedan manifestar a partir de un accidente primario, relacionado con un derrame de nafta en la Base de Crudos de la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas. Teniendo en cuenta los tipos de escenarios que se manifiestan relacionados a incendios y/o explosiones.

Precisamente en la PPC, objeto de estudio de la presente investigación se procederá al análisis de riesgo por incendio, explosión y toxicidad utilizando el Software *ALOHA* para la evaluación de atmósferas peligrosas. Este tipo de investigación se ha realizado antes en la industria petrolera ejemplo de ello es, el estudio de Hernández (2017); con la diferencia que cambia el flujo tecnológico y volumen de producción. Además del Índice de *Mond* para medir el nivel de riesgo de accidente tóxico ya que la instalación presenta sustancias tóxicas.

Por esta razón se plantea el siguiente **problema científico**: ¿Cuál sería la magnitud de las afectaciones materiales y humanas de ocurrir los escenarios de riesgo *Pool Fire* y BLEVE en el área de tratamiento de la Planta de Procesamiento de Crudo en la EPEP Centro?

Para la solución de este problema se expone la siguiente **hipótesis**: Si se evalúa el riesgo por incendio, explosión y accidente tóxico según el Índice de *MOND/ICI* se podrá determinar los daños provocados por los mismos a la entidad.

Por lo que el **objetivo general** de este trabajo es: Determinar el riesgo por incendio, explosión y accidente tóxico en el área de tratamiento de la Planta de Procesamiento de Crudo en la EPEP Centro.

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

1. Estimar las características de los escenarios relacionados a incendios y explosiones en función de la sustancia de interés.
2. Pronosticar el efecto continuado de un accidente primario dentro del área de tratamiento.

3. Evaluar el riesgo por incendio, explosión y toxicidad en el área de tratamiento.

Capítulo 1: Análisis bibliográfico

En este capítulo se abordan diversas temáticas relacionadas con las características y propiedades físico-químicas de las sustancias involucradas en el proceso. Además, se analiza los principales escenarios de riesgos; donde se incluye una serie de recomendaciones para prevenir incendios y explosiones. Se realiza una evaluación de atmosferas peligrosas destacando los usuarios más utilizados. También se refleja los peligros que presentan los tanques de almacenamiento de petróleo. Cada uno de los aspectos vinculados a la temática investigada, han sido obtenidos como resultado de la revisión bibliográfica de los disímiles sitios y documentos de interés, entre ellos: CITGO y ESMAX, para el desarrollo de la investigación en cuestión.

1.1 Características y propiedades físico-químicas de las sustancias involucradas en el proceso

De las características de las sustancias de interés que se manipulan en el proceso caso de estudio, depende netamente el conjunto de riesgos a los cuales se exponen las mismas. El conocimiento de dichas características incide en la toma de decisiones con el objetivo de minimizar los daños que puedan derivarse de su presencia en accidentes industriales mayores.

- Petróleo crudo nativo. PCN

Según Ruano (2013) y Oilfield Review (2015) el petróleo es la mayor fuente de hidrocarburos que existe en la naturaleza hidrocarbonada y está constituido por una mezcla compleja de diferentes tipos de hidrocarburos, con un pequeño porcentaje de otros elementos como azufre, nitrógeno y metales integrados en hidrocarburos de estructuras más o menos complejas. Frecuentemente se encuentra el agua emulsionada en el crudo a veces hasta en un 30%, es un líquido combustible con apariencia aceitosa, espumosa, negra y viscosa.

Según Hernández (2017) la caracterización del crudo, por tipo de petróleo son:

- base parafínica: son muy estables por su poca reactividad, son muy fluidos y de color claro y proporcionan una mayor cantidad de naftas y lubricantes.
- base asfáltica: son muy viscosos, de oscura coloración y de elevada densidad, cuando llegan a oxidarse dan lugar a la formación de ácidos nafténicos los cuales actúan de manera muy corrosiva sobre los metales y tras el proceso de refinación generan una gran cantidad de residuos.
- base mixta: son una combinación de los parafínicos y de los nafténicos, son muy reactivos y se combinan con hidrógeno, oxígeno, cloro y azufre para formar gomas, resinas y lacas entre otros productos.

La densidad en grados API da una idea de la composición más o menos ligera de un crudo, que será más ligero cuanto mayor es su °API, con mayor proporción de hidrocarburos ligeros, y por lo tanto más favorable para la obtención de productos destilados de mayor valor añadido como gasolinas y gasóleos mediante un esquema de refino simple; mientras que un crudo con menor °API, más pesado, necesitará de un esquema de refino más complejo que incluya procesos de conversión para obtener los mismos destilados (Hernández, 2017) .

- Crudo liviano: $\geq 31,1$ °API
- Crudo mediano: de 22,3 a 31,1 °API
- Crudo pesado: de 10,0 a 22,3 °API
- Crudo extra pesado: ≤ 10 °API

El contenido en azufre de un crudo es un factor importante, ya que se trasladaría casi en su totalidad a los productos de refino, que están sometidos a fuertes restricciones de calidad respecto a su contenido. Será necesario eliminarlo de forma adecuada mediante una serie de procesos industriales que encarecen la operación, por esta razón, los crudos de bajo azufre necesitarán unos procesos más suaves, y normalmente su valoración en el mercado será superior a los de alto azufre. Por la presencia de azufre se establecen de la siguiente forma: Dulce y Ácido, el petróleo dulce es aquel que contiene menos de 0,5 % de contenido sulfuroso, tiene muy alta calidad y es ampliamente usado para ser procesado como gasolina; mientras el ácido recibe características contrarias (Schlumberger, 2015).

En 2022, el laboratorio de ensayos E.P.E.P Centro señala que el crudo del yacimiento Varadero se caracteriza por ser un crudo extra pesado ya que posee 10 °API aproximadamente, 1 500 cSt de viscosidad a 50 °C y 8 % de azufre.

Algunas de sus propiedades físico-químicas según ESMAX, (2020) son:

- Punto de inflamación: 61 °C (No es inflamable a temperatura ambiente)
- Límite de explosión, inferior: 0,6 % (V)
- Límite de explosión, superior: 8 % (V)
- Punto de combustión: 91 °C
- Presión de vapor: < 1 psi
- Gas natural del petróleo. GNP

Hernández (2017) define el gas natural como una mezcla homogénea en proporciones variables de hidrocarburos parafínicos, su componente principal es el metano cuya composición varía generalmente entre 90 y 98 % (molar), contiene también etano, propano, butano y componentes de menor proporción más pesados. También tiene en menores proporciones gases inorgánicos como el dióxido de carbono, monóxido de carbono, dinitrógeno, sulfuro de hidrógeno, dióxígeno y vapor de agua entre otros. Todos estos contaminantes se consideran impurezas del gas

natural y realmente causan la formación de hidratos por condensación del vapor de agua y el aumento acelerado de la corrosión en los equipos de proceso. Se puede encontrar como gas asociado y gas no asociado, dando esto una medida del gas que acompaña al crudo desde el yacimiento o de los yacimientos netamente gasíferos respectivamente. Se considera que el gas natural tiene una serie de ventajas sobre otros combustibles debido a su seguridad por el hecho de tener límites de inflamabilidad en rangos tan estrechos (de 4 % a 14 %) y una alta temperatura de ignición.

GREENPEACE (2016) explica que es un gas de efecto invernadero que contribuye a aumentar el cambio climático, pero a pesar de todo es la opción menos mala dentro de la quema de combustibles fósiles.

Entre sus propiedades físicas calculadas por Carrillo y Guerrero, (2013) se pueden citar las siguientes:

- Tc: -75,56 °C
- Pc: 4 601 kPa
- Densidad media: 15,37 kg/m³
- Viscosidad media: 0,0129 cP

La presencia de sulfuro de hidrógeno en el gas natural es de importancia significativa teniendo en cuenta sus riesgos inherentes, sobre todo de explosividad y para la salud.

- Sulfuro de Hidrógeno. H₂S

El sulfuro de hidrógeno se encuentra en gran medida acompañando al crudo extraído, unido directamente al gas natural o gas acompañante, a temperatura ambiente se encuentra en fase gaseosa, por lo que su separación y por tanto emanación es bastante fácil, y muy difícil de controlar (Ramírez, 2016).

Es un gas incoloro, inflamable, con olor a huevo podrido, de sabor dulce y perceptible a concentraciones de 0,002 mg/L. Sin embargo, en concentraciones mayores de 500 ppm afecta la capacidad de percepción del nervio olfativo y con ello, impide su detección a través de este sentido, haciéndolo más peligroso. Es muy tóxico por lo que una exposición prolongada a este gas puede generar efectos adversos a la salud. El producto húmedo es muy corrosivo del acero al carbón y, si los aceros se encuentran muy tensionados, hay corrosión y ruptura. También corroe al cobre y latón. Se encuentra en una amplia variedad de procesos industriales, además de la industria del petróleo, en la producción de pulpa y papel y en el tratamiento de las aguas residuales.

Entre sus características y propiedades físico-químicas se encuentran las siguientes:

- Temperatura de Ebullición: -60,33 °C
- Densidad: 1,19 g/cm³, más denso que el aire que posee 1,0

- Límite superior de inflamabilidad: 46 %
- Límite inferior de explosividad: 4 %
- Este producto es muy peligroso cuando se expone al calor, flama u oxidantes.
- Nafta.

La nafta según CITGO (2017) es un líquido amarillo claro transparente, aromático y volátil, obtenido como producto de la destilación fraccionada del petróleo crudo, por lo que su estructura molecular se asemeja a la del crudo. Es un producto estable e inflamable a temperatura ambiente en presencia de fuentes de ignición por lo que debe evitarse su exposición a llamas, chispas y calor.

U.S. Oil and Refining Co. (2009) plantea que la nafta puede contener vulnerabilidad de productos en diversas proporciones lo cual afecta sus propiedades físico-químicas, a ello se debe que algunos datos se reporten en rangos. La densidad relativa, densidad de vapor y la razón de evaporación se expresan con respecto a un compuesto de referencia, siendo mayormente utilizados el agua, el aire y el acetato de butilo.

Para su estudio generalmente se trabaja con valores promedios según CITGO (2017) los cuales se definen a continuación:

- Temperatura de ebullición: 36 °C
- Autoinflamabilidad: 280 - 456 °C
- Densidad: 0,760 g/cm³
- Tensión superficial: 19 - 23 dinas/cm² a 25 °C
- Viscosidad: a 30 °C menor de 1 cSt
- Punto de inflamación: -43 °C a -30 °C

1.2 Principales escenarios de riesgo

- Incendio de gases

Entre los incendios de gases se encuentran fundamentalmente según Casal *et al.* (2001) el incendio de un chorro de gas, el incendio de una nube de gas y las llamaradas.

- Chorro de gas o dardos de fuego. *Jet Fire*

Casal *et al.* (2001) y Boza (2020) afirman que este tipo de incendio tiene lugar cuando se produce el vertido accidental de vapores o gases inflamables a presión, en áreas de proceso o depósitos de almacenaje, sobre todo de equipos que contengan gases licuados.

La peligrosidad de un incendio de chorro accidental reside en la posibilidad de efecto dominó, es decir, la propagación del accidente a otras instalaciones cercanas (Ferrero, 2006).

Casal *et al.* (2001) señala que la geometría de este tipo de incendio se puede determinar mediante dos modelos determinados, los cuales dependen de si hay o no presencia de viento.

Sin presencia de viento se utiliza el modelo de *Hawthorn*, el cual permite determinar la longitud efectiva de la llama turbulenta. En presencia de viento, aunque existen más modelos, el más usado es el modelo de *Kalghatgi*, el cual presupone que la llama del dardo puede asemejarse a un cono y mediante ecuaciones totalmente empíricas calcula la inclinación, altura y anchura de la llama.

- Nube de gas inflamable

Este tipo de incendio tiene lugar cuando se produce el vertido de un gas o un vapor inflamable, de manera que se forma una nube que se va dispersando hasta que encuentra una fuente de ignición. El escape puede ser instantáneo o continuo. Estas nubes pueden estar originadas también por el vertido de un líquido que en condiciones atmosféricas experimente un flash o que se evapore muy rápidamente. Los incendios de nubes de vapor tienen una duración muy corta, de unos cuantos segundos y esto dificulta su estudio y la obtención de datos experimentales confiables. (Casal *et al.*, 2001; Atkinson, 2017 y Gyenes *et al.*, 2017)

En 1975 Eisenberg *et al.*, proponen un modelo donde se supone que el incendio tiene la forma de media elipsoide. Este modelo tiene dos parámetros geométricos característicos: el volumen y el área que emite radiación.

Según Casal *et al.* (2001) este modelo desarrollado por Eisenberg y otros autores en 1975 no está totalmente desarrollado y comporta algunos errores, pero, aun así, permite obtener un orden de magnitud de los efectos que se generan.

- Llamadas. *Flash fire*

Es la llama progresiva de difusión, de baja velocidad. No produce ondas de presión significativas. Suele estar asociada a la dispersión de vapores inflamables a ras de suelo. Cuando éstos encuentran un punto de ignición, el frente de la llama generado se propaga hasta el punto de emisión, barriendo y quemando toda la zona ocupada por los vapores en condiciones de inflamabilidad. Si el origen de los vapores es un vertido con evaporación, el fenómeno acaba en un incendio de charco (Casal *et al.*, 2002 y Boza, 2020).

López (2006) señala que la llamada corresponde a la ignición repentina de la nube de vapores en un sitio alejado del escape del fluido. Generalmente el fenómeno se modela considerando el criterio de que la nube entra en ignición a la distancia, en la dirección del viento predominante, donde se alcanza la concentración del límite inferior de explosividad.

- Incendio de líquidos

Cuando se produce un vertido de líquido inflamable este puede generar diferentes tipos de incendios, dependiendo así del tipo de escape y el lugar donde se produzca, entre ellos se encuentran: los charcos de fuego al aire libre, los charcos de fuego sobre el mar y los incendios en movimiento (Casal *et al.*, 2001).

- Charcos de fuego al aire libre. *Pool Fire*

Los charcos de fuego al aire libre se originan cuando se produce un escape o vertido de un líquido combustible sobre el suelo y en el exterior. En caso de que se produzca la ignición del líquido derramado, el tipo de fuego resultante dependerá en gran medida de si el escape es continuo o instantáneo. Si el escape es instantáneo, el líquido se irá esparciendo hasta que encuentre una barrera o hasta que se haya consumido todo el combustible en el incendio. En caso de un escape continuo, el charco irá creciendo hasta que la velocidad de combustión iguale el caudal de vertido. De este modo se llega a un diámetro de equilibrio, que se mantiene mientras no se detiene la fuga. Si el líquido queda retenido dentro de algún recipiente o área protegida, como puede ser una cubeta, el incendio no dependerá tanto de si el escape es instantáneo o continuo (Casal *et al.*, 2001 y Yao *et al.*, 2019).

Para conocer la geometría de este tipo de incendio todos los modelos que existen proponen conocer el diámetro del incendio. En caso de escape instantáneo se calcula el diámetro máximo en función del tiempo, mientras que en caso de escape continuo se calcula el diámetro de equilibrio. Para ello se han determinado ecuaciones capaces de obtener la altura y en caso de existencia de viento la inclinación y el desplazamiento (Casal *et al.*, 2001).

Existe además otra tipología de incendio de líquidos que está referida al incendio de tanques que contienen fundamentalmente hidrocarburos pesados, conocido como:

- Borbollón. *Boil over*

Según Casal *et al.* (2002); Hristov (2016) y Ahmadi *et al.* (2019) el borbollón puede producirse sobre todo en depósitos que contienen mezclas de diversos hidrocarburos. Si en uno de estos depósitos se produce un incendio la capa superficial de hidrocarburo se va calentando hasta entrar en ebullición, experimentando un proceso de destilación: los componentes más volátiles son los que pasan preferentemente a vapor, alimentando la llama. De esta forma, al irse enriqueciendo en los componentes más pesados esta capa superficial va aumentando su temperatura. A medida que transcurre el tiempo, esta capa rica en productos pesados aumenta de espesor, progresando en profundidad; la velocidad a la que aumenta su espesor es mayor que la velocidad a la que retrocede la superficie del líquido contenido en el depósito. De esta forma una onda de calor se propaga hacia la parte inferior del depósito. Si el mismo contiene agua, en forma de capa acuosa o de emulsión, en algún momento esta ola de calor (a una temperatura superior a la de ebullición del agua) llegará a la capa acuosa. Esto provocará una cierta vaporización inicial del agua; la turbulencia de este fenómeno provocará la mezcla de ambas capas, con una fuerte vaporización de agua. La generación prácticamente instantánea de una gran cantidad de vapor, con un volumen específico muy superior al del líquido, provocará una violenta erupción, con la formación de una bola de fuego y la proyección del

combustible hacia el exterior. Dada la violencia del fenómeno, el combustible inflamado puede ser proyectado hasta distancias considerables.

Según Ferrero (2006) el incendio de tipo borbollón puede manifestarse de dos formas:

- *Boil over* de capa gruesa
- *Boil over* de capa fina

La primera tipología se presenta generalmente en incendios de tanques de tratamiento de petróleo crudo debido al gran espesor de combustible que se quema sobre el sustrato acuoso. Mientras la segunda, se manifiesta generalmente en el incendio de vertidos accidentales de combustible sobre el mar debido a la capa fina de combustible que se deposita.

Ahmadi *et al.* (2019) afirma que no todos los combustibles son susceptibles de experimentar el fenómeno del *boil over*; en general éste está asociado a aquellos combustibles compuestos por una serie de componentes con una amplia gama de temperaturas de ebullición, constituyendo así un buen ejemplo el crudo pesado del petróleo.

Entre las condiciones necesarias para que ocurra un *boil over* definidas por Hernández (2017) se encuentran las siguientes:

- Que exista presencia de agua en el recipiente.
- Generación de una ola de calor.
- Que la viscosidad del hidrocarburo sea lo suficientemente elevada como para dificultar el paso del vapor.

Un *boil over* puede desencadenar diferentes efectos entre los que se pueden citar los siguientes:

- Efecto de bola de fuego.
- Efecto de proyección y esparcimiento del hidrocarburo en llamas.

Debido a la rapidez con la que el hidrocarburo es impulsado hacia el exterior por el efecto pistón del *boil over*, se produce una descompresión hasta la presión ambiente que vaporiza parte del combustible, el cual a su vez formará una bola de fuego.

- BLEVE + bola de fuego.

BLEVE, acrónimo de la expresión inglesa *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*. Este escenario se refiere a la bola de fuego que se produce por el estallido súbito y total, por calentamiento externo, de un recipiente que contiene un gas inflamable licuado a presión, cuando el material de la pared pierde resistencia mecánica y no puede resistir la presión interior. El calentamiento extremo es generalmente producido por un incendio de charco o de dardo de fuego, y la probabilidad de que estalle es especialmente elevada en los casos en los que hay un contacto directo de la llama con la superficie del recipiente (Mishra, Wehrstedt y Krebs, 2015 y Casal, 2018).

La BLEVE es un caso especial de estallido catastrófico de un recipiente a presión en el que ocurre un escape súbito a la atmósfera de una gran masa de líquido o gas licuado a presión sobrecalentados, según Boza (2020).

Condiciones para la existencia de la BLEVE:

- Sobrecalentamiento considerable del líquido, de forma que el mismo esté a una temperatura superior a su temperatura límite de sobrecalentamiento. Esta condición la cumplen la mayoría de los gases licuados. También pueden cumplirla los líquidos contenidos en recipientes cerrados que se ven sometidos a un calentamiento anómalo. En todo caso, para la existencia de la BLEVE en sentido estricto es necesario un valor mínimo de este sobrecalentamiento.
- Despresurización súbita, de forma que se reduzca instantáneamente la presión a la que se encuentra toda la masa de líquido contenida en el recipiente. Un fenómeno de este tipo suele comportar, en caso de accidente, la rotura del depósito, ya sea por el incremento excesivo de la presión interior y simultáneamente, por el calentamiento excesivo de las paredes a causa de un incendio, o ya sea por un impacto.
- Nube Tóxica

En 2017, Hernández define la Nube Tóxica como la dispersión de vapores en forma de nube con concentraciones tales, capaces de provocar afectaciones para la salud.

Para describir la evolución de nubes tanto inflamables como tóxicas en la atmósfera y hacer posible su modelización, es muy importante conocer el grado de estabilidad atmosférica que existe (EPA, 2016).

Las distintas variables meteorológicas afectan en menor o mayor grado la dispersión atmosférica de contaminantes, y a su vez, estas presentan una gran variabilidad estacional diaria (Rodríguez *et al.*, 2014).

En 2001, Casal *et al.* define las principales variables meteorológicas que afectan la dispersión de nubes de contaminantes:

- El viento: este tiene un efecto de arrastre que provoca la dispersión de nubes por desplazamiento de la masa de gas. Los datos del viento se miden a una determinada altura, por la que todas las medidas se dan referidas a una cota de referencia, generalmente se usa como cota de referencia 10 metros.
- La estabilidad atmosférica: se establece para caracterizar la capacidad que la atmósfera tiene para dispersar un contaminante, en otras palabras, se refiere al grado de turbulencia existente en un momento determinado. La clase de atmósfera viene determinada por la cantidad de insolación, la humedad, las inversiones nocturnas y el viento, según su estabilidad se caracterizan según se muestra en la tabla 1.1:

Tabla 1.1: Clases de atmósfera según su estabilidad.

Viento de superficie (a 10 m) / m s ⁻¹	Radiación solar (día)			Noche o nublado	
	Fuerte	Moderada	Débil	Nubes ≥ 4/8	Nubes ≤ 3/8
0-2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
≥ 6	C	D	D	D	D

Fuente: Casal *et al.* (2001).

Donde las letras representan el grado de estabilidad de la siguiente forma:

- A. Muy estable
 - B. Inestable
 - C. Ligeramente inestable
 - D. Neutra
 - E. Ligeramente estable
 - F. Estable
- La temperatura y la humedad relativa: básicamente son consecuencias de la estación del año, se utilizan para el cálculo de la velocidad de evaporación de un líquido además de, utilizarse en las ecuaciones de dispersión de gases pesados. La humedad del aire solo tiene efectos significativos sobre la dispersión de un contaminante si existe reactividad entre el contaminante y el vapor de agua presente en la atmósfera. Tiene también otro efecto significativo si el gas que se tiene que dispersar está a una temperatura más baja que la ambiente. En este último caso, la humedad afecta al balance energético de las masas de gas y aire implicadas en la dispersión. Esto provoca problemas de condensación de vapor de agua como las nubes de gases licuados de petróleo (GLP), por ejemplo, se ven blancas porque condensan la humedad del aire.
 - La inversión térmica: se caracteriza por un aumento anómalo de temperatura en las capas altas atmosféricas; es decir, a cierta altura (en general, alrededor de 100 m) la temperatura es superior a la de las capas de aire de cotas más bajas. Desde el punto de vista de la dispersión de gases, este es un efecto muy importante ya que impide la dispersión en altura y provoca su reflexión hacia las capas bajas atmosféricas.

1.2.1 Incendio y explosión

Entre las contingencias de origen químico que ocurren con mayor frecuencia se encuentran los incendios y explosiones, fenómenos destructivos comúnmente asociados.

El crecimiento demográfico, los procesos propios del desarrollo en la industria, el uso cada vez más frecuente de sustancias inflamables peligrosas y la falta de precauciones en su manejo, transporte y almacenamiento son los principales factores que han propiciado un aumento significativo en la magnitud y frecuencia de incendios, particularmente en las ciudades donde se ubican grandes complejos industriales, comerciales y de servicios.

Se considera que el incendio, el cual se traduce como fuego de grandes proporciones que se desarrolla sin control, el cual puede presentarse de manera instantánea o gradual, pudiendo provocar daños materiales, interrupción de los procesos de producción, pérdidas de vidas humanas y afectación al medio ambiente (Hernández, 2017).

Según Hernández (2017) y Boza (2020) definen la explosión como el equilibrio en un breve período de tiempo de una masa de gases en expansión contra la atmósfera que la envuelve. Es un determinado sistema de energía, que puede tener su origen en distintas formas de transformación (física o química), acompañada de un cambio de su energía potencial y generalmente seguida de una onda expansiva que actúa de forma destructiva sobre el recipiente o estructura que lo contiene. Según sus orígenes se dividen en dos clases de explosiones:

- Física: motivadas por cambios bruscos en las condiciones de presión y/o temperatura, que originan una sobrepresión capaz de romper las paredes del recipiente que lo contiene.
- Químicas: motivadas por reacciones químicas violentas, por deflagración o detonación de gases, vapores o polvos o por descomposición de sustancias explosivas

1.3 Métodos de análisis y evaluación de riesgos en plantas de procesos tecnológicos

1.3.1 Métodos de análisis cualitativos y cuantitativos o semicuantitativos

Los métodos de análisis de riesgos utilizados hasta el momento en la evaluación de accidentes mayores pueden subdividirse en dos grupos fundamentalmente:

- Métodos cualitativos

Análisis histórico de accidentes. AHA.

Listas de comprobación. Check lists

Análisis preliminar de riesgos. Preliminary Hazard Analysis. PHA.

Análisis (¿Qué pasa si ...?). What If ...?

Análisis funcional de operatividad. HAZOP.

Análisis del modo y efecto de los fallos. FMEA.

Análisis del modo, efecto y criticidad de los fallos. FMEAC.

- Métodos semicuantitativos o cuantitativos

Índice *DOW* de fuego y explosión.

Índice *Mond*.

Union des Chambres Syndicales de L'Industries du Pétrole. UCSIP.

Árboles de Fallos.

Árboles de Sucesos.

Análisis causa-consecuencia.

En 2008, Gabarrell plantea que los métodos de análisis cualitativos son los que tienen como objetivo identificar riesgos, causas y efectos sin recurrir al análisis numérico. Los métodos de evaluación semicuantitativos o cuantitativos a consideración de diferentes autores son aquellos que, no llegando al detalle y rigor de una evaluación cuantitativa del riesgo, suponen un avance hacia ello desde los métodos cualitativos, en el sentido que son métodos que dan como resultado una clasificación relativa del riesgo asociado a una planta química o a partes de la misma.

Según Casal *et al.* (2001) existen cinco limitaciones inherentes a todas las técnicas de identificación de riesgos las cuales quedan definidas por:

- La exhaustividad del estudio: no hay posibilidad de verificar que todas las posibles desviaciones y fallos del sistema hayan sido identificados. No puede verificarse que todas las causas y efectos de los accidentes potenciales hayan sido considerados. No puede asegurarse que la valoración de los incidentes y sucesos identificados sea la más conveniente.
- La reproducibilidad de los resultados: el mismo estudio llevado a cabo en idénticas condiciones por diferentes especialistas da resultados distintos. La carga subjetiva de los estudios hace que éstos sean difícilmente reproducibles.
- La confusión de las conclusiones: la cantidad de documentación generada por el estudio y la falta de detalles importantes que sólo se materializan en la comunicación verbal de las sesiones de trabajo, hacen los análisis relativamente difíciles de interpretar.
- La importancia de la experiencia: todas las técnicas que se presentan, desde las listas de control hasta el análisis *HAZOP*, están basadas en mayor o menor grado en la experiencia adquirida y en la creatividad del analista.
- El nivel de confianza generado por el estudio: la subjetividad introducida en la valoración de los sucesos identificados puede generar cierto escepticismo respecto a los resultados del estudio.

Pese a las limitaciones aparentes de estas técnicas de análisis, debe señalarse su versatilidad y su amplia utilización. En realidad, la experiencia demuestra que, en una gestión del riesgo

adecuada, basada siempre en la identificación correcta el número de accidentes tiende a disminuir paralelamente a la disminución de la magnitud de sus consecuencias.

- Análisis Histórico de Accidentes

Carol (2001) y Casal *et al.* (2001) señalan que el análisis histórico de accidentes es una técnica identificativa orientada a la búsqueda de información de accidentes industriales ocurridos en el pasado. Esta técnica de análisis es esencialmente cualitativa pero también permite extraer resultados numéricos o cuantitativos si el número de accidentes es suficientemente significativo y permite un análisis estadístico.

La técnica se basa en una recopilación de accidentes con productos químicos en forma de banco de datos donde se encuentra almacenada la información relativa a los mismos. La recogida sistemática de información relativa a diferentes accidentes ocurridos en el pasado en plantas químicas y actividades afines ha permitido, en algunos casos, la acumulación de datos concretos sobre una determinada situación, equipo u operación: carga o descarga de cisternas, transporte de mercancías peligrosas, procesos de fabricación de un producto determinado, parques de almacenamiento, vertido de líquidos inflamables, escape de un gas tóxico, entre otras (Casal *et al.*, 2001 y Guillén, 2020).

Los accidentes ocurridos en el pasado constituyen un conjunto de datos experimentales, obtenidos a menudo a un precio muy elevado, relativos a un campo en el que resulta casi imposible la experimentación a escala real: explosiones de todo tipo, confinadas y no confinadas, de polvo, de gas, BLEVE, incendios, formación de nubes tóxicas, entre otras. El conocimiento exacto de las condiciones en que se ha producido un accidente determinado y sus consecuencias permite contrastar y validar los modelos teóricos de predicción de efectos de este tipo de accidentes. Sin esta información, estos modelos únicamente se pueden contrastar, en el mejor de los casos, con la experimentación a pequeña escala, actualmente desarrollada en pocos centros de investigación. La recogida de información debe efectuarse de forma sistemática, teniendo especificado con claridad qué datos deben registrarse y con qué nivel de detalle. Entre los bancos de datos actuales más importantes se destacan los siguientes: *MHIDAS*, *FACTS*, *AICHE*, *OREDA*, *WOAD*, *MARS* y *SONATA*, cada uno complementado con miles de accidentes de todo el mundo y con la descripción necesaria y suficiente para el análisis de riesgos (Hernández, 2017).

Las principales limitaciones del Análisis Histórico de Accidentes son:

- La instalación objeto de estudio no es exactamente igual a las que ya han sufrido accidentes.
- La información de los accidentes suele ser incompleta y en muchas ocasiones, inexacta o de uso restringido.

- No da información sobre todos los accidentes posibles sino únicamente sobre los que han sucedido y se han documentado hasta la fecha.
- El acceso a los bancos de datos implica un cierto costo.

- Listas de Comprobación

Son listas de fácil aplicación y pueden ser utilizadas en cualquier fase de un proyecto o modificación de una planta. Es una manera adecuada de evaluar el nivel mínimo aceptable de riesgo de un determinado proyecto; evaluación necesaria en cualquier trabajo independientemente de sus características. Muchas organizaciones utilizan las listas de inspección estandarizadas para seguimiento y control de las diferentes fases de un proyecto. Las listas de inspección deben ser preparadas por personas de gran experiencia. Es necesario disponer de las normas o *standares* de referencia, así como de un conocimiento del sistema o planta a analizar. Pueden ser puestas en práctica por un titulado sin gran experiencia, aunque los resultados deben ser supervisados por alguien con vasta experiencia. Los resultados son siempre cualitativos, pero suelen limitarse al cumplimiento o no de las normas de referencia. Constituye una buena base de partida para complementarlo con otros métodos de identificación que tienen un alcance superior por los reglamentos e instrucciones técnicas. Posee la gran desventaja de que examina la instalación solamente desde el punto de vista de cumplimiento de un reglamento o procedimiento determinado (Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2016).

- Análisis Preliminar de Riesgos

López (2006) y la Dirección General de Protección Civil y Emergencias (2016) exponen que este método fue desarrollado inicialmente por el Ejército de los Estados Unidos de América e incorporado posteriormente bajo diferentes nombres por algunas compañías químicas. Fue el precursor de otros métodos de análisis más complejos y es utilizado únicamente en la fase de desarrollo de las instalaciones y para casos en los que no existen experiencias anteriores, sea del proceso, sea del tipo de implantación. Su objetivo principal es la identificación de peligros, los sucesos iniciadores y otros sucesos que provoquen consecuencias indeseables. Pueden identificarse, asimismo criterios de diseño o alternativas que contribuyan a eliminar o reducir estos peligros o riesgos. Para su desarrollo debe disponerse de los criterios básicos de diseño de la planta, de especificaciones básicas de equipos principales y de especificaciones de materiales. Se puede considerar como una revisión de los puntos en los que pueda ser liberada energía de una forma incontrolada. Fundamentalmente, consiste en formular una lista de estos puntos con los peligros ligados a:

- Materias primas, productos intermedios o finales y su reactividad.

- Equipos de planta.
- Límites entre componentes de los sistemas.
- Entorno de los procesos.
- Operaciones (pruebas, mantenimiento, puesta en marcha, paradas, y otros).
- Instalaciones.
- Equipos de seguridad.

Los resultados de este análisis incluyen recomendaciones para reducir o eliminar estos peligros, estos deben ser registrados de forma que se vea claramente los peligros identificados, la causa, la consecuencia potencial y las diferentes medidas preventivas o correctivas. Este método requiere relativamente poca inversión en su realización, puede ser realizado por solamente dos técnicos no necesariamente expertos en la materia por lo que es adecuado para examinar los proyectos de creación de nuevas capacidades o de ampliación de capacidades ya existentes. En instalaciones existentes no es un método adecuado para entrar en el detalle de los riesgos asociados a las mismas.

- Análisis *What if...?*

En 2016, Sánchez expone que es un método de análisis no muy estructurado y necesita la adaptación por parte del usuario al caso particular que se pretende analizar. Consiste tal como su nombre lo indica en cuestionarse el resultado acerca de qué sucedería en caso de presencia de sucesos indeseables que puedan provocar consecuencias adversas. El método exige el planteamiento de las posibles desviaciones desde el diseño, construcción, modificaciones de operación de una determinada instalación. Evidentemente, requiere un conocimiento básico del sistema y la disposición mental para combinar o sintetizar las desviaciones posibles ya comentadas, por lo que normalmente es necesaria la presencia de personal con amplia experiencia para poder llevarlo a cabo. Tiene un ámbito de aplicación amplio ya que depende del planteamiento de las preguntas que pueden ser relativas a cualquiera de las áreas que se proponga la investigación como: seguridad eléctrica, protección contra incendios, seguridad personal, entre otras. Las preguntas se formulan en función de la experiencia previa y se aplican, tanto a proyectos de instalación, como a plantas en operación, siendo muy común su aplicación ante cambios propuestos en instalaciones existentes. Normalmente las cuestiones se formulan por un equipo de dos o tres personas especialistas en las áreas apuntadas, los cuales necesitan documentación detallada de la planta, del proceso, de los procedimientos y posibles entrevistas con personal de operación. El resultado del trabajo será un listado de posibles escenarios incidentales, sus consecuencias y las posibles soluciones para la reducción del riesgo.

- Análisis de Peligro y Operatividad

Casal *et al.* (2001) y NSW (2011) revelan que la técnica *HAZOP* fue desarrollada en el Reino Unido en 1963, por la compañía *Imperial Chemical Industries* en el estudio de procesos químicos. De todas las metodologías, el *HAZOP* es el método más completo y riguroso por lo que es generalmente la técnica preferida por las empresas, pero la técnica sólo empezó a ser empleada más ampliamente en la industria de procesos químicos después del desastre de *Flixborough* en el que una explosión en una planta química mató a 28 personas, muchas de las cuales eran simples dueñas de casas que vivían en las cercanías. Empleando un intercambio general de ideas y personal, el sistema fue adoptado luego por la industria del petróleo, que tiene un potencial similar de grandes desastres. A ello siguieron las industrias de alimentos y agua, en donde el potencial de riesgo es igualmente grande, pero de una naturaleza diferente, teniendo los problemas más que ver con la contaminación que explosiones o liberación de substancias químicas perjudiciales. Por ejemplo, en Chile esta técnica ha sido frecuentemente utilizada por la industria minera, particularmente en aquellas instalaciones que, por su gran amplitud, cualquier interrupción o accidente puede tener consecuencias fatales o de gran envergadura tanto para el medio ambiente como la integridad económica del dueño de las instalaciones. Empresas como *Codelco Chile* han incorporado dentro de su normativa para el desarrollo de proyectos, el requerimiento de aplicar diferentes técnicas de análisis de riesgos operacionales, entre ellas el estudio *HAZOP*, de acuerdo con el grado de avance de cada proyecto.

Es una técnica de identificación de riesgos inductiva basada en la premisa de que los accidentes se producen como consecuencia de una desviación de las variables de proceso con respecto de los parámetros normales de operación en un sistema dado y en una etapa determinada. La característica principal del método es que es realizado por un equipo multidisciplinario de trabajo. El *HAZOP* consiste en hacer una descripción a detalle del proceso cuestionándose cada una de las partes del mismo para identificar qué desviaciones pudieran existir en el propósito para el cual cada una de las operaciones fue planeada y así poder identificar cuáles son las posibles consecuencias, planteadas a través de palabras guía.

Sánchez (2016) señalan que el estudio *HAZOP* se basa en analizar en forma metódica y sistemática el proceso, la operación, la ubicación de los equipos y del personal en las instalaciones, la acción humana (de rutina o no) y los factores externos, revelando las situaciones riesgosas. Se enfoca en determinar cómo un proceso puede apartarse de sus condiciones de diseño y sus condiciones normales de operación, planteando las posibles desviaciones que pudieran ocurrir. Una vez identificada una desviación, se hace una evaluación en cuanto a que si sus consecuencias pueden producir un efecto negativo sobre el funcionamiento seguro y eficiente de la planta. En caso necesario, se recomiendan medidas

para eliminar la causa que produce la desviación o para mitigar las consecuencias de su materialización.

Para simplificar el estudio de *HAZOP* conviene subdividir un proceso grande y complejo en tantas piezas pequeñas como sea requerido para el análisis. Para ello el facilitador prepara, previo a las reuniones del grupo, la división de los diagramas de tuberías e instrumentación (Rausand, 2015).

Teóricamente el resultado de *HAZOP* es independiente de cómo se hayan seleccionado los nodos, pero en la práctica se observa que una incorrecta selección de los mismos, impacta negativamente en el resultado del estudio. Después de que el facilitador determina los nodos que se van a estudiar se reúne al grupo para comenzar el trabajo de equipo, *HAZOP* será el encargado de registrar toda la información que se va generando en un reporte de trabajo.

Los participantes proponen para cada desviación las posibles causas que la pudieran originar; existen tres tipos de causas: error humano, falla del equipamiento y eventos externos. Para cada causa planteada, se determinan las consecuencias derivadas y las salvaguardas existentes en la instalación, ya sea para evitar la ocurrencia de dicho evento o para mitigar su efecto. Las consecuencias encontradas se categorizan, asignándoles valores de riesgo en función de la probabilidad y severidad que el equipo determina para dicho evento. El grupo decide, entre todos los valores disponibles de probabilidad y severidad que se encuentran en la matriz de clasificación de riesgos, cuáles asignará a dicha consecuencia y por consiguiente surge la tabla de riesgos de la misma (Juárez, 2014).

El objetivo del *HAZOP* es identificar los riesgos y dejarlos documentados, no resolver todos los problemas que aparecen. No debe emplearse demasiado tiempo buscando la solución a cada problema ya que se multiplicaría la duración del *HAZOP* perdiéndose el objetivo del estudio. Posterior a éste se debe encontrar la mejor solución a cada problema detectado (Casal *et al.*, 2001).

- Análisis del Modo y Efecto de los Fallos. *FMEA*

Según Juárez (2014) el método consiste en la elaboración de tablas o listas con las posibles fallas de componentes individuales, los modos, la detección y los efectos de cada falla. Una falla se puede identificar como una función anormal de un componente, una función fuera del rango del componente, función prematura. Las fallas que se pueden considerar son situaciones de anormalidad tales como:

- Abierto, cuando normalmente debería estar cerrado.
- Cerrado, cuando normalmente debería estar abierto.
- Marcha, cuando normalmente debería estar parado.
- Fugas, cuando normalmente deba ser estanco.

Los efectos son el resultado de la consideración de cada uno de las fallas identificadas individualmente sobre el conjunto de los sistemas de la planta o instalación. El método *FMEA* establece finalmente que las fallas individuales pueden afectar directamente o contribuir de una forma destacada al desarrollo de accidentes de una cierta importancia en la planta. Es un método válido en las etapas de diseño, construcción y operación y se usa habitualmente como fase previa a la elaboración de árboles de fallas, ya que permite un buen conocimiento del sistema.

El equipo necesario suele ser de dos personas perfectamente conocedoras de las funciones de cada equipo o sistema, así como de la influencia de estas funciones en el resto de la línea de proceso. Es necesario para la correcta ejecución del método disponer de listas de equipos y sistemas, conocimiento de las funciones de cada equipo, junto al conocimiento de las funciones de los sistemas en su conjunto dentro de la planta.

Es posible incluir en la última columna de la tabla de trabajo lo que se denomina índice de gravedad, que representa mediante una escala del 1 al 4 un valor que describe la gravedad de los posibles efectos detectados; el valor 1 representaría un suceso sin efectos adversos; 2, efectos que no requieren parada del sistema; 3, riesgos de cierta importancia que requieran parada normal y 4, peligro inmediato para el personal e instalaciones, por lo que se requiere parada de emergencia. En este caso, el análisis se denomina Análisis del Modo de Fallas, y Efectos Críticos, *FMEAC*.

- Índices *Mond* y *Dow*

El Índice *Mond* (Imperial Chemical Industries, ICI), se basa en un factor de material, y en la cantidad presente para formular el peor caso posible (*Worst Case*) y la asignación de penalizaciones y/o bonificaciones a diferentes áreas e instalaciones de una planta química. Las penalizaciones son asignadas en función de las sustancias presentes y las condiciones de proceso. Dichas bonificaciones tienen en cuenta los tipos de control del proceso y las instalaciones de seguridad que pueden mitigar o prevenir efectos adversos a la operación de la instalación.

Esta metodología encuentra su empleo como método de clasificación previa, especialmente en grandes unidades o complejos, lo que permite identificar y clasificar las áreas con mayor riesgo potencial, a las que se deben aplicar otro tipo los de mayor interés tomando en cuenta los escenarios de incidentes más recurrentes y sus efectos, de una manera objetiva y práctica. Asimismo, genera las bases para la etapa posterior de evaluación de consecuencias con métodos convencionales (Arencibia,2018)

El índice *Dow* de incendio y explosión, se utiliza ampliamente en la industria química, debido a que permite realizar una estimación algo más fácil de visualizar por el uso preferente de gráficas

frente a ecuaciones logrando con esto, contabilizar riesgos intrínsecos del material, las cantidades manejadas, cantidades de operación y en la más reciente edición tiene en cuenta, si bien de manera marginal, aspectos de toxicidad, con la inclusión de una penalización específica (Hernández, 2017).

Su principal ventaja es que intenta cuantificar anticipadamente daños potenciales por incendio y explosión y permite tener una reducción de riesgos potenciales a una valoración económica que permite jerarquizar decisiones (Juárez, 2014).

Las principales semejanzas entre ambos índices es que proporcionan un método directo y relativamente simple de estimar el riesgo global asociado con una unidad de proceso, así como jerarquizar las unidades en cuanto al nivel de riesgo. Además, proporcionan un valor numérico que permite identificar áreas en las que el riesgo potencial alcanza un nivel determinado.

Las principales diferencias frente al Índice *DOW* es que en el Índice *Mond* se considera la toxicidad de las sustancias presentes como un factor independiente y su efecto en contacto con el ser humano y por lo tanto da una aproximación a sus efectos ambientales, pero no calcula radios de afectación o pérdidas de activo fijo como su similar, el índice *DOW*.

- Árbol de Fallos

El análisis mediante árboles de fallos según señalan Casal *et al.* (2001) y Carol (2001) es una técnica cuantitativa que permite estimar la probabilidad de ocurrencia de un fallo determinado a partir del conocimiento de la frecuencia de ocurrencia de los sucesos iniciadores y causales mediante la utilización de procesos lógicos inductivos y la confección de una secuencia lógica de sucesos.

Hernández (2017) añade que el árbol de fallos es una técnica que se enfoca en un incidente en particular, a menudo llamado evento inicial, y entonces se construye un diagrama de sucesiones lógicas de todas las secuencias de eventos concebibles que puede llevar a ese incidente.

El primer paso para la elaboración de un árbol de fallos es un estudio previo del sistema o proceso que se quiere analizar con el fin de determinar los incidentes susceptibles de ser analizados. Una vez determinados los accidentes que se quieren analizar, deben establecerse los límites de la instalación. Seguidamente, es necesario identificar los fallos de los elementos y las relaciones lógicas que conducen al accidente. El proceso finaliza cuando todos los fallos identificados son primarios y no es posible determinar sus causas (Casal *et al.*, 2002 y Gullick *et:al.*, 2019).

La elaboración de árboles de fallos requiere una elevada formación técnica, junto con un conocimiento detallado del sistema o proceso y de sus modos de fallo. Además, se requiere que por lo menos la información sobre el proceso sea completa en las partes más esenciales. El

nivel de detalle de la información disponible condiciona el nivel de detalle del análisis (NASA, 2002 y Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2016)

Según Boza (2020) la limitación principal de la metodología es que únicamente se pueden representar fallos totales, es decir, siempre se considera el fallo completo del elemento involucrado en la cadena de sucesos que conduce al accidente y representan fotografías instantáneas del proceso. Además, para su análisis y desarrollo se requiere de mucho tiempo y personal especializado con un conocimiento completo de la planta. Señala que genera recomendaciones de mejoras muy concretas y que muestra un modelo gráfico en forma de árbol invertido que ilustra la combinación lógica de fallos parciales que conducen al fallo de sistema.

- Árbol de Sucesos

Nolan (2011) describe el Árbol de Sucesos como un modelo lógico que matemática y gráficamente retrata la combinación de eventos de fallo y circunstancias en una sucesión de incidentes, expresado como una estimación anual.

Hernández (2017) y Boza (2020) señalan que los Árboles de Sucesos son la mejor herramienta para el análisis de consecuencias. Son usados para realizar un análisis probabilístico. Se organiza mediante una estructura de árbol en la que cada bifurcación se decide a partir de la ocurrencia de un fenómeno u otro.

La construcción del árbol comienza por la identificación de los n factores condicionantes de la evolución del suceso iniciador. A continuación, se colocan estos como cabezales de la estructura gráfica. Partiendo del iniciador se plantean sistemáticamente dos bifurcaciones: en la parte superior se refleja el éxito o la ocurrencia del suceso condicionante y en la parte inferior se representa el fallo o no ocurrencia del mismo. De esta forma, se obtienen $2n$ combinaciones o secuencias teóricas. Sin embargo, las dependencias entre los sucesos hacen que la ocurrencia o éxito de uno de ellos pueda eliminar la posibilidad de otros, reduciéndose así el número total de secuencias. La disposición horizontal de los cabezales se suele hacer por orden cronológico de evolución del accidente (Wells, 2003 y Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2016).

Wells (2003) establece los siguientes pasos para el análisis de Árboles de Sucesos:

1. Identificar el evento iniciador que generalmente es un evento de fallo correspondiente al escape de un material peligroso.
2. Identificar el desarrollo del incidente.
3. Construir el árbol de eventos. Este es construido de izquierda a derecha, en cada nodo se muestran las alternativas analizadas.
4. Clasificar los resultados del incidente.

5. Estimar la posibilidad de ocurrencia de cada suceso.
6. Clasificar los resultados y determinar su probabilidad.

Hernández (2017) afirma que, a partir de los estudios de los registros históricos de accidentes realizados por Wells, (2003) éste define las probabilidades de ocurrencia de sucesos tales como: la aparición de un escape, la posibilidad de una ignición inmediata, el tipo de clima, la explosión de la nube de vapor, la intrusión de una llama y las acciones de mitigación. Algunas de las probabilidades son:

- Probabilidad de ignición inmediata produciendo un dardo de fuego: 0,1
- Probabilidad de que no ocurra ignición inmediata: 0,9
- Probabilidad de explosión de la nube de vapor con estabilidad atmosférica D: 0,25
- Probabilidad de explosión de la nube de vapor con estabilidad atmosférica F: 0,66
- Probabilidad de la BLEVE: 0,5
- Probabilidad de piscina de fuego (ignorada para caso de gas): 0

Santos (2010) define una escala capaz de clasificar las probabilidades de ocurrencia de sucesos atendiendo a su frecuencia según se muestra en la tabla 1.2:

Tabla 1.2: Escala de probabilidad cuantitativa y cualitativa.

Frecuencia	Escala de probabilidad
1 en 10	Frecuente
1 en 100	Probable
1 en 1 000	Ocasional
1 en 10 000	Remoto
1 en 100 000	Improbable
1 en 1 000 000	Extremadamente remota

Fuente: Santos (2010).

En 2003, Wells señala que la probabilidad, para los diferentes sucesos, por él calculada pueden ser usadas para plantas similares y que en el caso de las estabildades atmosféricas su cálculo depende de las condiciones climatológicas de la zona de estudio. De ahí que la autora de este trabajo considera que estas probabilidades deben ser calculadas para la zona de estudio a partir de datos climatológicos que sean representativos de la misma.

Autores como Casal *et al.* (2002) y Wells (2003) le atribuyen ventajas a esta técnica muy similares a las de los árboles de fallos y entre sus limitaciones principales citan:

- La laboriosidad del trabajo si el árbol llegara a proyectarse muy extenso.
- La incertidumbre a la cual está asociado el valor obtenido por el hecho de estar atado a probabilidades.

1.4 Evaluación de atmósferas peligrosas. Softwares más utilizados

- ALOHA

El software *ALOHA* de sus siglas *Areal Locations of Hazardous Atmospheres*, permite definir las áreas de atmósferas peligrosas para diferentes tipos de escenarios de accidentes, información con la cual pueden ser confeccionados los planes de emergencia para la propia industria y para los ciudadanos (Manual de usuario del software *ALOHA*, 2007)

Según Dueñas (2018) *ALOHA* puede auxiliar en la planificación y entrenamiento en situaciones de emergencia, con capacidad para evaluar los peligros de liberación de sustancias tóxicas e inflamables, donde se estima la distancia a que una determinada concentración de interés puede alcanzar en función del escenario accidental y también estima la radiación térmica en los casos de incendio y explosiones. Puede predecir también las tasas a las cuales los vapores químicos pueden escapar a la atmósfera desde tuberías de gas rotas, fugas de tanques, y charcos de evaporación. Predice además como una nube de gas peligrosa puede dispersarse en la atmósfera después de una descarga química accidental.

Está diseñado para que pueda usarse fácilmente, de modo que pueda operarse exitosamente durante situaciones de alta presión. Su biblioteca química posee información sobre las propiedades físicas acerca de más de novecientos compuestos químicos peligrosos de uso común para la industria.

Para su uso prácticamente se siguen los siguientes pasos:

- Indicar la ciudad donde está ocurriendo una descarga accidental y la hora y la fecha del accidente.
- Elegir el producto químico de interés de la biblioteca de información del Software.
- Introducir información sobre las condiciones meteorológicas actuales.
- Describir en qué forma el producto escapa del contenedor.
- Pedir a *ALOHA* que presente una huella, en la que se muestre la zona donde las concentraciones químicas en el aire pueden llegar a ser lo suficientemente altas como para presentar un riesgo para las personas.

Este Software está certificado por el CITMA para obtener la dispersión de los contaminantes en la atmósfera y determinar su posible área de alcance. Entre sus limitaciones principales se encuentran las siguientes:

- No modela mezclas de componentes, por lo que se busca siempre una sustancia de referencia que se ajuste a las características de dicha mezcla.
 - No tiene en cuenta las partículas, las particularidades del terreno ni los fragmentos peligrosos.
 - No incorpora reacciones químicas.
-
- *DEGADIS. Dense Gas Dispersion Model*

Según Castro *et al.* (2013) y Guillén (2020) fue originalmente desarrollado para los Guardacostas de USA y el Instituto de Investigación del Gas primordialmente para la simulación de la dispersión de gases criogénicos inflamables. La implementación de DEGADIS en una computadora personal se patrocinó por el Instituto de Investigación del Gas y el Instituto Americano Del Petróleo, donde actualmente se usa con veracidad.

- Software DISPER 5.2

DISPER 5.2 es un software que permite evaluar de una manera rápida y sencilla la dispersión de cualquier contaminante atmosférico como, por ejemplo: NO_x, CO, NO, sulfatos, etc. Este software genera mapas de concentración de un contaminante en planos a la altura deseada y al nivel del terreno. DISPER 5.2 es un modelo que permite incluir diferentes fuentes fijas y tiene la capacidad de predecir concentraciones de contaminantes para períodos de tiempo mayores a una hora, e inclusive, de predecir la concentración anual de un determinado contaminante (Avilés y Rivera, 2018).

Existen además otros programas informáticos cuyo objetivo es la evaluación de atmósferas peligrosas entre los que se pueden citar a CALPUFF, CALMET y Stoffenmanager.

1.4.1 Peligros que presentan los tanques de almacenamiento de petróleo

El diseño y las consideraciones de seguridad han llegado a ser uno de los asuntos más delicados debido al incremento de casos de incendios y explosiones que se han presentado en los últimos tiempos relacionados con tanques de almacenamiento. Los derrames e incendios de tanques no solo ocasionan lesiones, muertes y contaminación ambiental, sino que también pueden tener severas consecuencias a nivel financiero y un impacto significativo sobre futuros negocios ya que la reputación de la industria o empresa se ve afectada (Parrales, 2011).

En 2018, Arencibia plantea que, con la aplicación de nuevas tecnologías en la construcción de tanques, se ha logrado reducir en gran medida la probabilidad de incendio en los contenedores de líquidos; como el petróleo y sus derivados. Cuando un tanque es construido e instalado debidamente, la posibilidad de incendio es casi nula.

En Cuba la norma vigente para la protección contra incendios para las bases de almacenamiento de petróleo y sus derivados es la 96-02-18:87. Esta norma se aplica a los proyectos de nuevas obras, así como reconstrucción, aplicación o remodelación de las bases existentes. Además, podrá aplicarse en los proyectos, reconstrucción, aplicación o remodelación de bases de almacenamiento para otros líquidos inflamables y combustibles cuyas propiedades sean similares a las del petróleo y sus derivados desde el punto de vista de explosión o incendios.

Para proteger al tanque contra incendio y explosión, es importante proporcionar aparatos para controlar el fuego, adoptar métodos de diseño y construcción, medidas preventivas, así como también métodos de acción en caso de que se presenten dichos accidentes. Entre ellas están que, donde se utilicen instalaciones estacionarias de extinción de incendios automáticas y manuales, se proyectarán estaciones de bombeo generales y una red de tubería para el suministro de creador o solución de espuma. Para la extinción en tanques soterrados con capacidad igual o mayor que 5 000 m³ se instalarán sistemas automáticos de detección de incendios que permitan la detección y señalización al surgir el mismo. Los tanques superficiales con más de 10 m de altura se equiparán con instalaciones estacionarias de enfriamiento por medio de anillos ubicados en la parte superior del tanque.

1.5 Método para la determinación de afectaciones humanas. Ecuaciones *Probit*

Domínguez (2014) y Hernández (2017) destacan que los modelos de vulnerabilidad sirven para determinar las consecuencias a las personas y edificios expuestos a una determinada carga térmica, tóxica o de sobrepresión. Estos modelos se basan en experiencias realizadas con animales en laboratorio o en estudios de las muertes o lesiones de accidentes ocurridos.

Entre los modelos de vulnerabilidad se destaca el método *Probit*, que es un método estadístico que nos da una relación entre la función de probabilidad y una determinada carga de exposición a un riesgo.

El valor *Probit* permite determinar el porcentaje de la población expuesta que se verá afectada a un determinado nivel de lesiones o por muerte a causa de una carga de exposición determinada, dichos valores se encuentran tabulados como parte indispensable de aplicación del método.

1.5 Conclusiones parciales del capítulo 1

1. El gas natural del petróleo, el sulfuro de hidrógeno y la nafta presentan características y propiedades significativas, por lo que se consideran sustancias meritorias de análisis de riesgos.
2. Los escenarios de riesgos más probables en Plantas de Procesamiento de Crudo son: nubes de vapor inflamables y tóxicas, *Jet Fires*, *Flash Fires*, *Pool Fire*, *BLEVE* y *boil over* de capa gruesa.
3. El Software más adecuado para la evaluación de atmósferas peligrosas es *ALOHA*.
4. Se utiliza el Índice de *Mond* para medir el nivel de riesgo de accidente tóxico ya que la instalación presenta sustancias tóxicas y en general, este índice es más detallado que el

IFE de *Dow*, tiene en cuenta mayor número de parámetros de riesgo y bonificaciones y además facilita una clasificación de unidades en función del riesgo.

5. Las ecuaciones *Probit* son adecuadas y relativamente sencillas para determinar las posibles afectaciones humanas ante accidentes mayores.

Capítulo 2: Materiales y métodos

Es indispensable para aplicar cualquier técnica de análisis de riesgo, el conocimiento detallado del proceso que se estudia. Por esta razón, en este capítulo se ofrece una descripción del proceso tecnológico de producción de petróleo en la EPEP-Centro. Además, se muestra la metodología de la técnica que se aplicará, como resultado del análisis bibliográfico previamente realizado.

2.1 Descripción del proceso tecnológico de producción de petróleo en la EPEP-Centro

La planta de procesamiento de crudo tiene por objetivo la aplicación de un tratamiento termoquímico en tanques separadores dinámicos al crudo proveniente de los pozos en producción, de forma tal que se alcancen los índices de calidad requeridos para posteriormente enviarlos por el Oleoducto Magistral hacia la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas. En el anexo 1 se muestra la disposición de la planta.

Antes de la entrada a la Planta de Procesamiento de Crudo (PPC) al petróleo se le adiciona nafta, utilizada como sustancia reductora de viscosidad, para garantizar una mejor transportación del crudo por el oleoducto. El petróleo contiene una serie de impurezas que es necesario eliminar hasta alcanzar los límites establecidos, dentro de ellas el agua, donde se aplica el Tratamiento Termoquímico en etapas posteriores, con la aplicación de una sustancia desemulsionante para neutralizar la acción de las emulsiones y separar el agua del petróleo.

El crudo se recibe desde los centros colectores y/o desde los pozos aislados a través de los camiones cisternas hacia las Piscinas de Recepción de una capacidad de 120 m³ comunicadas entre sí.

Al crudo se le incrementa la temperatura desde la temperatura ambiente con la que llega hasta un máximo de 85 °C por medio de unos intercambiadores en espiral. Este proceso de calentamiento garantiza una mejor separación de gas en tanque 6.

El petróleo pasa al tanque 6. El gas separado es vendido a ENERGAS que lo utiliza, después de hacer los tratamientos pertinentes, para la generación de energía eléctrica.

Una vez en Tanque 6, se separa la mayor parte de gas. Dicho tanque, consta con un sistema de calentamiento por serpentines de vapor para calentar el crudo y de una columna desgasificadora central en su interior por la que entra el crudo.

El crudo es bombeado del tanque 6 a los tanques de tratamiento estáticos de, 5 000 m³ (tanques 15 y 16), 10 000 m³ (tanque 7 y 8) y 20 000 m³ (tanque 14), según el tanque en que se esté realizando el tratamiento por condiciones del proceso. Para comenzar el calentamiento es necesario que el nivel de petróleo sobrepase el nivel de los serpentines, entonces se suministra

vapor a través de los serpentines para calentar el crudo hasta alcanzar temperaturas entre 75 - 90 °C.

El agua libre, conjuntamente con el agua liberada producto de la ruptura de la emulsión agua-petróleo, sufre un proceso de decantación durante el llenado de los tanques que se completa durante el reposo de los mismos hasta alcanzar el 2 % de BSW (parámetro requerido para la comercialización). Esa agua, depositada en el fondo de los tanques, es drenada por gravedad hacia el sistema de residuales de la instalación y comienza el trasiego del petróleo hacia la Estación Cabecera del Oleoducto (ECO).

En la ECO el crudo se almacena en los tanques de una capacidad 5 000 m³ (tanques 101, 102, 103 y 104). Este es bombeado con las Bombas Booster hacia el colector de succión de las Bombas Magistrales a través de unos intercambiadores de calor de tubos y coraza de titanio donde se calienta a 90 °C y posteriormente corrige la viscosidad del crudo hasta 1 500 mm²/s (valor pactado para la venta) añadiendo nafta a la corriente principal de flujo. Las bombas magistrales a su vez impulsan el petróleo a través de oleoducto hasta la Estación de Rebombeo del Oleoducto Varadero-Matanzas (EROVM) o hasta la UEB División de Comercialización de Combustibles de Matanzas (DTCCM), en caso de que por algún motivo sea necesario sacar de servicio la EROVM.

2.1.1 Descripción del caso estudio

El presente trabajo se realiza en el área de tratamiento, el cual posee un tanque de 2 000 m³ (6), dos tanques de 10 000 m³ (7 y 8), dos de 5 000 m³ (15 y 16, que operan en paralelo) y uno de 20 000 m³ (14). Esta etapa tiene como objetivo alcanzar un porcentaje de agua y sedimentos (BSW) menor o igual al 2 %, el petróleo debe de cumplir este parámetro para su posterior venta. Para comenzar el calentamiento es necesario que el nivel de petróleo sobrepase el nivel de los serpentines, entonces se suministra vapor a través de los serpentines para calentar el crudo hasta alcanzar temperaturas entre 85 - 90 °C. Cuando el crudo alcanza esta temperatura, aunque no se haya alcanzado el volumen máximo de llenado del tanque, se regula el vapor o se cierra totalmente, para lograr una temperatura superior a los 80 °C al término del llenado.

El agua libre, conjuntamente con el agua liberada producto de la ruptura de la emulsión agua-petróleo, sufre un proceso de decantación durante el llenado del tanque que se completa durante el reposo de los mismos. Esa agua depositada en el fondo del tanque es drenada por gravedad hacia el sistema de residuales de la instalación. Esta operación se realiza una vez concluido el llenado de los tanques o simultáneamente con el llenado una vez que se halla cerrado el vapor. Finaliza cuando comienza a observarse el enturbiamiento del agua, cuando el colchón de agua tenga la altura suficiente que se pueda realizar el trasiego hacia la ECO o

cuando por razones operacionales se decida por el Jefe de Turno o por el personal técnico de la Planta. Si después de esta operación ya el petróleo tiene las especificaciones requeridas, se detiene la misma.

Una vez que se da por concluido el llenado del tanque y que previamente se haya cerrado el vapor, este se deja en reposo hasta que alcance 2 % de BSW requerido para trasegarlo hacia la ECO, al término del llenado se toma una muestra de este ya sea en él toma muestra inferior, superior o ambos en dependencia de las condiciones y de las necesidades, a esta muestra se le realizan análisis para determinar el porcentaje de agua y sedimentos (BSW), la gravedad específica ($^{\circ}$ API) y viscosidad, durante el reposo se toman muestras cada 4 horas o cuando lo decida el Jefe de Turno y se realiza análisis de BSW hasta tanto se obtenga 2 %, una vez que el crudo alcanza este valor de BSW a esta muestra se le realizan los mismos análisis que en el llenado (Arencibia, 2018). Caracterización de la infraestructura del tanque de tratamiento de 10 000 m³.

2.2 Caracterización de las sustancias sujetas a análisis

Según Hernández (2017) la caracterización de las sustancias involucradas en un proceso se desarrolla mediante la siguiente guía:

Identificación del producto.

- Nombre del producto.
- Fórmula Química.
- Etiquetado de peligro (frases R y S) así como las que la identifican por otros efectos.

Datos Físicos.

- Apariencia.
- Punto de ebullición.
- Punto de fusión.
- Solubilidad.
- Densidad.
- TLV. Límite superior de inflamabilidad.
- IPVS. Límite inferior de explosividad.
- Punto de congelación.
- Temperatura de auto ignición.
- Coeficiente de expansión.
- Temperatura de inflamación.

- Biodegradabilidad.
- Corrosión.
- Capacidad calorífica.

Peligros para la salud.

- Concentración permisible.
- Exposición permisible.
- Emergencias.
- Partes del cuerpo que afecta.
- Forma de entrada al organismo.
- Toxicidad.

Tabla 2.1: Modelo para la clasificación toxicológica de las sustancias analizadas.

Sustancia	Toxicidad							
	Toxc. aguda	Irritación	Sensibilización	T. por dosis repetida	Mutagenicidad	Carcinogenic.	Corrosión	T. para la reproducción
	x		x				x	

Fuente: Orozco (2015).

Condiciones de almacenamiento y manipulación.

- Nombre del producto almacenado.
- Forma del recipiente (cilíndrico, rectangular, vertical, horizontal, etc.).
- Dimensiones del recipiente (largo, ancho, diámetro).
- Material de construcción.
- Protección del recipiente (interior o exterior).
- Existencia de accesorios en el recipiente y su localización.
- Fecha de fabricación del recipiente.
- Condiciones de almacenamiento de las sustancias.
- Cantidad de sustancia almacenada.
- Registro histórico de averías producidas en el recipiente. Casos de derrames, salideros, etc.
- Tipo de averías producidas.
- Condiciones de almacenamiento (presión, temperatura, etc.).
- Características de los alrededores del recipiente.

Condiciones para su uso en el proceso.

- Uso en el proceso.
- Condiciones en las que se usa la sustancia (presión, temperatura).
- Fallos ocurridos en estos equipos al operar con estas sustancias.
- Material de construcción de los equipos donde es usada.
- Protección del sistema de tuberías.

2.3 Descripción de las técnicas de análisis y evaluación a utilizar

En 2001, Casal *et al.* plantea que el primer paso en la metodología para realizar un análisis de riesgos químicos comienza con la caracterización de las sustancias peligrosas. La caracterización de las sustancias de interés se define en el acápite anterior según la metodología establecida para ello.

2.3.1 Metodología empleada para el cálculo del índice de *Mond*

Con el objeto de determinar cuáles son los factores más influyentes en la gravedad de los accidentes industriales con sustancias peligrosas y tener una imagen general de todas aquellas variables que afectan a sus probabilidades de ocurrencia (frecuencia), efectos y consecuencias, en el presente epígrafe se analizan las etapas o fases del índice de riesgo de *Mond* (Hendershot, D.C, 1996).

- Primera Fase: división de una planta en secciones.

Identificar las sustancias peligrosas presentes en la unidad. Considerar a la unidad en su forma más básica con el número mínimo de controles necesarios para su operación normal.

- Segunda Fase: listado de material para la sección.

Se obtiene una lista de las sustancias peligrosas, sus hojas de datos de seguridad, así como de las condiciones de operación y diseño.

- Tercera Fase: cálculo del Factor de Material (B).

1. Determinación del factor de material (B)

El Factor Material para materiales normalmente inflamable se define como el calor neto de combustión en aire a 25 °C del material clave en su estado normal (25 °C y a presión atmosférica) y se calcula según la ecuación siguiente:

$$B = \frac{\Delta H_c}{1\ 000} \quad (2.1)$$

Donde ΔH_c se expresa en *BTU/lb* de material clave.

$$\Delta H_{C(\text{crudo})} = 21\ 225\ \text{BTU/lb}$$

- Cuarta Fase: cálculo de factores de penalización del riesgo (ver anexos 2a, 2b, 2c, 2d y 2e).

Se consideran los factores que pueden agravar el riesgo ponderando cada una de las siguientes variables:

2. Riesgos especiales de los materiales (M)
3. Riesgos generales del proceso (P)
4. Riesgos especiales del proceso (S)
5. Riesgos asociados a las cantidades (Q)
6. Riesgos de implantación (L)
7. Riesgos graves para la salud (T)

Primeramente, se calculan los Riesgos Especiales del Material a través de la ecuación siguiente:

$$M = \sum \text{factores} \quad (2.2)$$

Los diferentes factores que componen este riesgo se pueden observar en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Riesgos Especiales de los Materiales (M):

Riesgos Especiales de los Materiales (M)	Rango	Factor
Productos oxidants	0 a 20	
Dar lugar a gas combustible	0 a 30	
Características de mezcla y dispersión (m)	-50 a 100	
Puede inflamarse espontáneamente	30 a 250	
Puede polimerizarse espontáneamente	25 a 75	
Sensibilidad a la ignición	-75 a 150	
Puede dar descomposición explosiva	75 a 125	
Puede dar lugar a detonación del gas	0 a 150	
Propiedades de la fase condensada	200 a 1 500	
Otros	0 a 150	
Factor de Riesgos Especiales del Material (M)		Σ (factores)

Fuente: Elaboración propia.

Los restantes Riesgos se calculan de la misma forma, o sea, como una sumatoria de todos los factores de penalización.

- Quinta fase: cálculo de Índices de Riesgo Potencial

Se calculan los índices de riesgo potencial que son los que subsisten en caso de fallar todas las medidas de prevención y protección y control y que se denominan:

8. Global Dow ICI (D)
9. Incendio (F)
10. Explosión (E)
11. Explosión no confinada (A)
12. Índice unitario de toxicidad (U)

13. Índice máximo incidente tóxico (C)

14. Factor Global de Riesgo (R)

- Cálculo del Índice Global Dow (D)

Los factores individuales incluidos en los diferentes rubros, se totalizan en varios subgrupos que después, se incluyen en el Índice Global DOW (D) que se calcula a través de la ecuación siguiente:

$$D = B \left(1 + \frac{M}{100}\right) \left(1 + \frac{P}{100}\right) \left[1 + \frac{S+L+Q}{100} + \frac{T}{400}\right] \quad (2.3)$$

Donde:

B= factor material

M= factor por Riesgos Especiales del Material

P= factor por Riesgos Generales del Proceso

S= factor por Riesgos Especiales del Proceso

Q= factor por Riesgos de Cantidad

L= factor por Riesgos de Implantación

T= factor por Riesgos de Toxicidad

Las descripciones del grado de riesgo global representado por el Índice Global DOW se estandarizan como se puede observar en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Grado de riesgo global representado por el Índice Global DOW/ICI

Rango del Índice Global DOW (D)	Grado Total de Riesgo
0 – 20	Suave
20 – 40	Ligero
40 – 60	Moderado
60 – 75	Moderadamente alto
75 – 90	Alto
90 – 115	Extremo
115 – 150	Muy extremo
150 – 200	Potencialmente catastrófico
+ 200	Catastrófico

Fuente: Elaboración propia.

- Cálculo de Potencial de Fuego (F)

Se considera útil estimar el potencial de fuego de la unidad porque esto da una indicación de la duración del fuego en el caso de un incidente. Para ello se usa la siguiente ecuación:

$$F = \frac{BK}{N} \left(20\,500 \text{ BTU} / \text{ft}^2\right) \quad (2.4)$$

Donde:

B= factor material

K= cantidad de material

N= área normal de trabajo

Se han dado también categorías para los valores de la cantidad de fuego (F) y se han identificado con duraciones de fuego usando datos y registros de incidentes como se muestra en la tabla 2.4

Tabla 2.4: Categorías para los valores de la cantidad de Fuego (F) del área normal de trabajo.

Cantidad de Fuego (F) del área normal de trabajo (BTU/ft ²)	Categoría	Rango de duración (fuego-horas)	Comentarios
0 – 50 000	Ligero	¼ – ½	
50 000 – 100 000	Bajo	½ – 1	Casas
100 000 – 200 000	Moderado	1 – 2	Fábricas
200 000 – 400 000	Alto	2 – 4	Fábricas
400 000 – 1 000 000	Muy alto	4 – 10	Edificios ocupados
1 000 000 – 2 000 000	Intenso	10 – 20	Bodegas de hule
2 000 000 – 5 000 000	Extremo	20 – 50	
5 000 000 – 10 000 000	Muy extremo	50-100	

Fuente: Elaboración propia.

- Cálculo de Potencial de Explosión (E)

En determinadas situaciones se observará que un nivel dado de categoría del Índice Global DOW/ICI, se acompañará por una cantidad de Fuego de menor categoría. Esto indica que se deben examinar variaciones en el Riesgo de Explosión. Se calcula un Índice E de explosión interna de la planta, como una medida del riesgo de explosión interior utilizando la ecuación:

$$E = 1 + \frac{M+P+S}{100} \quad (2.5)$$

Donde:

M= factor por Riesgos Especiales del Material

P= factor de Riesgos Generales de Proceso

S= factor de Riesgos especiales de Proceso

Tabla 2.5: Categorías para determinar el Índice de Explosión Interna de la Sección (E)

Índice de Explosión Interna de la Sección (E)	Categoría
0 – 1	Ligero
1 – 2,5	Bajo
2,5 – 4	Moderado
4 – 6	Alto
+6	Muy alto

Fuente: Elaboración propia.

- Cálculo del Índice de Explosión Aérea (A)

De un estudio de un gran número de escapes de sustancias inflamables que han dado lugar ya sea a explosiones aéreas o a nubes que han causado únicamente fuego por ignición, ha sido posible identificar un número de factores incluidos en el Índice de Mond y que pueden usarse para derivar el Índice A de Explosión Aérea que se calcula como se muestra a continuación:

$$A = B \left(1 + \frac{m}{100} \right) Q \cdot H \cdot E \frac{T}{300} \left(\frac{1+p}{1000} \right) \quad (2.6)$$

Donde:

B= factor material

M= factor de mezclado y dispersión

Q= factor por riesgos de cantidad de material

H= altura de la unidad

E= índice de explosión interna

T= temperatura del proceso (K)

p= factor por alta presión

Tabla 2.6: Categorías asignadas para el Índice de Explosión Aérea (A)

Índice de Explosión Aérea (A)	Categoría
0 – 10	Ligero
10 – 30	Bajo
30 – 100	Moderado
100 – 500	Alto
+500	Muy alto

Fuente: Elaboración propia.

- Cálculo del Índice unitario de toxicidad (U)

Se calcula un índice unitario de Toxicidad (U) por la ecuación 2.7 de manera que represente la influencia de la toxicidad y consideraciones afines sobre el control y supervisión de la sección de la planta.

$$U = \frac{T}{100} \left(1 + \frac{M+P+S}{100} \right) \quad (2.7)$$

Tabla 2.7: Categorías asignadas a los valores del Índice Unitario de Toxicidad

Índice Unitario de Toxicidad (U)	Categoría
0 – 1	Ligero
1 – 3	Bajo
3 – 6	Moderado
6 – 10	Alto
+10	Muy alto

Fuente: Elaboración propia.

- Cálculo del Índice máximo incidente tóxico (C)

Usando una combinación del índice unitario de toxicidad (U) y el Factor de cantidad (Q), se obtiene el Índice del Máximo Incidente Tóxico (C) y se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$C = Q \cdot U \quad (2.8)$$

Tabla 2.8: Categorías asignadas a los valores del Índice del Máximo Incidente Tóxico (C)

Índice del Máximo Incidente Tóxico (C)	Categoría
0 – 20	Ligero
20 – 50	Bajo
50 – 200	Moderado

200 – 500	Alto
+500	Muy alto

Fuente: Elaboración propia.

- Cálculo del Índice Global de Riesgos (*Mond*) (R)

En la división *Mond* se ha visto que la magnitud global de riesgo a usarse cuando se considera el arreglo de equipo de una planta, debe tener mayor influencia de los siguientes factores que lo permitido en el Índice Global *DOW/ICI*. De acuerdo a lo anterior, se ha desarrollado una Magnitud Global de Riesgos (R), que maneja estos factores de manera más adecuada. Si uno de los factores tiene valor cero, se debe considerar un valor mínimo de 1 en esta ecuación:

$$R = D \left(1 + \sqrt{\frac{F+U+E+A}{10^3}} \right) \quad (2.9)$$

Como diferentes niveles aceptables de riesgo global pueden ser apropiados según las circunstancias, la lista de valores del Factor global de riesgo (tabla 2.9) a la mitad del rango se divide en dos conjuntos más pequeños: Alto (Grupo 1) y Alto (Grupo 2), ya que uno puede considerarse aceptable y el otro no.

Tabla 2.9: Categorías asignadas a los valores del Factor Global de Riesgo (R)

Factor Global de Riesgo (R)	Categoría
0 – 20	Suave
20 – 100	Bajo
100 – 500	Moderado
500 – 1 100	Alto (grupo 1) Aceptable
1 100 – 2 500	Alto (grupo 2) No Aceptable
2 500 – 12 500	Muy alto
12 500 – 65 000	Extremo
+65 000	Muy extremo

Fuente: Elaboración propia.

- Sesta fase: determinación de los Factores de Bonificación.

Se considera que existen medidas especiales destinadas a la seguridad de los procesos y en esta fase se determinan los factores globales de bonificación K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 y K_6 a través del producto de las bonificaciones que se presentan en la tabla 2.10.

Tabla 2.10: Control de Riesgos Asociados a la Contención (K_1)

Riesgos Asociados a la Contención (K_1)	Rango	Factor
Tanques a presión	0,8 a 0,9	
Tanques verticales	0,8 a 0,9	
Tuberías de transferencia	0,6 a 0,9	
Otras barreras adicionales	0,45 a 0,9	
Detección y control de fugas	0,7 a 0,95	
Venteos de emergencia	0,9 a 0,95	
Factor de Bonificación por Contención (K_1)		Producto (factores)

Fuente: Elaboración propia.

Los factores de bonificación para el control de Riesgos Asociados al Control del Proceso (K_2), Control de Riesgos asociados a la Actitud con Respecto a la Seguridad (K_3), Control de Riesgos en la Protección Contra Incendio (K_4), Control de Riesgos por Aislamiento (K_5) y Control de Riesgos por la Lucha Contra Incendios (K_6) se pueden observar en los anexos 3a, 3b, 3c, 3d, 3e y 3f y se calculan de la misma forma, o sea, como una multiplicación de todos los factores de bonificación.

- Séptima fase: cálculo de Índices Corregidos.

Una vez definidos los factores de bonificación, entonces se procede a reducir los índices ya calculados por las siguientes ecuaciones:

Carga de Fuego Reducida

$$F_2 = F \cdot K_1 \cdot K_3 \cdot K_5 \cdot K_6 \quad (2.10)$$

Índice Reducido de Explosión

$$E_2 = E \cdot K_2 \cdot K_3 \quad (2.11)$$

Índice Reducido de Riesgo de Explosión Aérea

$$A = A \cdot K_1 \cdot K_5 \cdot K_6 \quad (2.12)$$

Índice Global de Riesgo Reducido

$$R_2 = R \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \quad (2.13)$$

En la tabla 2.11 se puede observar los niveles máximos aceptables para cada uno de los riesgos.

Tabla 2.11: Niveles máximos de aceptabilidad de riesgos.

Riesgo	Nivel máximo aceptable	Nivel no aceptable de riesgo
Incendio (F)	Moderado	Alto
Explosión interna (E)	Moderado	Alto
Explosión aérea (A)	Moderado	Alto
Índice unitario de toxicidad (U)	Moderado	Alto
Índice máximo incidente tóxico (C)	Moderado	Alto
Factor Global de Riesgo (R)	Alto (Grupo 1)	Alto (Grupo 2)

Fuente: Elaboración propia.

2.3.2 Software *ALOHA*. Características fundamentales y su aplicación en la evaluación de las consecuencias de los accidentes industriales

Según López (2010) se utiliza la versión 5.4.7 (EPA, 2016) la cual reporta resultados confiables. Una de las características que posee es que emplea una serie de términos no conocidos relacionados con la ocurrencia del fuego, explosiones, y otros escenarios peligrosos, a lo cual se hace referencia:

- Se modelan tres categorías peligrosas:
 - Dispersión de gas tóxico
 - Fuegos
 - Explosiones
- Se basan en los modelos de dispersión del aire para estimar el movimiento y dispersión de la nube de gas químico.
- Se estima la dispersión de la nube de gas tóxico, valores de sobrepresión desde la explosión de una nube de vapor y el área inflamable de la nube de vapor.
- Modela las áreas para emisiones de corta duración de compuestos peligrosos claves: tóxicos, inflamables, radiación térmica y sobrepresión que pueden exceder los niveles de interés especificados por el usuario (Levels of Concern LOCs). Los resultados son representados en diagramas “Y” contra “X” donde nos indica la amplitud del área de localización en el eje “Y” y su alcance en el eje “X”. (Threat zone plot).
- Constituye una herramienta que se usa para:
 - Respuesta de emergencia
 - Planificación
 - Propósitos académicos
- No puede ser usado para:
 - Emisiones de sustancias radioactivas.
 - Licencias ambientales de chimeneas de gas.
 - Emisiones fugitivas.

Para modelar la dispersión de los componentes químicos en el aire *ALOHA* utiliza dos modelos:

- Modelo Gaussiano para los gases que tienen la misma densidad que el aire.
- Modelo de Gases Pesados utilizado para los gases que son más pesados que el aire donde son emitidos.

Algunos de los términos usados son:

- Gas pesado: gases con peso molecular superior al peso molecular del aire. También gases que son más ligeros que el aire almacenado a bajas temperaturas, o sea en estado criogénico.
- Flash boiling: vaporización brusca de un líquido causada por baja presión.
- Two-Phase flow: cuando las fases líquida y gaseosa de un compuesto químico escapan juntas desde la ruptura de un tanque.

ALOHA (2007) define las propiedades que condicionan un fuego de acuerdo a lo planteado por Botta, (2012) y Martínez, (2016) como:

- Volatilidad: medida de cómo un compuesto químico fácilmente se evapora.
- Punto o temperatura de inflamación (Flash Point): es la más baja temperatura donde un líquido inflamable evapora lo suficiente para alcanzar un fuego en presencia de una fuente de ignición.
- Límites de Inflamabilidad: llamado Límite de Explosividad Inferior (LEL) y Límite de Explosividad Superior (UEL).

Si el compuesto químico en fase vapor se pone en contacto con la fuente de ignición, solo se producirá el fuego si la relación aire-combustible está entre LEL y UEL. Compuestos con alta volatilidad y baja temperatura de inflamación tienen bajos valores de LEL. *ALOHA* no modela subproductos del fuego como hollín, humo, ceniza y compuestos químicos de la reacción.

Los niveles de radiación térmica se indican a través del LOC. El LOC es un nivel que marca el inicio de la radiación térmica, usualmente el nivel sobre el cual este peligro puede ocurrir.

- Se utilizan tres valores de LOC, medidos en kW/m²
 - 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.

Los niveles de sobrepresión están dados por el nivel de presión de la onda de explosión sobre el cual el peligro puede existir (ver anexo 4), estos son:

- Rojo: 8 psi (destrucción de edificios)
- Naranja: 3,5 psi (serios daños)
- Amarillo: 1 psi (destrucción de cristales)

ALOHA no modela los fragmentos peligrosos de una explosión. Modela cinco tipos de escenarios de fuego y explosiones asociados con emisiones de compuestos químicos.

- Dardos de fuego
- Piscinas de fuego
- BLEVE
- Nubes inflamables
- VCE

La explicación de estos escenarios puede verse en el manual de usuario *ALOHA* (2007).

Otras particularidades del Software son que debe trabajarse con cuidado para predecir diferentes situaciones, las cuales son consideradas sus limitantes:

- Velocidades del viento muy bajas.
- Condiciones atmosféricas muy estables.

- Irregularidades de la concentración del compuesto químico particularmente cerca de la fuente.

Además, el modelo no incorpora efectos de:

- Reacciones químicas
- Partículas
- Mezcla de compuestos químicos
- Terreno
- Fragmentos peligrosos

El programa cuenta con una base de datos de compuestos químicos de interés, sobre la base de datos DIPPR (Department of Chemical Engineering of Brigham Young University for the Design Institute for Physical Property Data (DIPPR) of the American Institute of Chemical Engineers) donde aparecen las principales propiedades físicas y químicas y tiene en cuenta a diferencia de versiones anteriores algunas soluciones, tales como ácidos anhídridos en agua y ácidos fluorhídricos en agua.

La organización básica del programa consta de varios pasos que son:

1. Indicar la ciudad donde puede ocurrir el accidente químico.
2. Seleccionar el compuesto químico.
3. Dar la información de las condiciones meteorológicas en el período que queremos realizar la predicción del evento.
4. Describir cómo los compuestos químicos escapan a la atmósfera.
5. El Software *ALOHA* da su respuesta mostrando en el monitor un diagrama denominado *Threat Zone*, el cual muestra el área donde las concentraciones del compuesto químico en el aire pueden ser lo suficientemente altas para que provoque afectaciones a la población, en los tres niveles de LOC.

En el caso que se suministre que ocurre la inversión hay que dar la altura a la cual ocurre este proceso. Para entregar los datos de humedad del aire se podrá indicar el valor particular o dar los casos extremos, húmedo, medio o seco.

Para la mejor comprensión de los resultados cualitativos de este Software se hace referencia por NOAA, (2016) a los diferentes LOC que se utilizan:

AEGL: las siglas representan los niveles de LOC para una exposición aguda, de ahí la sigla *Acute Exposure Guideline Levels*, son los lineamientos de los niveles de una exposición aguda.

ERPG: las siglas, se utilizan para la planificación de los planes de emergencia, de ahí *Emergency Response Planning Guidelines*.

ERPG-1: la concentración máxima dispersada bajo la cual es posible creer que los individuos que estén expuestos durante 1 hora pueden sufrir efectos moderados sobre su salud y percibir claramente un olor desagradable.

ERPG- 2: la concentración máxima dispersada bajo la cual es posible creer que los individuos que estén expuestos durante 1 hora pueden experimentar o desarrollar daños irreversibles u otros daños serios para la salud o síntomas que le impiden la habilidad individual para realizar una acción de protección.

ERPG- 3: es la concentración máxima dispersada bajo la cual es posible creer que los individuos que estén expuestos durante 1 hora sufrirán efectos sobre la salud y puede correr peligro su vida.

TEEL: las siglas se utilizan cuando no se conocen exactamente los valores de ERPG para un compuesto químico, ya que representa los niveles temporales de exposición a emergencias, *Temporal Emergencyy Exposure Levels*.

TEEL-1: es la concentración en el aire bajo la cual se considera que los individuos expuestos pueden sufrir efectos moderados sobre su salud y percibir claramente un olor desagradable.

TEEL-2: es la concentración en el aire bajo la cual se considera que los individuos expuestos pueden sufrir efectos irreversibles sobre su salud o síntomas que les impida tomar decisiones para protegerse.

TEEL-3: es la concentración en el aire bajo la cual se considera que los individuos expuestos a ella se encuentran en condiciones de riesgo para su vida.

IDLH: las siglas están relacionadas con los niveles permisibles de exposición del hombre a compuestos químicos en zonas de trabajo sin afectar la salud y la vida, de ahí las siglas *Inmediatly Dangerous to Life or Health*. No está designado para ser tomado como un límite de exposición a toda la población ya que no está definido en correspondencia con la sensibilidad de algunas personas como los niños. No deben usarse los valores del IDLH para identificar definitivamente condiciones peligrosas en términos generales.

2.3.3 Establecimiento de las condiciones de trabajo con el software

Este estudio se realiza con la finalidad de determinar las áreas de atmósferas peligrosas que pueden originarse ante posibles accidentes químicos. Las sustancias involucradas son: Gas natural, Sulfuro de hidrógeno, Nafta y Petróleo crudo extrapesado.

Para una correcta utilización del programa y que los resultados que se obtengan sean fáciles de entender y manejar se toman algunas consideraciones:

- Trabajar con los valores medios de las variables que caracterizan a la década analizada.

- Realizar el estudio para cada uno de los meses del año ya que hay variaciones climatológicas significativas entre los diferentes meses.
- Tomar en cuenta las 16 direcciones del viento posibles para el análisis.

Los parámetros climatológicos son los requeridos por el software para estimar las áreas de peligro, tomando en cuenta los criterios obtenidos para la selección de cada uno de ellos, por la importancia que estos revisten serán analizados independientemente:

- Temperatura del aire: en el caso específico de la temperatura se decide tomar los valores medios de la máxima debido a que con ella se garantiza estimar las mejores condiciones de la dispersión.
- Humedad relativa: se trabaja con los valores medios, de lo contrario sería necesario hacer estimaciones para los diferentes horarios del día donde ocurren los valores máximos y mínimos.

Además, se pudo comprobar que la variación que existe entre la media de las máximas y la media no introduce variaciones de consideración en el comportamiento de la dispersión del contaminante.

- Nubosidad: se toman el valor medio de la nubosidad para cada mes de la década analizada.
- Viento: para este caso se toman los 16 rumbos con la velocidad media correspondiente para el período analizado.

2.4 Método Probit

En este método se parte de una manifestación física de un incidente (por ejemplo, la concentración tóxica y tiempo de exposición en una cierta área geográfica) y nos da como resultado una previsión de los daños a las personas expuestas al incidente (es decir, número de heridos, número de víctimas, etc.). La fórmula empleada para este modelo de vulnerabilidad se basa en una función matemática lineal de carácter empírico extraída de estudios experimentales:

$$Pr = a + b \cdot V \quad (2.14)$$

Donde:

Pr = *Probit* o función de probabilidad de daño sobre la población expuesta.

a = constante dependiente del tipo de lesión y tipo de carga de exposición.

b = constante dependiente del tipo de carga de exposición.

V = variable que representa la carga de exposición.

El valor *Probit* permite determinar el porcentaje de la población expuesta que se verá afectada a un determinado nivel de lesiones o por muerte a causa de una carga de exposición determinada (ver tabla 2.12).

Tabla 2.12: Equivalencia entre valores *Probit* y porcentaje de la población afectada.

Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%		
0	0	3,72	10	4,16	20	4,48	30	4,75	40	5,00	50	5,25	60	5,52	70	5,84	80	6,28	90	7,33	99,0
2,67	1	3,77	11	4,19	21	4,50	31	4,77	41	5,03	51	5,28	61	5,55	71	5,88	81	6,34	91	7,37	99,1
2,95	2	3,82	12	4,23	22	4,53	32	4,80	42	5,05	52	5,31	62	5,58	72	5,92	82	6,41	92	7,41	99,2
3,12	3	3,87	13	4,26	23	4,56	33	4,82	43	5,08	53	5,33	63	5,61	73	5,96	83	6,48	93	7,46	99,3
3,25	4	3,92	14	4,29	24	4,59	34	4,85	44	5,10	54	5,36	64	5,64	74	5,99	84	6,55	94	7,51	99,4
3,36	5	3,96	15	4,33	25	4,61	35	4,87	45	5,13	55	5,39	65	5,67	75	6,04	85	6,64	95	7,58	99,5
3,45	6	4,01	16	4,36	26	4,64	36	4,90	46	5,15	56	5,41	66	5,71	76	6,08	86	6,75	96	7,65	99,6
3,52	7	4,05	17	4,39	27	4,67	37	4,92	47	5,18	57	5,44	67	5,74	77	6,13	87	6,88	97	7,75	99,7
3,59	8	4,08	18	4,42	28	4,69	38	4,95	48	5,20	58	5,47	68	5,77	78	6,18	88	7,05	98	7,88	99,8
3,66	9	4,12	19	4,45	29	4,72	39	4,97	49	5,23	59	5,50	69	5,81	79	6,23	89	7,33	99	8,09	99,9

Fuente: Hernandez (2017).

Este método se puede emplear para determinar el porcentaje de personas afectadas por intoxicación, por radiación térmica y por sobrepresión.

2.4.1 Método *Probit* de vulnerabilidad a radiaciones térmicas

Se emplea para determinar el porcentaje de personas afectadas por los efectos de las radiaciones térmicas en función de la intensidad de irradiación recibida y del tiempo de exposición (dosis de radiación calorífica recibida).

En el caso de fugas de líquidos y gases inflamables y con una ignición inmediata, se podrá generar un charco ardiendo, una explosión BLEVE o un chorro con llamarada. Las lesiones ocasionadas serán causadas principalmente por radiaciones térmicas.

Si el gas no se enciende inmediatamente, se dispersará en la atmósfera. Si la nube de gas formada se encuentra con un foco de ignición en sus proximidades, se supone que cualquier persona presente dentro de la nube de gas ardiendo morirá a consecuencia de quemaduras y asfixia. En la zona externa a la nube de gas, aunque la duración de la radiación térmica

generalmente será breve, los daños estarán en función de la distancia y habrán de ser evaluados en cada caso.

La institución holandesa TNO (Organización holandesa para la investigación científica) presenta las ecuaciones *Probit* siguientes:

- Quemaduras mortales (protegidos con ropas):

$$Pr = -37,23 + 2,56 \ln(t * I^{4/3}) \quad (2.15)$$

- Quemaduras mortales (sin protección):

$$Pr = -36,38 + 2,56 \ln(t * I^{4/3}) \quad (2.16)$$

- Quemaduras de segundo grado:

$$Pr = -43,14 + 3,0188 \ln(t * I^{4/3}) \quad (2.17)$$

- Quemaduras de primer grado:

$$Pr = -39,83 + 3,0186 \ln(t * I^{4/3}) \quad (2.18)$$

Donde:

t = tiempo efectivo de exposición (segundos)

I = intensidad de irradiación (W/m²)

En las fórmulas anteriores se ha supuesto que las lesiones ocasionadas se reducen por el factor 7 si se va protegido con ropa. En otras palabras, un porcentaje del 1 % en un determinado grado de lesión en personas que utilizan ropas que equivale a un 7 % en personas que no van protegidas con ropas.

2.4.2 Método *Probit* de vulnerabilidad a explosiones

Los modelos de consecuencias de explosiones predicen el impacto de la sobrepresión originada por la explosión y la proyección de fragmentos volantes sobre las personas y objetos.

Al considerar las consecuencias sobre las personas se debe hacer distinción entre consecuencias directas e indirectas de una explosión. Entre las primeras están las lesiones de los pulmones y los tímpanos. Entre las segundas se encuentran las lesiones ocasionadas por proyección de fragmentos y por impacto del cuerpo contra obstáculos.

Las ecuaciones *Probit* para estas consecuencias se han tomado de Hernández (2017) y se desglosan a continuación:

- Muerte por lesiones pulmonares

La ecuación *Probit* para determinar el porcentaje de muertes por hemorragia pulmonar es la siguiente:

$$Pr = -77,1 + 6,91 \ln P \quad (2.19)$$

P = sobrepresión máxima (N/m²)

- Rotura de tímpano

El porcentaje de afectados por rotura de tímpano se determina por la ecuación:

$$Pr = -15,6 + 1,93 \ln P \quad (2.20)$$

P = sobrepresión máxima (N/m²)

- Muerte por impacto del cuerpo

El porcentaje de muertes por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos se determina por la ecuación:

$$Pr = -46,1 + 4,82 \ln J \quad (2.21)$$

Donde:

J = impulso originado por la sobrepresión durante el tiempo de actuación (N·s/m²)

- Lesiones por impacto del cuerpo

El porcentaje de lesionados por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos se determina por la ecuación:

$$Pr = 39,1 + 4,45 \ln J \quad (2.22)$$

Donde:

J = impulso (N·s/m²)

Capítulo 3: Análisis de los resultados

Todo proyecto o investigación que se pone en marcha, lo motiva la respuesta o cumplimiento a los determinados objetivos que han sido propuestos. Su punto final no lo constituyen precisamente los valores cualitativos o cuantitativos que se puedan llegar a obtener, sino el análisis y la convicción que se pueda tener sobre dichos resultados. Lo lógico y positivo de cada uno de ellos para tenerlo en cuenta y validarlo, o lo ilógico y negativo para ser desechado. Por lo tanto, este capítulo se encarga de analizar los principales resultados alcanzados de la presente investigación.

3.1 Resultados obtenidos en el cálculo del Índice de *Mond*

- Primera fase: división de una planta en secciones

Una sección se define como parte de una planta que se puede identificar lógicamente y fácilmente como una entidad separada. Puede consistir en una porción de la Planta que está (o puede estar) separada del resto, ya sea por una distancia o por barreras contra fuego, dique, u otros. La parte de la planta seleccionada como una sección es normalmente el área donde exista un proceso particular y/o un riesgo material, diferente de aquellos presentes en otras secciones cercanas.

Por lo antes mencionado se selecciona el tanque de tratamiento como la unidad donde se estudia el riesgo pues aquí tiene lugar la recepción, calentamiento y reposo del crudo, etapa final de tratamiento del petróleo.

- Segunda fase: listado de materiales para la sección

Para que un material se seleccione como material clave, debe estar presente en tal magnitud que sea peligroso. A pesar de que el sulfuro de hidrógeno es el elemento más tóxico se escoge como material clave el crudo, pues al ser más abundante, representa el mayor riesgo en la unidad.

- Tercera fase: cálculo del Factor de Material

1. Determinación del factor de material (B)

Para el cálculo del factor material se utiliza la ecuación 2.1 que depende únicamente del calor de combustión del crudo a temperatura y presión atmosférica. En este caso se obtuvo un factor material (B) igual a 21,225.

- Cuarta fase: cálculo de Factores de penalización del Riesgo

2. Riesgos especiales del material (M)

El rango de valores se aplica atendiendo a la metodología que se explica a continuación y a través de entrevistas personales a los tecnólogos y al encargado de seguridad industrial y protección ambiental de la batería.

Primeramente, se estiman los Riesgos especiales del Material atendiendo a las características del material clave. Como el material clave es altamente viscoso a temperaturas relevantes de la sección, se debe seleccionar un factor de -20. A los líquidos pirofóricos se les asigna un factor de 100. Una descomposición explosiva se define como una reacción acompañada por la liberación de grandes cantidades de gases calientes que ocurre con suficiente rapidez para proporcionar una rápida reacción o una explosión visibles a un observador, para ello se asigna un factor de 125. Como el material tiene propiedades deflagrantes o de propulsión, se le asigna un factor de 400. Cuando el material sea tal que una explosión de gas o de fase vapor inicie una explosión de fase condensada, adicione 500; obteniéndose un valor de 900 para las propiedades de la fase condensada. Los resultados se ofrecen en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Riesgos especiales del material.

Riesgos especiales del material (M)	7 y 8	15 y 16	14	6
Productos oxidantes	0	0	0	0
Dar lugar a gas combustible	0	0	0	0
Características de mezcla y dispersión (m)	-20	-20	-20	-20
Puede inflamarse espontáneamente	100	100	100	100
Puede polimerizarse espontáneamente	25	25	25	25
Sensibilidad a la ignición	150	150	150	150
Puede dar descomposición explosiva	125	125	125	125
Puede dar lugar a detonación del gas	0	0	0	0
Propiedades de la fase condensada	900	900	900	900
Otros	150	150	150	150
Factor de Riesgos especiales del material (M)	1 430	1430	1 430	1 430

Fuente: Elaboración propia.

3. Riesgos generales del proceso (P)

Cuando un material que está siendo almacenado está caliente y tiene una fase acuosa separada, y/o el recipiente de almacenamiento está calentado con vapor, como el caso estudio, se usa un factor de 50. En una operación de transporte que se esté usando tubería flexible o que se pueda quitar y que también requiera el uso de conexiones para venteo simultáneo o purga de gas inerte, se aplica un factor adicional de 50. Como en los tanques de tratamiento no se lleva a cabo ninguna reacción química, sino que solamente se calienta el petróleo, para la determinación de los riesgos generales del proceso (ver tabla 3.2) se tendrán en cuenta dos aspectos.

Tabla 3.2: Riesgos generales del proceso.

Riesgos generales del proceso (P)	7 y 8	15 y 16	14	6
Manipulación y cambios físicos	50	50	50	50
Reacciones continuas simples	0	0	0	0
Reacción batch	0	0	0	0

Multiplicidad de reacciones	0	0	0	0
Desplazamiento del material	50	50	50	50
Contenedores transportables	0	0	0	0
Factor de Riesgos generales del proceso (P)	100	100	100	100

Fuente: Elaboración propia.

4. Riesgos especiales del proceso (S)

Para la determinación de los riesgos especiales del proceso (S) hay que tener en cuenta que la unidad seleccionada trabaja a presión atmosférica. Según la metodología los procesos que operan casi a presión atmosférica (definida como $\pm 0,5$ psi o $\pm 0,35$ bar) o al vacío (hasta un diferencial de 600 mm Hg) con materiales inflamables, presentan un gran peligro por el riesgo de explosión originado por la entrada de aire al sistema, en tales casos se aplica un factor de 100. Cuando no se conoce el peso equivalente del material y resulta difícil estimarlo por técnicas de laboratorio, Arencibia, (2018) propone la ecuación 3.1 siempre que el material que se corroe es el hierro o sus aleaciones. En este caso el sulfuro de hierro que a menudo se encuentran en instalaciones de petróleo y gas donde los productos de la corrosión de los equipos de acero pueden entrar en ignición si se exponen al aire.

$$VC(\text{mm/año})=i_{\text{corr}}(\text{amp} / \text{cm}^2) * 4,6 \cdot 10^5 \quad (3.1)$$

Donde:

VC= velocidad de corrosión en (mm/año)

i_{corr} = densidad de corriente de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

La operación a alta temperatura presenta un efecto doble: primero aumenta los riesgos inherentes al manejo de material inflamable, y segundo, la resistencia al equipo de planta se puede ver afectada negativamente. Si el material (ya sea su estado normal gas, líquido o sólido) se maneja arriba de su Temperatura Normal de Auto Ignición, se usa un factor de 35. Según la metodología para velocidades de corrosión mayor que 1 mm/año acompañada de efectos de erosión se usa un factor de 100. Las fugas por juntas y cierres pueden representar un problema, particularmente donde se tienen ciclos de temperaturas y de presión. Para uniones bridadas que llegaran a tener fugas regulares de menor cuantía, se usa un factor de 30. Además, en las operaciones de llenado y vaciado donde se pueden introducir riesgos por vibración y fatiga cuando los cimientos u otros soportes de estructuras fijas, tales como tuberías, se debilitan por corrosión, abrasión, mal diseño en la cimentación, refuerzos de luz inadecuados, entre otros, se asigna un factor de hasta 30 de acuerdo con las consecuencias que ocasione la falla. Donde se almacenan líquidos inflamables de manera que el espacio de vapor esté (bajo condiciones normales o de equilibrio) fuera del rango inflamable, pero que puedan entrar en el rango

inflamable durante el llenado o vaciado, o en otras situaciones infrecuentes pero normales, se usa un factor de 50. Igualmente, un líquido inflamable almacenado a una temperatura por abajo de su *flash point* de copa cerrada puede producir un espacio de vapor inflamable por la entrada de líquido caliente, formación de neblina y donde se tiene un llenado de golpe (sin evitar salpicaduras) se usa un factor de 50. Para los procesos que usen líquidos inflamables o gases licuados inflamables a temperaturas y presiones tales que una fuga resulte en rápida vaporización y formación probable de concentración inflamable en una gran parte el edificio o atmósfera circundante, se aplica un factor de 40. A los procesos susceptibles de acumular contaminantes que puedan causar una explosión, se les asigna un factor de 100. Si en el proceso o la operación se manejan líquidos a una temperatura que sea susceptible de ignición o explosión de manera que pueda haber formación de neblina adentro del equipo, se debe aplicar un factor de 50. Donde es probable que el proceso produzca materiales pirofóricos, que puedan provocar ignición en espacios de vapor o donde es probable que se formen pequeñas cantidades de materiales inestables (como peróxidos), se usa un factor de 25. Se aplica un factor de 100 ya que existen riesgos de carga electrostática en líquidos, además de que los gases, cuando se descargan a gran velocidad, también pueden generar cargas electrostáticas.

Tabla 3.3: Riesgos especiales del proceso.

Riesgos especiales del proceso (S)	7 y 8	15 y 16	14	6
Presión baja (P < 15 psi)	100	100	100	100
Presión alta (p)	0	0	0	0
Temperatura baja (CS 10 °C a -25 °C)	0	0	0	0
Temperatura baja (CS a -25 °C)	0	0	0	0
Temperatura baja (Otros materiales)	0	0	0	0
Temperatura alta (Material inflamable)	35	35	35	35
Temperatura alta (Resistencia del material)	0	0	0	0
Corrosión y erosión	100	100	100	100
Fugas por juntas y cierres	30	30	30	30
Vibración y fatiga	30	30	30	30
Proceso/Reacciones difíciles de controlar	0	0	0	0
Operación cerca/en el rango de inflamabilidad	100	100	100	100
Riesgo de explosión superior al valor medio	100	100	100	100
Riesgo de explosión por polvo o neblina	50	50	50	50
Oxidantes potentes	0	0	0	0
Sensibilidad del proceso a la ignición	25	25	25	25
Riesgo de electricidad estática	100	100	100	100
Factor de Riesgos especiales del	670	670	670	670

proceso (S)				
--------------------	--	--	--	--

Fuente: Elaboración propia.

La cantidad de material se registra como cantidad total de peso. Se asigna el factor de cantidad por medio de 3 gráficas (ver anexo 5), relacionándolo con el peso de material en toneladas. La cantidad total de material en la unidad estudiada se calcula por medio del volumen y la densidad. Se debe usar el valor mínimo de 1 para una cantidad menor o igual a los 100 kg. El factor de cantidad ha sido extrapolado hasta 100 000 toneladas. Los resultados se ofrecen en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Riesgos asociados a las cantidades.

Riesgos asociado a las cantidades (Q)	7 y 8	15 y 16	14	6
Cantidad total de material (K) [t]	9 120,00	4 032,00	17 760,00	960,00
Factor de cantidad (Q)	350,00	250,00	420,00	150,00

Fuente: Elaboración propia.

Para el Riesgo por arreglo de los equipos o Riesgos de implantación (L) (ver tabla 3.5) un aspecto importante a tener en cuenta es la altura (H) a la que se encuentra en cantidades considerables el material inflamable. El área normal de trabajo (N) de una unidad de proceso se define como el área plana de la estructura asociada con la unidad agrandada cuanto sea necesario, para incluir bombas o tubería y equipo que no estén dentro del área de la estructura. Se debe considerar como el área rodeada por una cerca de longitud mínima colocada alrededor de la estructura de la unidad y equipos auxiliares. Una vez aclarado, se puede proceder a penalizar los distintos factores. Según la metodología para estructuras abiertas de proceso, de altura de más de 7 m, donde hayan sido adoptados diques individuales abajo de todos los recipientes elevados que contengan 1 tonelada o más de material inflamable, el factor a utilizar es de 15. Si la unidad está sujeta a ventilación natural solamente, se usa un factor de 50. Si la unidad de proceso tiene un área de contención de derrame donde pueda producir un charco de líquido inflamable de más de 2" (50 mm) en el centro del área bajo la estructura o equipo de la unidad de proceso, se usa un factor de 100. Si cualquier unidad de procesos que ocupe un área neta que exceda de 400 m² no se rodea por tres lados por caminos de acceso de 7 m de ancho como mínimo, se usa un factor de 75. Se determina la más alta capacidad en el proceso para cada material como valor h (horas) y se calcula el factor $2 \cdot (h-12)$ usando un factor de 25. Si la unidad de proceso que está siendo estudiada se localiza a menos de 10 m del cuarto de control principal, cafetería, oficinas o límite de talleres, se aplica un factor de 50.

Tabla 3.5: Riesgos de implantación.

Riesgos asociados a la distribución en planta (L)	7 y 8	15 y 16	14	6
--	--------------	----------------	-----------	----------

Altura (H) [m]	12	12	12	12
Área de trabajo (N) [m ²]	2 500	1 800	5 625	1 250
Diseño de la estructura	65	65	65	65
Efecto domino	20	20	20	20
Bajo tierra	0	0	0	0
Superficie de drenaje	100	100	100	100
Otros	150	150	150	150
Factor de Riesgos asociados a la distribución en planta (L)	335	335	335	335

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se determinan los Riesgos de toxicidad o asociados a la salud (T). Los riesgos para la salud pueden variar tanto en el grado como en la forma en que se presentan (ver tabla 3.6). Como el material no se puede absorber por la piel, entonces solo se penalizan sus efectos por inhalación. A pesar de que el material clave es el crudo, el tanque también contiene gas en su interior que en caso de ruptura o explosión las personas que respiran esta atmósfera pueden experimentar síntomas que incluyen dolor de cabeza, mareos, inconsciencia, náuseas, vómitos y bajo determinadas circunstancias se puede producir la muerte, por ello se penaliza con el máximo valor posible.

Tabla 3.6: Riesgos graves para la salud.

Riesgos asociados a daños graves a la salud (T)	7 y 8	15 y 16	14	6
Efectos sobre la piel	0	0	0	0
Efectos por inhalación	175	175	175	175
Factor de Riesgos asociados a daños graves a la salud (T)	175	175	175	175

Fuente: Elaboración propia.

- Quinta fase: cálculo de Índices de riesgo potencial
5. Cálculos del índice global *DOW/ICI* (D)

Se basa en calcular los índices de riesgo potencial que son los que subsisten en caso de fallar todas las medidas de prevención, protección y control. Estos índices dan una medida del peligro que presenta la unidad analizada.

A través de las ecuaciones 2.3; 2.4; 2.5; 2.6; 2.7; 2.8 y 2.9 se determina el valor numérico, así como sus correspondientes clasificaciones de acuerdo al grado de riesgo que presenta cada uno. Los resultados se muestran en las tablas 3.7a, 3.7b, 3.7c y 3.7d.

Tabla 3.7a: Resultados del cálculo de los Índices de riesgo potencial para TK_10 000 m³

Índice	Valor inicial		Bonificación	
	Valor	Categoría	Valor	Categoría

Índice equivalente de DOW (D)	10 586,6	MUY CATASTRÓFICO	-	-
Potencial de fuego (F)	1,59E+06	INTENSO	1,78E+05	MODERADO
Explosión interna (E)	23,0	MUY ALTO	9,6	MUY ALTO
Explosión aérea (A)	1 958,2	MUY ALTO	384,4	ALTO
Índice unitario de toxicidad (U)	40,2	MUY ALTO	-	-
Índice máximo de accidente tóxico (C)	14 087,5	MUY ALTO	-	-
Factor global de riesgo (R)	567 896 428,7	MUY EXTREMO	1 373 345,4	MUY EXTREMO

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7b: Resultados del cálculo de los Índices de riesgo potencial para TK_5 000 m³

Índice	Valor inicial		Bonificación	
	Valor	Categoría	Valor	Categoría
Índice equivalente de DOW (D)	9 937,1	MUY CATASTRÓFICO	-	-
Potencial de fuego (F)	9,75E+05	MUY ALTO	1,09E+05	MODERADO
Explosión interna (E)	23,0	MUY ALTO	9,6	MUY ALTO
Explosión aérea (A)	1 398,7	MUY ALTO	274,6	ALTO
Índice unitario de toxicidad (U)	40,2	MUY ALTO	-	-
Índice máximo de accidente tóxico (C)	10 062,5	MUY ALTO	-	-
Factor global de riesgo (R)	353 028 420,1	MUY EXTREMO	853 805,9	MUY EXTREMO

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7c: Resultados del cálculo de los Índices de Riesgo Potencial para TK_20 000 m³

Índice	Valor inicial		Bonificación	
	Valor	Categoría	Valor	Categoría
Índice equivalente de <i>DOW</i> (D)	11 041,2	MUY CATASTRÓFICO	-	-
Potencial de fuego (F)	1,37E+06	INTENSO	1,54E+05	MODERADO
Explosión interna (E)	23,0	MUY ALTO	9,6	MUY ALTO
Explosión aérea (A)	2 349,8	MUY ALTO	461,3	ALTO
Índice unitario de toxicidad (U)	40,2	MUY ALTO	-	-
Índice máximo de accidente tóxico (C)	16 905,0	MUY ALTO	-	-
Factor global de riesgo (R)	603 606 250,3	MUY EXTREMO	1 459 697,8	MUY EXTREMO

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7d: Resultados del cálculo de los Índices de riesgo potencial para TK_2 000 m³

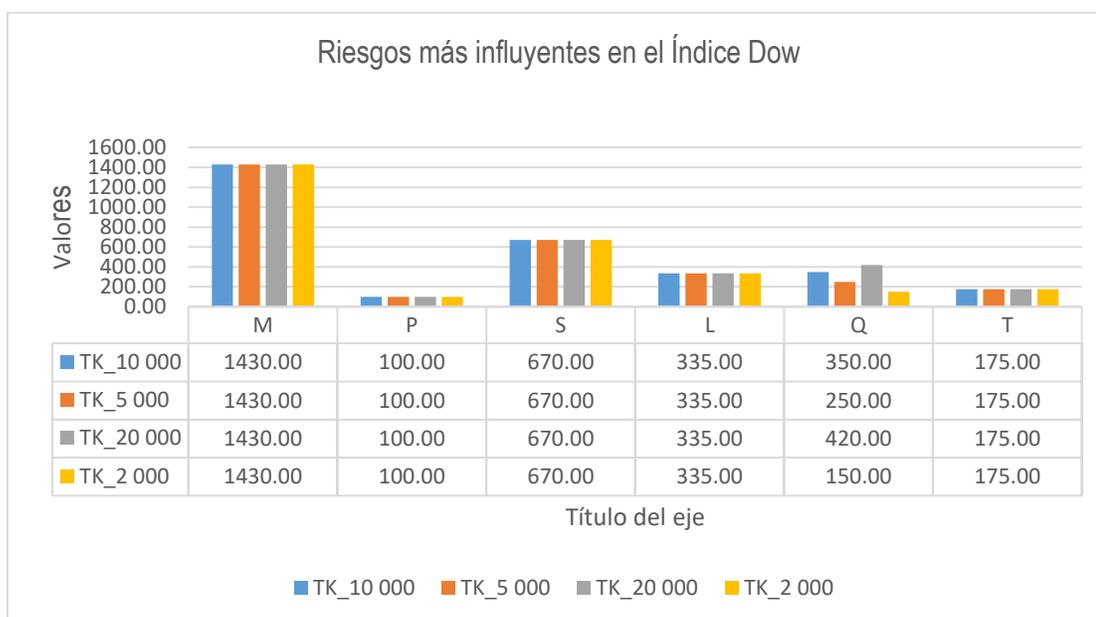
Índice	Valor inicial		Bonificación	
	Valor	Categoría	Valor	Categoría
Índice equivalente de <i>DOW</i> (D)	9 287,6	MUY CATASTRÓFICO	-	-
Potencial de fuego (F)	3,34E+05	ALTO	3,37E+04	LIGERO
Explosión interna (E)	23,0	MUY ALTO	9,6	MUY ALTO
Explosión aérea (A)	839,2	MUY ALTO	148,3	ALTO

Índice unitario de toxicidad (U)	40,2	MUY ALTO	-	-
Índice máximo de accidente tóxico (C)	6 037,5	MUY ALTO	-	-
Factor global de riesgo (R)	149 658 445,4	MUY EXTREMO	293 295,5	MUY EXTREMO

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia, en todos los Índices existen variaciones en la Categoría que van desde ligero hasta muy catastrófico y muy extremo. En la metodología del epígrafe 2.3.1, el Índice *Dow* (D), el Índice unitario de toxicidad (U) y el Índice máximo de accidente tóxico (C) son los únicos que no admiten ser reducidos mediante las bonificaciones conferidas por medidas de seguridad, medios de protección y sistemas especiales que se aplican en posteriores etapas. En el primero de los casos, el Índice *Dow* (D) se clasifica como muy catastrófico para los diferentes tanques ubicados en el área de tratamiento de crudo, donde los riesgos que más influyen se pueden observar en el gráfico de la figura 3.1.

Figura 3.1: Riesgos que más influyen en el cálculo del Índice de *Dow*.



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura anterior los riesgos más influyentes corresponden a los Riesgos especiales del material (M) y Riesgos especiales del proceso (S). Dentro de los Riesgos especiales del material (ver tabla 3.1) el problema está que el material tiene propiedades deflagantes o de propulsión, adicionando además que los tanques tienen un material tal que una explosión de gas o de fase vapor inicia una explosión de la fase condensada. Sin embargo, dentro de los Riesgos especiales del proceso (tabla 3.3) los que más inciden son los asociados a corrosión y erosión que se puede trabajar sobre este valor si se ofrece un adecuado mantenimiento, a través del recubrimiento con pinturas anticorrosivas e instalando los ánodos de sacrificio, también presenta riesgo de electricidad estática pues estos tanques se llenan y vacían cada ciclo de tratamiento (24 horas) que puede dar lugar a chispas y que los tanques exploten. Por tanto, hay que cuidar de la corrosión y erosión de los tanques, que los aterramientos estén correctamente instalados. En estos momentos la empresa, no presenta problemas de este tipo, por lo que no se puede realizar ninguna acción sobre ellos salvo mantener bajo vigilancia.

Por otra parte, el Índice unitario de toxicidad (U) y el Índice máximo de accidente tóxico (C) se clasifican como muy alto para cada tanque del área de tratamiento de crudo atendiendo a la categoría, lo cual es lógico pues el valor de uno siempre depende del otro. En estos índices los riesgos que más van a influir son los Riesgos del material, Riesgos especiales del proceso y los Riesgos asociados a la toxicidad. Este último se identifica tanto en condiciones anormales de proceso, como mantenimiento o procesos fuera de control o en incendios, o se encuentra continuamente como resultado de pequeñas fugas en juntas, empaques y en los venteos de los gases del proceso.

El Índice de potencial de fuego (F) se encuentran categorías desde alto hasta intenso para los diferentes tanques, pues como se observa en la ecuación 2.4 este valor depende de la cantidad de material y este a su vez de la capacidad volumétrica. Como se trabaja con tanques de gran tamaño entonces el riesgo de producirse un incendio devastador se incrementa. En cuanto a los resultados de la bonificación, como muestran las tablas 3.7a, 3.7b, 3.7c y 3.7d, se puede apreciar categorías totalmente diferentes que va desde moderadas hasta ligera, trayendo esto consigo riesgos menos devastadores.

En el Índice de explosión interna (E) tanto para valores iniciales como bonificación en los diferentes tanques, como muestran las tablas 3.7a, 3.7b, 3.7c y 3.87d, se encuentran en la categoría muy alta de riesgo. Esto se debe a la acción de los Riesgos especiales del material y a los Riesgos especiales del proceso.

En el Índice de explosión aérea (A) para valores iniciales en los diferentes tanques se encuentran en la categoría muy alta de riesgo. como se aprecia en las tablas 3.7a, 3.7b, 3.7c y

3.7d, en cuanto a los resultados de bonificación las categorías descienden a alto, debido a que este depende de los riesgos asociados a las cantidades, así como de las temperaturas del proceso.

Por último, el valor del Factor global de riesgo es inadmisibles pues resulta muy extremo. Este valor es lógico si se tiene en cuenta que depende de los índices de riesgo analizados anteriormente y que en todos los casos ofrecen resultados alarmantes.

- Sexta fase: cálculo de Factores de Bonificación

6. Clasificación de factores de bonificación por seguridad y medidas preventivas

Los factores seleccionados en cada apartado se multiplican entre sí para obtener los valores de K_1 a K_6 . Primeramente, las bonificaciones por sistemas de contención (K_1) están referidas a la reducción de riesgo como consecuencia de cualquier mejora en el diseño estándar de los recipientes a presión y sistemas de tubería y protección de estos contra daño accidental, incluyendo los procedimientos de mantenimiento y modificaciones. Los sistemas de detección de fugas que puedan advertir de un escape de material, si el equipo está protegido adecuadamente contra sobrepresión interna y también si el material venteado o de desecho se envía a lugares seguros. Las fallas del sistema de contención se indican por fugas del contenido de la atmósfera. Para recipientes a presión donde no se cuenta con información sobre el código que se utiliza en su construcción o el recipiente está deteriorado, se utiliza un factor de 1. El potencial total de fuga de estas tuberías de transferencia puede ser grande, debido a los inventarios considerables de material en la tubería y a los sistemas de recipientes de recepción/alimentación. Cuando la tubería se diseña y construye de acuerdo a las clases de localización 1, 2, 3 o 4, de conformidad con la Cláusula 841,151, se usa un factor de disminución de 0,9. Por el uso de tubería completamente soldada y 100 % radiografiada sin bridas, excepto en las secciones de válvulas, se usa un factor de 0,9. Cuando el área de tanques de almacenamiento está provista de diques según los requerimientos normales para líquidos inflamables, se usa un factor de 0,95. Si la altura de la pared del dique es igual al 50 % de la altura del tanque más alto que se encuentra dentro de él, o cuando su capacidad se calculó tomando en cuenta la formación de espuma u otra condición más severa, se usa un factor de 0,75. Si el dique está sellado por completo de manera que el material que se escape no pueda salir fuera del dique ni penetrar en la tierra, se usa un factor adicional de 0,90. Si todo el material en estado gaseoso o de vapor que se releva se ventea en una emergencia o se desecha, se envía a un quemador elevado o a un recibidor de venteos cerrado, se usa un factor de 0,9. Los resultados se presentan en la tabla 3.8.

Tabla 3.8: Riesgos asociados a la contención.

Riesgos asociados a la contención (K_1)	7 y 8	15 y 16	14	6
---	--------------	----------------	-----------	----------

Tanques a presión	1	1	1	1
Tanques verticales	1	1	1	1
Tuberías de transferencia	0,81	0,81	0,81	0,81
Otras barreras adicionales	0,64	0,64	0,64	0,64
Detección y control de fugas	1	1	1	1
Venteos de emergencia	1	1	1	0,9
Factor de bonificación por contención (K_1)	0,52	0,52	0,52	0,47

Fuente: Elaboración propia.

Para una mejor comprensión de los riesgos asociados al proceso se debe tener en cuenta todo lo referido a alarmas y/o sistemas de paro de seguridad activados por condiciones anormales específicas de proceso. La instalación de equipo de supresión de explosión, equipo diseñado para resistirlo o equipo de venteo seguro para explosiones internas, también son parte importante del sistema de control de procesos. Teniendo en cuenta esto, se bonifican cada uno de los factores como se muestra en la tabla 3.9.

La ayuda más simple para la operación segura de una planta es el proporcionar un sistema de alarma que indique las diversas fallas que se pueden encontrar en operación. Si el sistema requiere de decisiones por parte del operador y acciones de corrección o paro para evitar una situación potencial de riesgo que puede convertirse en un accidente, un factor de 0,95 es apropiado. El contar con suministro de energía de emergencia para servicios esenciales (aire de instrumentos, instrumentación de seguridad y de control clave, agitadores, bombas, ventiladores) donde el cambio de suministro normal al de emergencia se lleva a cabo automáticamente sin necesidad de re-arrancar motores, constituye un aspecto clave en la reducción de riesgos. El número de unidades de energía que se justifica para tener este tipo de servicio, solamente puede determinarse efectuando un estudio detallado de riesgos en la sección. Si se va a contar con un suministro de energía de emergencia con cambio automático es apropiado un factor de 0,90. Para el sistema más simple de paro de seguridad constituido solamente por funciones individuales de disparo o paro u operaciones de venteo, es apropiado un factor de 0,95. Si el equipo de la planta está provisto de instrumentos de relevo de sobrepresión o de venteo de explosión (en el caso de riesgo de explosión interna) adecuados para protegerlo de condiciones anormales previsible, se selecciona un factor entre 0,95 y 0,85 de acuerdo a la eficacia de los instrumentos de relevo de sobrepresión en el caso de: gas, vapor, neblina o venteo de reacción interna. Si el número de condiciones cubiertas es x, se aplica un factor de reducción que se encontrará en el rango de 0,97 y 0,88, dependiendo del grado de explicación que tengan las instrucciones de seguridad. Si es posible ponerse en contacto con todos los operadores por medio de radio u otro medio equivalente, desde el cuarto de control, se usa adicionalmente un factor de 0,97.

Tabla 3.9: Riesgos asociados al control de procesos.

Control de proceso (K₂)	7 y 8	15 y 16	14	6
Sistema de alarmas	0,95	0,95	0,95	0,95
Generadores de emergencia	0,9	0,9	0,9	0,9
Sistema de enfriado de emergencia	0,9	0,9	0,9	0,9
Sistema de gases de inertización	1	1	1	1
Estudio de actividades peligrosas	1	1	1	1
Paradas de seguridad reguladas	0,95	0,95	0,95	0,95
Control automático por ordenador	0,85	0,85	0,85	0,85
Protección contra reacciones fuera de control	0,95	0,95	0,95	0,95
Procedimientos normalizados de operación	0,95	0,95	0,95	0,95
Vigilancia de la planta	0,97	0,97	0,97	0,97
Factor de bonificación por control del proceso (K₂)	0,54	0,54	0,54	0,54

Fuente: Elaboración propia.

La actitud de la gerencia hacia normas de seguridad contribuye (cuando el énfasis es correcto) significativamente a la reducción de la frecuencia de accidentes. En este caso se asignan factores de bonificación como se muestran en la tabla 3.10. El resultado de fomentar la seguridad se ve en aumento en el nivel de entrenamiento de todo el personal, la adhesión o procedimientos de operación establecidos, buenas normas de mantenimiento, la aplicación correcta de sistemas de aprobación a las modificaciones y permisos de trabajo, verificaciones regulares y eficientes de todos los sistemas de seguridad y control y un informe de circunstancias anormales, fallas y accidentes menores. Además, la empresa lleva a cabo un programa de entrenamiento sobre seguridad que incluye a todos los operadores, personal administrativo y auxiliar.

Si la actitud es tal que no se acepten compromisos entre presiones económicas o de producción y seguridad, se selecciona un factor entre 0,95 y 0,90. Si regularmente se lleva a cabo un programa de entrenamiento sobre seguridad que incluya a todos los operadores, personal administrativo, auxiliar o del contratista en planta, use un factor entre 0,80 y 0,95, de acuerdo a las características del programa. La observancia estricta de permisos de trabajo o sistemas de certificación de limpieza para mantenimiento y trabajos de modificaciones proporciona un factor entre 0,98 y 0,90, dependiendo del apego a los procedimientos. De acuerdo a la eficacia con la que se efectúen las inspecciones de seguridad y limpieza en la planta, se debe escoger un factor en el rango de 0,97 a 0,90 que depende de la ausencia de basura (particularmente de materiales combustibles e inflamables), de fugas de materiales tóxicos, inflamables, fluidos de servicio, etc. Cuando se elaboren reportes completos de accidentes, condiciones anormales de

proceso y fallas (que cubran cuando menos el 50 % de dichos eventos), se aplica un factor de 0,95.

Tabla 3.10: Actitud frente a temas de seguridad.

Actitud frente a temas de seguridad (K₃)	7 y 8	15 y 16	14	6
Implicación de la gerencia	0,95	0,95	0,95	0,95
Entrenamientos de seguridad	0,9	0,9	0,9	0,9
Procedimientos de mantenimiento y seguridad	0,9	0,9	0,9	0,9
Factor de bonificación por actitud por la seguridad (K₃)	0,77	0,77	0,77	0,77

Fuente: Elaboración propia.

La medida más importante para reducir el riesgo es asegurarse de que las estructuras y recipientes de la sección estén provistos de protección efectiva contra el fuego, así como contar con cortinas de agua o vapor, paredes resistentes a fuego, pisos sólidos, etc., que eviten que se propague el fuego y el humo.

Si la protección contra fuego cubre toda la estructura protegida, se usa un factor de 0,90. Y 0,80 si la protección contra fuego cubre toda la unidad. Se selecciona un factor de reducción entre 0,80 y 0,95 siempre que la pared cuente con una duración de 4 horas, dependiendo del grado de protección que brinda para evitar la propagación del fuego. Si la sección se localiza detrás de paredes contra fuego, dentro de un cerco que proporcione un medio para confinar el fuego dentro de la sección, se aplica un factor de 0,80. Cuando el cubículo provea protección para impedir que partículas puedan dañar otras secciones o al personal, se usa un factor de 0,85. Las bonificaciones de cada uno de los caracteres se muestran en la tabla 3.11.

Tabla 3.11: Protección contra fuego.

Protección física contra fuegos (K₄)	7 y 8	15 y 16	14	6
Protección de la estructura	0,8	0,8	0,8	0,8
Muros cortafuegos	0,8	0,8	0,8	0,8
Equipamiento de protección	0,65	0,65	0,65	0,65
Factor de bonificación por protección física contra fuegos (K₄)	0,41	0,41	0,41	0,41

Fuente: Elaboración propia.

Muchos incidentes producen fuegos mayores porque no es posible cortar el flujo de material hacia la sección cuando se inicia el suceso. El contar con válvulas de relevo, es una medida que puede controlar el incidente en su inicio, un sistema de relevo de emergencia garantiza un factor como se muestra en la tabla 3.12. En el caso de ocurrir una fuga de material, el sistema de ventilación pueda ser accionado a control remoto para reducir el peligro. Cuando una unidad cuenta con un tanque para vaciado de emergencia localizado fuera del área principal, se asigna un factor de 0,90.

Tabla 3.12: Aislamiento del material.

Aislamiento del material (K₅)	7 y 8	15 y 16	14	6
Sistema de válvulas	0,9	0,9	0,9	0,9
Ventilación	1	1	1	1
Factor de bonificación por aislamiento del material (K₅)	0,90	0,90	0,90	0,90

Fuente: Elaboración propia.

Por último, se analizan los factores de bonificación por lucha contra incendios. Bajo esta categoría se agrupan los diversos tipos de sistemas de inundación y rociadores con agua, suministro adecuado de agua contra incendio, disponibilidad de brigadas y equipo, espuma y otros materiales especiales para combatir incendios y sistemas de alarma o comunicación (ver tabla 3.13). De acuerdo con esto, el primer factor de reducción corresponde a sistemas de alarmas que cubran toda la sección y que sirven para pedir ayuda. Se aplica un factor de 0,9 cuando están instalados y llaman directamente a brigadas locales o municipales.

Una planta debe disponer en todo momento de suficientes extintores portátiles adecuados para el tipo de fuego que se pueda presentar, para esto se aplica un factor de 0,95. Cuando se requieren tipos especiales de extintores (ejemplo: para fuego de metales) y se dispone de una cantidad adecuada de ellos en la sección, se asigna un factor de 0,85. Si se dispone de un gasto no menor de 10 000 galones imperiales /min (2 730 m³/h) a una presión de 100 psi (7 bar manométricos), se usa un factor de reducción de 0,85. Si un edificio cuenta con un sistema normal de protección con rociadores que cubra cada piso, se aplica un factor de reducción de 0,90. Cuando las plantas cuentan con instalaciones fijas de espuma, se aplica un factor de 0,90. Cuando se tiene en el sitio de almacenamiento de compuestos para producir espuma adecuado para un combate contra incendio de 4 horas, se usa adicionalmente otro factor de 0,90. Cuando se lleva a cabo un entrenamiento regular por operadores sobre el uso de extintores portátiles, equipo de flujo y colaboración con las brigadas contra incendio, se asigna un factor de 0,90. Los incisos que no fueron mencionados no son aplicables a la planta estudio, por tanto, obtienen una bonificación correspondiente a la unidad.

Tabla 3.13: Combate contra incendios.

Equipo de intervención contra incendios (K₆)	7 y 8	15 y 16	14	6
Alarma de incendio	0,9	0,9	0,9	0,9
Extintores	0,81	0,81	0,81	0,81
Suministro de agua	0,85	0,85	0,85	0,85
Sistema de monitores o rociadores	0,90	0,90	0,90	0,90
Espuma y otros inertizantes	0,73	0,73	0,73	0,73
Brigada contra incendio	0,9	0,9	0,9	0,9

Cooperación Exterior	0,85	0,85	0,85	0,85
Ventilación de humos	1	1	1	1
Factor de bonificación por lucha contra incendio (K₆)	0,31	0,31	0,31	0,31

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Análisis y evaluación de las áreas de atmósferas peligrosas obtenidas mediante ALOHA en el área de tratamiento de crudo

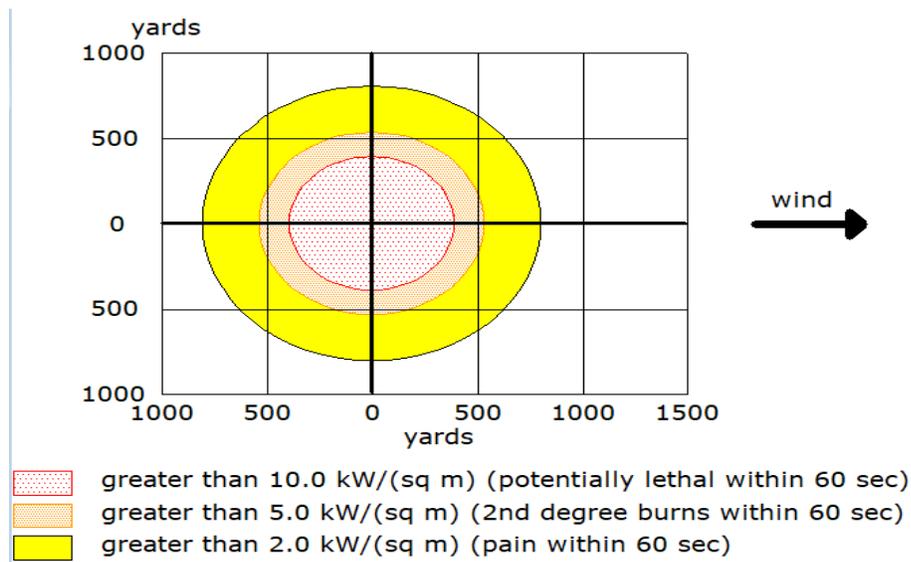
En este acápite quedan establecidas las principales consideraciones realizadas para la evaluación de las áreas de atmósferas peligrosas mediante el Software ALOHA, así como su análisis correspondiente en cada uno de los tanques ubicados en el área de tratamiento de crudo.

3.2.1 Análisis y evaluación de las áreas de atmósferas peligrosas obtenidas para el escenario Pool Fire

Este escenario se estudia para direcciones del viento de NE, que corresponde con las mayores velocidades del viento.

- Tanque 10 000 m³:

Figura 3.2: Área de radiación generada por Pool Fire.



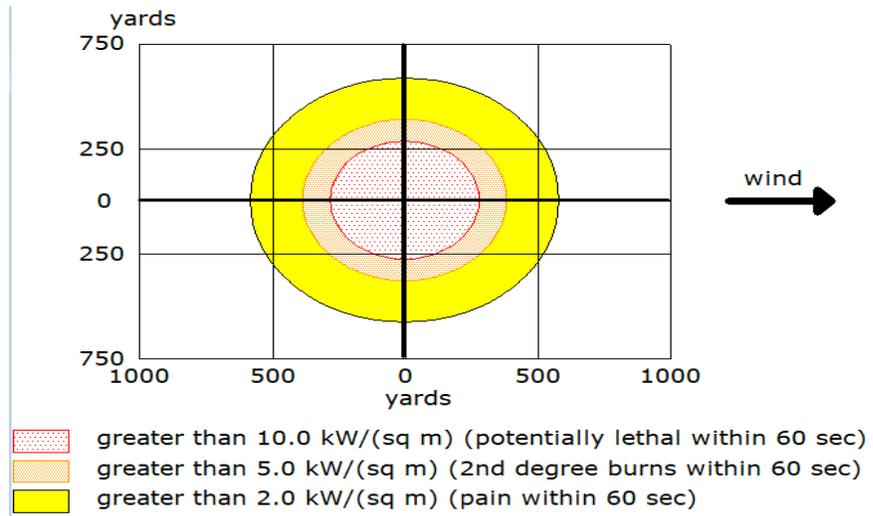
Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la ocurrencia de un Pool Fire se forman los tres niveles de afectación. La radiación en su nivel más bajo con categoría de LOC_1 bajo cuyas condiciones se percibe dolor intenso alcanza los 1 482,24 metros, pudiendo afectar incluso las áreas exteriores de la planta y pequeños asentamientos poblacionales en las afueras. Los LOC_2 con radiaciones que

provocan quemaduras de segundo grado y LOC_3 con radiaciones que resultan potencialmente letales, tienen diámetros de 997,49 y 717,80 metros respectivamente. Resulta relevante que a estas distancias toda el área de la planta de procesamiento de crudo se vería afectada por radiaciones que provocarían quemaduras severas y peligro letal para la vida.

- Tanque 5 000 m³:

Figura 3.3: Área de radiación generada por *Pool Fire*.

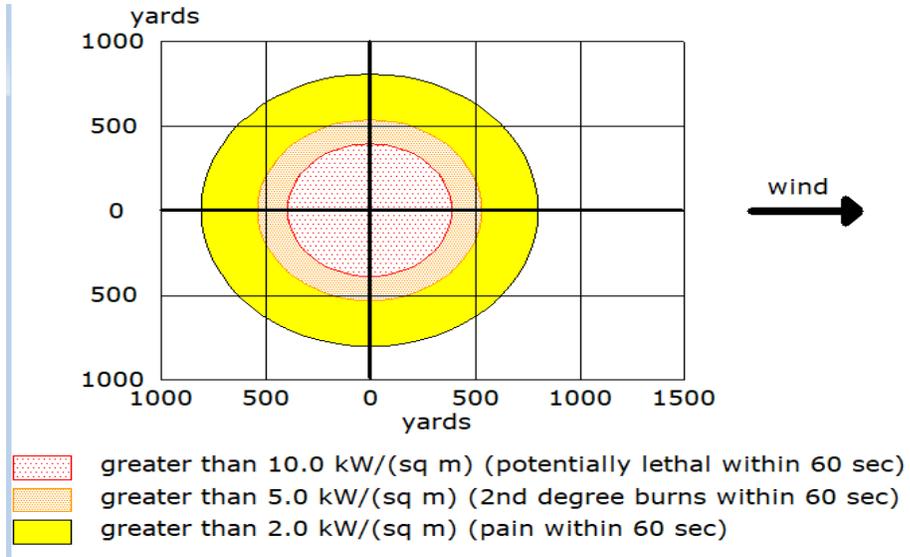


Fuente: Elaboración propia.

En este caso también se forman los tres niveles de afectación. La radiación en su nivel más bajo con categoría de LOC_1 bajo cuyas condiciones se percibe dolor intenso alcanza los 1 062,53 metros. Los LOC_2 con radiaciones que provocan quemaduras de segundo grado y LOC_3 con radiaciones que resultan potencialmente letales, tienen diámetros de 694,94 y 516,63 metros respectivamente. Resulta de importancia que a estas distancias toda el área de la planta de procesamiento de crudo se vería afectada por radiaciones que provocarían quemaduras severas y peligro letal para la vida. Además el área bajo la cual se sentiría dolor intenso con 1 062,53 metros puede afectar incluso las áreas aledañas a la planta.

- Tanque 20 000 m³:

Figura 3.4: Área de radiación generada por *Pool Fire*.

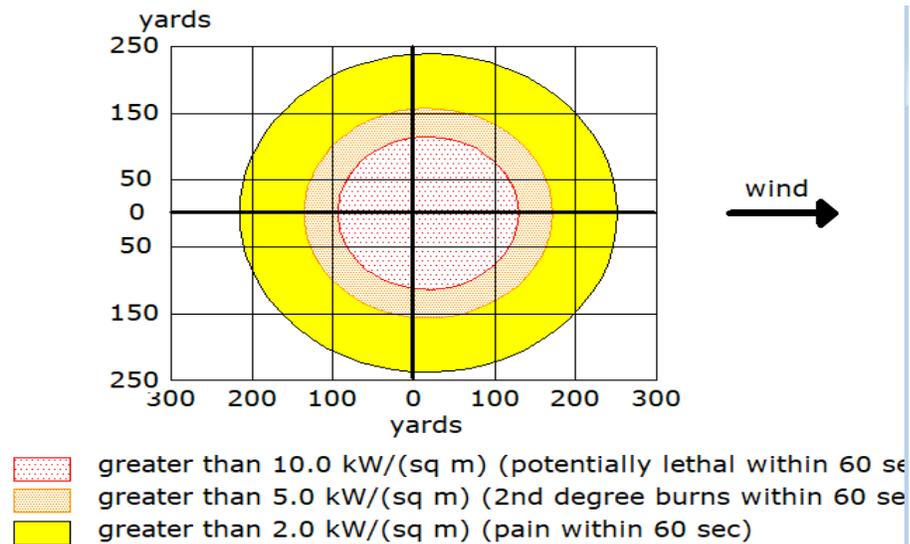


Fuente: Elaboración propia.

En este caso también se forman los tres niveles de afectación. La radiación en su nivel más bajo con categoría de LOC_1 bajo cuyas condiciones se percibe dolor intenso alcanza los 1 489,55 metros, pudiéndose afectar incluso las áreas exteriores de la planta y pequeños asentamientos poblacionales en las afueras. Los LOC_2 con radiaciones que provocan quemaduras de segundo grado y LOC_3 con radiaciones que resultan potencialmente letales tienen diámetros de 993,03 y 717,80 metros respectivamente. Resulta interesante que a estas distancias toda el área de la planta de procesamiento de crudo se vería afectada por radiaciones que provocarían quemaduras severas y peligro letal para la vida.

- Tanque de 2 000 m³:

Figura 3.5: Área de radiación generada por *Pool Fire*.



Fuente: Elaboración propia.

En este caso también se forman los tres niveles de afectación. La radiación en su nivel más bajo con categoría de LOC_1 bajo cuyas condiciones se percibe dolor intenso alcanza los 428,85 metros y los LOC_2 con radiaciones que provocan quemaduras de segundo grado y LOC_3 con radiaciones que resultan potencialmente letales, tienen diámetros de 278,89 y 210,31 metros respectivamente. Resulta que a estas distancias toda el área de la planta de procesamiento de crudo se vería afectada por radiaciones que provocarían quemaduras severas y peligro letal para la vida. Además el área bajo la cual se sentiría dolor intenso con 428,85 metros puede afectar incluso las áreas aledañas a la planta.

Tabla 3.14: Dimensiones de las áreas de atmósferas peligrosas para *Pool Fire*.

Tanques	Niveles	Diámetro (m)
2 000	LOC-1	428,85
	LOC-2	378,89
	LOC-3	210,31
5 000	LOC-1	1 062,53
	LOC-2	694,94
	LOC-3	516,63
10 000	LOC-1	1 482,24
	LOC-2	977,49
	LOC-3	717,80
20 000	LOC-1	1 489,55
	LOC-2	993,03
	LOC-3	717,80

Fuente: Elaboración propia.

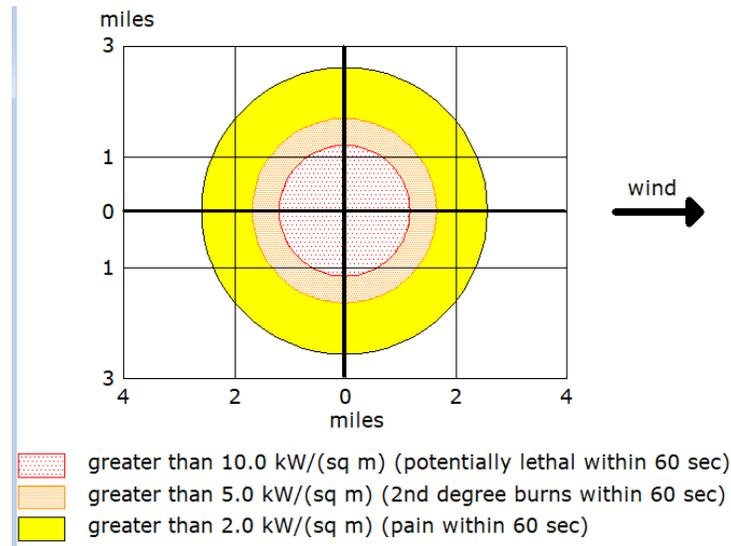
Al analizar las áreas de peligro del escenario *Pool Fire* para los distintos tanques, se puede observar en la tabla 3.14 que a medida que aumenta la masa de combustible involucrada en el escenario de riesgo, las áreas de peligro aumentan significativamente, donde la diferencia de las áreas generadas por este escenario entre el tanque más pequeño y el de mayor capacidad es de 1 060,70 metros lo que evidencia que mientras mayor sea el tanque en que ocurra el incidente mayor serán las áreas de peligro generadas. En el caso de los tanques de 10 000 y 20 000 m³ las áreas no varían ya que para este escenario el software simula hasta 5 000 toneladas. Por tanto es de esperarse que las áreas de peligro para los tanques de 10 000 y 20 000 m³ sean mayores que los reportados en la información.

3.2.2 Análisis y evaluación de las áreas de atmósferas peligrosas obtenidas para el escenario BLEVE

En este escenario se analizan las áreas de atmósferas peligrosas generadas por BLEVE ante un derrame de crudo en el área de tratamiento.

- Tanque 10 000 m³:

Figura 3.6: Área de radiación generada por BLEVE.

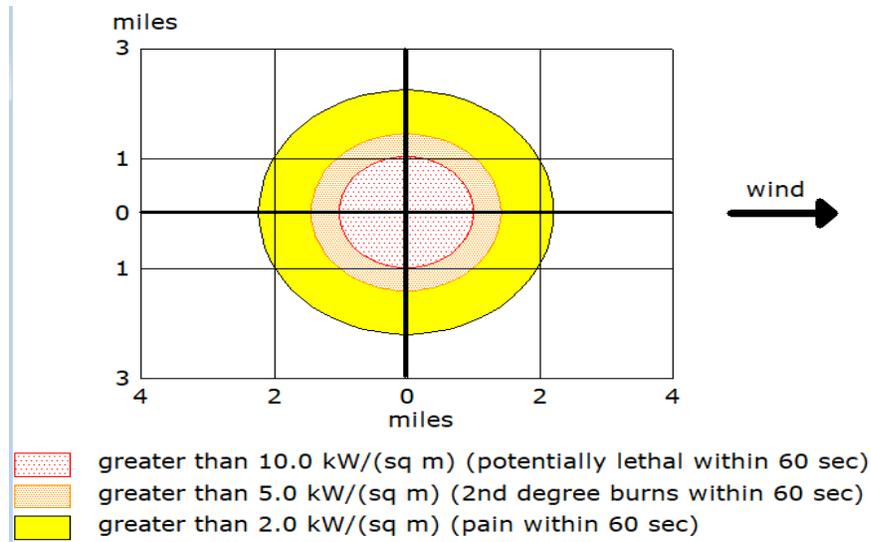


Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la ocurrencia de BLEVE se forman los tres niveles de afectación. La radiación en su nivel más bajo con categoría de LOC_1 bajo cuyas condiciones se percibe dolor intenso alcanza los 8 272,02 metros, pudiendo afectar incluso las áreas exteriores de la planta y pequeños asentamientos poblacionales en las afueras. Los LOC_2 con radiaciones que provocan quemaduras de segundo grado y LOC_3 con radiaciones que resultan potencialmente letales, tienen diámetros de 527 864,8 y 366 930,4 metros respectivamente. Resulta relevante que a estas distancias toda el área de la planta de procesamiento de crudo se vería afectada por radiaciones que provocarían quemaduras severas y peligro letal para la vida.

- Tanque 5 000 m³:

Figura 3.7: Área de radiación generada por BLEVE.

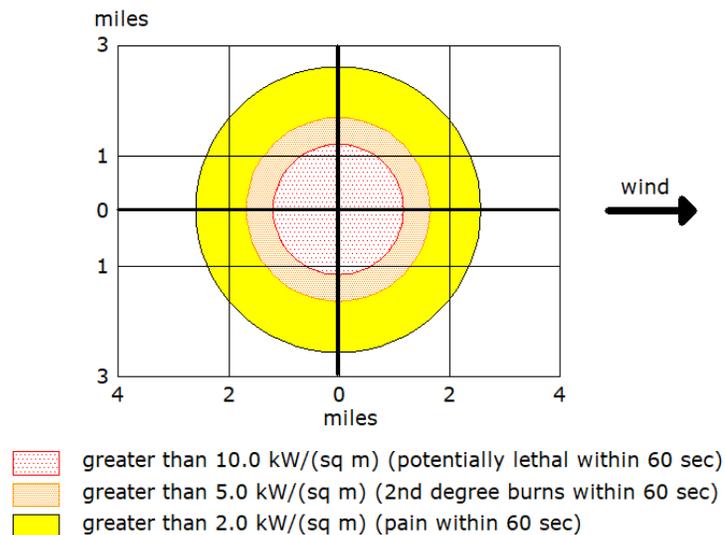


Fuente: Elaboración propia.

En este caso también se forman los tres niveles de afectación. La radiación en su nivel más bajo con categoría de LOC_1 bajo cuyas condiciones se percibe dolor intenso alcanza los 727 423,5 metros. Los LOC_2 con radiaciones que provocan quemaduras de segundo grado y LOC_3 con radiaciones que resultan potencialmente letales tienen diámetros de 460 272,4 y 3 218,69 metros respectivamente. Resulta de importancia que a estas distancias toda el área de la planta de procesamiento de crudo se vería afectada por radiaciones que provocarían quemaduras severas y peligro letal para la vida. Además el área bajo la cual se sentiría dolor intenso con 727 423,5 metros puede afectar incluso las áreas aledañas a la planta.

- Tanque 20 000 m³:

Figura 3.8: Área de radiación generada por BLEVE.

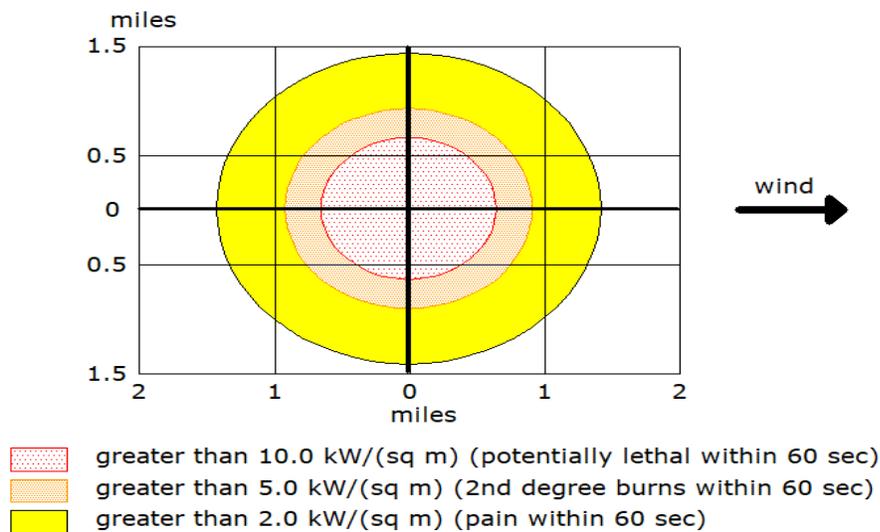


Fuente: Elaboración propia.

En este caso también se forman los tres niveles de afectación. La radiación en su nivel más bajo con categoría de LOC_1 bajo cuyas condiciones se percibe dolor intenso alcanza los 460 272,4 metros, pudiendo afectar incluso las áreas exteriores de la planta y pequeños asentamientos poblacionales en las afueras. Los LOC_2 con radiaciones que provocan quemaduras de segundo grado y LOC_3 con radiaciones que resultan potencialmente letales tienen diámetros de 28 968,2 y 205 996 metros respectivamente. Resulta significativo que a estas distancias toda el área de la planta de procesamiento de crudo se vería afectada por radiaciones que provocarían quemaduras severas y peligro letal para la vida.

- Tanque 2 000 m³:

Figura 3.9: Área de radiación generada por BLEVE.



Fuente: Elaboración propia.

En este caso también se forman los tres niveles de afectación. La radiación en su nivel más bajo con categoría de LOC_1 bajo cuyas condiciones se percibe dolor intenso, alcanza las 827 202,8 metros y los LOC_2 con radiaciones que provocan quemaduras de segundo grado y LOC_3 con radiaciones que resultan potencialmente letales tienen diámetros de 534 302,2 y 366 930,4 metros respectivamente. Resulta interesante que a estas distancias toda el área de la planta de procesamiento de crudo se vería afectada por radiaciones que provocarían quemaduras severas y peligro letal para la vida. Además el área bajo la cual se sentiría dolor intenso con 827 202,8 metros puede afectar incluso las áreas aledañas a la planta.

Tabla 3.15: Dimensiones de las áreas de atmósferas peligrosas para BLEVE.

Tanques	Niveles	Diámetro (m)
2 000	LOC-1	460 272,4
	LOC-2	28 968,2
	LOC-3	205 996

5 000	LOC-1	727 423,5
	LOC-2	460 272,4
	LOC-3	3 218,69
10 000	LOC-1	827 202,8
	LOC-2	527 864,8
	LOC-3	366 930,4
20 000	LOC-1	827 202,8
	LOC-2	534 302,2
	LOC-3	366 930,4

Fuente: Elaboración propia.

De todos los escenarios analizados el BLEVE es el escenario más peligroso y el que más área de afectación tiene. Probocando que hasta el tanque más pequeño traiga consigo afectaciones a toda la planta y a las áreas exteriores. En el caso de los tanques de 10 000 y 20 000 m³ las áreas no varían ya que para este escenario el software simula hasta 5 000 toneladas. Pero los escenarios de riesgo para esas áreas deben ser mucho mayores dado que no son 5 000 toneladas como establece el software sino que son de 9 500 y 18 500 m³.

3.3 Análisis de resultados alcanzados por *Probit*

Este método ofrece la posibilidad de evaluar los daños para la salud a aquellas personas que se encuentren inmersas en las áreas donde tienen lugar los escenarios de riesgos y en sus cercanías adyacentes, a partir de los efectos de la radiación térmica, efectos de explosión y la inhalación de sustancias tóxicas.

A continuación, se analizan solamente los efectos causados por radiación térmica y efectos de explosión. En cuanto a la inhalación de sustancias tóxicas no se analizará debido a que no se cuenta con los coeficientes para la sustancia analizada en el cálculo del Índice *Probit*.

3.3.1 Análisis de vulnerabilidad por efectos de radiación térmica

Los efectos de la radiación térmica se evalúan para los escenarios *Pool Fire* y BLEVE en el área de tratamiento de crudo.

Para actuar en consecuencia con los resultados analizados de *ALOHA* se consideran a continuación, las mismas direcciones del viento, exceptuando el escenario BLEVE dado que, este escenario no depende de la dirección del viento.

3.3.1.1 Análisis de vulnerabilidad por efecto de la radiación térmica generada por el *Pool Fire*

Tabla 3.16: Porcentaje de afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario *Pool Fire* en la dirección del viento NE.

Afectación	Dirección del viento	NE			
	Tanques (m ³)	10 000	5 000	20 000	2 000
	Distancia (m)	276,14	276,14	276,14	276,14
	Radiación (kW/ m ²)	35,7	7,84	17,8	1,33
Muerte por quemadura (con ropa de protección)	Índice Probit	6,55	3,78	6,57	-2,25
	Porcentaje de afectaciones	94	11,2	94,2	0
Muerte por quemadura (sin ropa de protección)	Índice Probit	7,41	4,63	7,42	-1,40
	Porcentaje de afectaciones	99,2	35,6	99,21	0
Quemaduras de segundo grado	Índice Probit	8,49	5,22	8,51	-1,90
	Porcentaje de afectaciones	100	58,6	100	0
Quemaduras de primer grado	Índice Probit	11,79	8,52	11,82	1,40
	Porcentaje de afectaciones	100	100	100	0,52

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar el presente escenario se nota que para una misma distancia de 276,14 m se tiene una variación en la radiación de cada tanque. Para las quemaduras de segundo y primer grado en tanques de 10 000 y 20 000 m³ se obtiene un alarmante porcentaje de afectaciones. Mientras que en el caso de muerte por quemadura más del 90 % se verá dañado. Sucediendo todo lo contrario en el tanque de 5 000 m³ ya que las afectaciones no llegan al 50 %. Es importante señalar que a los 276,14 m del origen para el tanque de 2 000 m³ desaparece la posibilidad de que existan muertes por quemaduras y quemaduras de segundo grado, teniendo además un porcentaje de afectación de 0,52 % para las quemaduras de primer grado (ver anexos 6)

3.3.1.2 Análisis de vulnerabilidad por efecto de la radiación térmica generada por el BLEVE

Tabla 3.17: Porcentaje de afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario BLEVE en la dirección del viento NE.

Afectación	Dirección del viento	NE			
	Tanques (m ³)	10 000	5 000	20 000	2 000
	Distancia (m)	54 717,7	54 717,7	54 717,7	54 717,7
	Radiación (kW/ m ²)	65,7	57,9	65,5	32,2
Muerte por quemadura (con ropa de protección)	Índice Probit	11,02	10,59	11,01	8,59
	Porcentaje de afectaciones	100	100	100	100

Muerte por quemadura (sin ropa de protección)	Índice Probit	11,87	11,44	11,86	9,44
	Porcentaje de afectaciones	100	100	100	100
Quemaduras de segundo grado	Índice Probit	13,75	13,25	13,74	10,89
	Porcentaje de afectaciones	100	100	100	100
Quemaduras de primer grado	Índice Probit	17,06	16,55	17,05	14,20
	Porcentaje de afectaciones	100	100	100	100

Fuente: Elaboración propia.

En comparación con el escenario analizado anteriormente, BLEVE presenta un aumento de radiación relevante en la media que aumenta el volumen de los tanques para una misma área de peligro. Provocando que existan altos porcentos de afectaciones para una distancia de 54 717,7 m (ver anexo 7)

3.3.2 Análisis del efecto de la sobrepresión en caso de ocurrir una explosión producto de un BLEVE

Para el análisis de vulnerabilidad por efectos de explosión se toman el escenario BLEVE en el área de tratamiento de crudo para los diferentes tanques. Sus resultados se muestran en la tabla 3.18.

Tabla 3.18: Porcentaje de afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario BLEVE

Afectación	Tanques (m³)	10 000	5 000	20 000	2 000
		Distancia (m)	54 717,7	54 717,7	54 717,7
	Sobrepresión (N/m²)	55 158,1	55 158,1	55 158,1	55 158,1
Muerte por lesiones Pulmonares	Índice Probit	-1,65	-1,65	-1,65	-1,65
	Porcentaje de afectaciones	0	0	0	0
Rotura de tímpano	Índice Probit	5,47	5,47	5,47	5,47
	Porcentaje de afectaciones	67,66	67,66	67,66	67,66
	Impulso (N.s/m²)	3 309 486	3 309 486	3 309 486	3 309 486
Muerte por impacto del cuerpo	Índice Probit	26,25	26,25	26,25	26,25
	Porcentaje de afectaciones	100	100	100	100
Lesiones por impacto del cuerpo	Índice Probit	27,7	27,7	27,7	27,7
	Porcentaje de afectaciones	100	100	100	100

Fuente: Elaboración propia.

Anteriormente, se muestra el porcentaje de afectaciones por sobrepresión en caso de ocurrencia de este suceso para una misma área de afectación. El valor que se le dio a la sobrepresión fue tomado del anexo 4 para un valor de 55 158,1 N/m².

En este caso, la muerte y las lesiones por impacto del cuerpo alcanzan valores significativos tanto en el tanque de menor área de influencia como en el de mayor área, por tanto, se verá afectada la totalidad de personas. En el caso de la rotura de tímpano se afectarán más de la mitad del personal para un valor de 67,66%. En cuanto a muerte por lesiones pulmonares, según muestra la tabla anterior, no existirán afectaciones. En el caso de los tanques de 10 000 y 20 000 m³ las distancias (m) no varían ya que para este escenario el software simula hasta 5 000 toneladas.

3.4 Conclusiones parciales del capítulo 3

1. En todos los Índices calculados existen variaciones en la categoría, desde ligero hasta muy catastrófico y muy extremo.
2. Los Riesgos más influyentes sobre los Índice equivalente de Dow (D), Índice unitario de toxicidad (U) y Índice de explosión interna (E) son los Riesgos especiales del material (M) y los Riesgos especiales del proceso (S).
3. De los dos escenarios analizados por *ALOHA* el de mayor área de afectación es el generado por el escenario BLEVE, provocando que hasta el tanque más pequeño (2 000 m³) traiga consigo daños a toda la planta y a las áreas exteriores.
4. De todos los escenarios analizados por *Probit* las mayores afectaciones son las que desencadena BLEVE

Conclusiones

1. Todos los Índices calculados se encuentran con variaciones en la categoría, desde ligero hasta muy catastrófico y muy extremo.
2. Los Riesgos más influyentes sobre los Índices equivalente de Dow (D), Índice unitario de toxicidad (U) y Índice de explosión interna (E) son los Riesgos especiales del material (M) y los Riesgos especiales del proceso (S).
3. Para el escenario *Pool Fire* la diferencia de las áreas generadas entre el tanque más pequeño y el de mayor capacidad es de 1 060 metros producto a que mientras mayor sea el tanque en que ocurra el incidente mayor serán las áreas de peligro generadas.
4. Las mayores áreas de peligro son las generadas por la BLEVE en los tanques ubicados el área de tratamiento de crudo.
5. El Software *ALOHA*, además de mostrar las áreas de atmósferas peligrosas, complementado con las ecuaciones *Probit*, permite determinar con exactitud las afectaciones por efecto de radiación térmica y sobrepresión.

Recomendaciones

1. Capacitar a todo el personal de la EPEPC sobre la base de los resultados obtenidos en la presente investigación.
2. Evaluar los efectos de la toxicidad de las sustancias involucradas en el proceso sobre las personas.
3. Analizar para otros valores de sobrepresión en caso de ocurrencia de una explosión producto de un BLEVE.

Bibliografía

1. Ahmadi, O., Mortazavi, S.B., Pasdarsahri, H., Mahabadi, H.A., Sarvestani, K. (2019). Modeling of boilover phenomenon consequences: Computational fluid dynamics (CFD) and empirical correlations. *Process Safety and Environment Protection*, vol.129, pp 25-39. doi: 10.1016/j.psep.2019.05.045.
2. Arencibia, E. (2018). Evaluación de la capacidad de venteo de válvulas de presión y vacío y del índice global de riesgos MOND/ICI en un tanque de tratamiento de petróleo de 10 000 m³. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.
3. Atkinson, G. (2017). Development of Heavy vapour Clouds in very low wind speeds. Elsevier, pp 162-172. doi: 10.1016/j.jlp.2017.04.011.
4. Avilés, D., y Rivera, M.A. (2018). Dispersión of air pollutants by fixed sources of combustion. España.
5. Botta, N.A. (2012). Medición de explosividad. Red Proteger.
6. Boza, Y.C. (2020). Predicción de la frecuencia del efecto dominó debido a posibles accidentes de incendio y explosión a partir de un criterio unificado en la Estación Cabecera del Oleoducto de Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.
7. Carol, S. (2001). A nine methodology for predicting the severity of industrial accidents. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
8. Carrillo, G., y Guerrero, P. (2013). Cálculo de propiedades del gas natural. Trabajo especial de grado en opción al título de Ingeniero Químico. Maracaibo.
9. Casal, J [et. al]. (2001). Análisis del Riesgo en Instalaciones Industriales, Alfaomega S.A., Bogotá (Colombia).
10. Casal, J. (2002). Análisis del riesgo en instalaciones industriales. España: UPC.
11. Casal, J. (2018). Uncertainty in the analysis of the risk of BLEVE-Fireball in process plants and in transportation. Centre for Studies on Technological Risk (CERTEC) EEBE, Universitat Politècnica de Catalunya. 28p.
12. Casal, J., Montiel, H., Planas, E., y Vilchez, J. (2002). Análisis del riesgo en instalaciones industriales (2nd ed.). Ediciones UPC. 362 p.
13. Castro, D., Orozco, J., y Curiel, L. (2013). Monografía. Evaluación de atmósferas peligrosas en la zona industrial de Matanzas ante posibles accidentes químicos. Universidad de Matanzas.

14. CITGO. (2017). Ficha de datos de seguridad de nafta.
15. Cruz, L.H. (2013). Evaluación de áreas de atmósferas peligrosas en la Planta Energas S.A Varadero. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.
16. Dirección General de Protección Civil y Emergencias. (2016). Métodos cualitativos. España.
17. Domínguez, J.R. (2014). Análisis cuantitativo de riesgos en el ámbito de la protección civil: aplicación a una instalación de almacenamiento de productos químicos. Trabajo de fin de grado. Universidad de Sevilla. España.
18. Dueñas, J. (2018). Evaluación del impacto económico, ambiental y humano de posibles accidentes provocados por incendio y explosión y su efecto continuado en la Base de Crudos de la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.
19. EPA. (2016). ALOHA Software. Disponible en: www.epa.gov/cameoaloha-software.
20. EPA. U.S. Environmental Protection Agency. (2016). Obtención de modelos de dispersión. Disponible en: www.epa.gov/ttn/scram.
21. ESMAX. (2020). Hoja de datos de seguridad de petróleo.
22. Ferrero. (2006). Incendios de hidrocarburos: Estudio de la formación y evolución del boil over de capa fina. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Cataluña.
23. Gabarrel, X. (2008). Evaluación y prevención de riesgos industriales en Centroamérica. Documenta Universitaria Girona. España.
24. GREENSPEACE. (2016). Gas natural. Briefing. Disponible en: www.greenspeace.org.
25. Guillén, E. (2020). Análisis de riesgos en el área de almacenamiento de gas licuado del petróleo en la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas y su entorno. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.
26. Gullick, D., Blackburn, G.A., Whyatt, J.D., Vopenka, P., Murray, J., y Abbatt, J. (2019). Tree risk evaluation environment for failure and limb loss (TREEFALL): An integrated model for quantifying the risk of tree failure from local to regional scales. *Computers, Environment and Urban Systems*. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2019.02.001.
27. Gyenes, Z., Wood, M., y Struckl, M. (2017). Handbook of Scenarios for Assessing Major Chemical Accident Risks. JRC Science Hub, doi: 10.2760/884152.
28. Hendershot, D.C. (1996). Risk guidelines as a risk management tool. *Process Safety Progress*. AIChE

29. Hernández, M.C. (2017). Determinación y Evaluación de Riesgos en la Planta de Procesamiento de Crudo de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.
30. Hristov, J. (2016). An Inverse Stefan Problem Relevant to Boilover: Heat Balance Integral Solutions and Analysis. *Thermal Science*, vol.11, pp 141-160. doi: 10.2298/TSCI0702141H.
31. Juárez, M.A. (2014). La metodología HAZOP aplicada al análisis de riesgos. Tesis en opción al título de Ingeniero en Petróleo. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
32. López, D.C. (2006). Análisis de riesgo tecnológico de la unidad de destilación de crudo U-200 asociado a los eventos amenazantes en la torre atmosférica T-201 de la gerencia del complejo Barrancabermeja-ECOPETROL S.A. Especialización en Ingeniería Ambiental. Bucaramanga.
33. López, I. (2010). Evaluación de atmósferas peligrosas en la Zona Industrial de Matanzas ante posibles accidentes químicos. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.
34. Manual de usuario del software ALOHA. (2007). Disponible en página Web de la facultad Química Mecánica. On line. www.fiqm.umcc.cu.
35. Martínez, J.J. (2016). Identificación, análisis y administración de riesgos. Soluciones Proactivas.
36. Mijailov, (1996). Cálculo y diseño de máquinas y aparatos de la industria química.
37. Mishra, B., Wehrstedt, K., y Krebs, H. (2015). Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE) of peroxy-fuels. *Experiments and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation*, pp 149-152. doi: 10.1016/j.egypro.2015.02.082.
38. NASA. (2002). *Fault Tree Analysis: Concepts and Applications*.
39. NASA. (2002). *Fault Tree Handbook with Aerospace Applications*. Versión 1.1.
40. NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. U.S. Environmental Protection Agency. *ALOHA Examples Scenarios*. (2016).
41. Nolan, D.P. (2011). *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities*. Second edition. Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK.
42. NSW. New South Wales. (2011). *HAZOP Guidelines*. Hazardous Industry Planning Advisory. Disponible en: www.planning.nsw.gov.au.

43. Oilfield Review. (2015). Yacimientos de petróleo pesado. Disponible en: Oilproduction.net.
44. Orozco, J. (2015). Guía para la caracterización de las sustancias. Disponible en: Dpto. Química e Ingeniería Química. Facultad de Ciencias Técnicas. Universidad de matanzas Camilo Cienfuegos.
45. Parrales, J.M. (2011). Prevención de incendios en tanques de almacenamiento de petróleo crudo. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
46. R.H., P. (1997), Perry's Chemical Engineers Handbook, McGraw-Hill, Inc., New York (USA).
47. Ramírez. (2016). Reglamento Tecnológico actualizado de la Planta de Procesamiento de Crudo. Disponible en: PPC.
48. Rausand M. (2015). HAZOP. Hazard and operability study. Department of Production and Quality Engineering Norwegian. University of Science and Tecnology.
49. Rodríguez, D., Quintero, A., González, Y., Cuesta O., y Sánchez, A. (2014). Variación de la estabilidad y altura de la capa de mezcla en la ciudad de Pinar del Río: su relación con condiciones sinópticas. Revista Brasileira de Meteorología.
50. Ruano, R. (2013). Ingeniería Energética General. Disponible en: www.energianow.com.
51. Sánchez, M. (2016). Análisis de riesgos industriales en plantas químicas y petroleras. Método HAZOP. XVI Edición. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad de Castilla-La Mancha.
52. Santos, G.C. (2010). Análisis del riesgo individual: Explosión de un ducto de gas natural. Tesis presentada en opción al título de Maestro en Ciencias en Ingeniería de Sistemas. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad Profesional Zacatenco Adolfo López Mateos.
53. Schlumberger. (2015). Heavy Oil Exploitation and fluid Characterization. Disponible en: PPC.
54. U. S. Oil and Refining Co. Material Safety. Data Sheet. (2009).
55. Wells, Geoff. (2003). Majors Hazards and their management. Gulf Publishing Company. Houston, Texas.
56. Yao, Y., Zhen L. Y., Ingason, H., y Cheng, X. (2019). Scale effect of mass loss rates for pool fires in an open environment and in tunnels with wind. Fire Safety Journal. Science Direct, vol. 105, pp 41-50. doi: doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.02.004.

Anexos

Anexo 1: Vista aérea de la EPEP-Centro



Anexo 2: Factores de penalización

a) Riesgos generales del proceso (P)

Riesgos generales del proceso (P)	RANGO
Manipulación y cambios físicos	10 a 60
Reacciones continuas simples	25 a 60
Reacción batch	10 a 60
Multiplicidad de reacciones	25 a 75
Desplazamiento del material	0 a 150
Contenedores transportables	10 a 100
Factor de Riesgos Generales del Proceso (P)	

b) Riesgos especiales del proceso (S)

Riesgos especiales del proceso (S)	RANGO
Presión baja ($P < 15$ psi)	50 a 150
Presión alta (p)	0 a 150
Temperatura baja (CS $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	0 a 30
Temperatura baja (CS a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	30 a 100
Temperatura baja (Otros materiales)	0 a 100
Temperatura alta (Material inflamable)	0 a 35
Temperatura alta (Resistencia del material)	0 a 100
Corrosión y erosión	0 a 400
Fugas por juntas y cierres	0 a 60
Vibración y fatiga	0 a 100
Proceso/Reacciones difíciles de controlar	20 a 300
Operación cerca/en el rango de inflamabilidad	25 a 450
Riesgo de explosión superior al valor medio	40 a 100
Riesgo de explosión por polvo o neblina	30 a 70
Oxidantes potentes	0 a 100
Sensibilidad del proceso a la ignición	0 a 400
Riesgo de electricidad estática	10 a 200
Factor de Riesgos Especiales del Proceso (S)	

c) riesgos asociados a la cantidad (Q)

Riesgos asociado a las cantidades (Q)
Cantidad total de material (K) [t]
Factor de Cantidad (Q)

Anexo 2: Factores de penalización (Continuación).

d) Riesgos de implantación (L)

Riesgos asociados a la distribución en planta (L)	
Altura (H) [m]	
Área de trabajo (N) [m ²]	
	RANGO
Diseño de la estructura	0 a 200
Efecto domino	0 a 250
Bajo tierra	50 a 150
Superficie de drenaje	0 a 100
Otros	50 a 250
Factor de Riesgos asociados a la Distribución en Planta (L)	

e) Riesgos graves para la salud (T)

Riesgos asociados a daños graves a la salud (T)	RANGO
Efectos sobre la piel	0 a 300
Efectos por inhalación	0 a 150
Factor de Riesgos Asociados a Daños Graves a la Salud (T)	

Anexo 3: Factores de bonificación

a) Riesgos asociados a la contención

Riesgos asociados a la contención (K₁)	RANGO
Tanques a presión	0.8 a 0.9
Tanques verticales	0.8 a 0.9
Tuberías de transferencia	0.6 a 0.9
Otras barreras adicionales	0.45 a 0.9
Detección y control de fugas	0.7 a 0.95
Venteos de emergencia	0.9 a 0.95
Factor de Bonificación por Contención (K₁)	

b) Riesgos asociados al Control de Procesos

Control de proceso (K₂)	RANGO
Sistema de alarmas	0.9 a 0.95
Generadores de emergencia	0.9
Sistema de enfriado de emergencia	0.9 a 0.95
Sistema de gases de inertización	0.8 a 0.95
Estudio de actividades peligrosas	0.7
Paradas de seguridad reguladas	0.7 a 0.9
Control automático por ordenador	0.85 a 0.96
Protección contra reacciones fuera de control	0.8 a 0.95
Procedimientos normalizados de operación	0.75 a 1
Vigilancia de la planta	0.9 a 0.97
Factor de Bonificación por Control del Proceso (K₂)	

c) Actitud frente a temas de seguridad

Actitud frente a temas de seguridad (K₃)	RANGO
Implicación de la gerencia	0.9 a 0.95
Entrenamientos de seguridad	0.85 a 0.95
Procedimientos de mantenimiento y seguridad	0.8 a 0.97
Factor de Bonificación por Actitud por la Seguridad (K₃)	

Anexo 3: Factores de bonificación (Continuación).

d) Protección contra fuego

Protección física contra fuegos (K₄)	RANGO
Protección de la estructura	0.8 a 0.98
Muros cortafuegos	0.8 a 0.97
Equipamiento de protección	0.5 a 0.97
Factor de Bonificación por Protección Física Contra Fuegos (K₄)	

e) Aislamiento del material

Aislamiento del material (K₅)	RANGO
Sistema de válvulas	0.65 a 0.9
Ventilación	0.9
Factor de Bonificación por Aislamiento del Material (K₅)	

f) Combate contra incendios

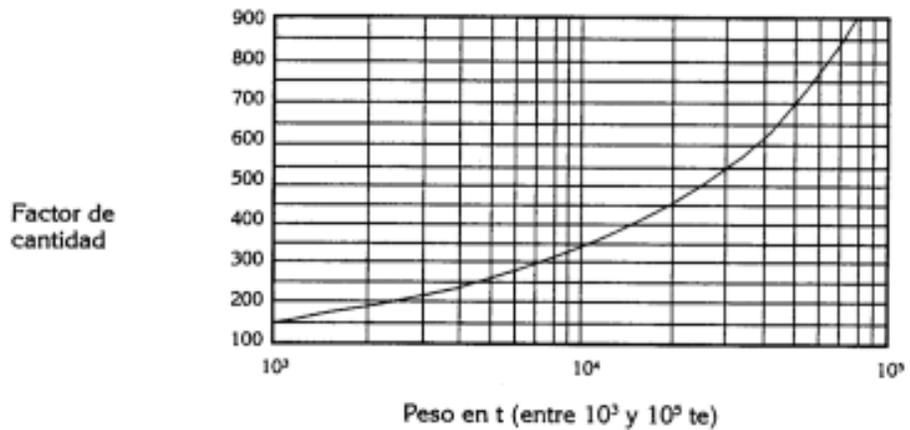
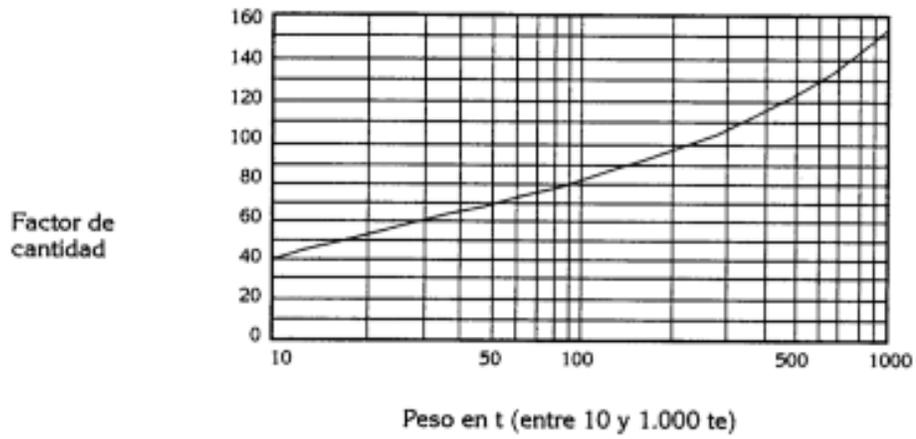
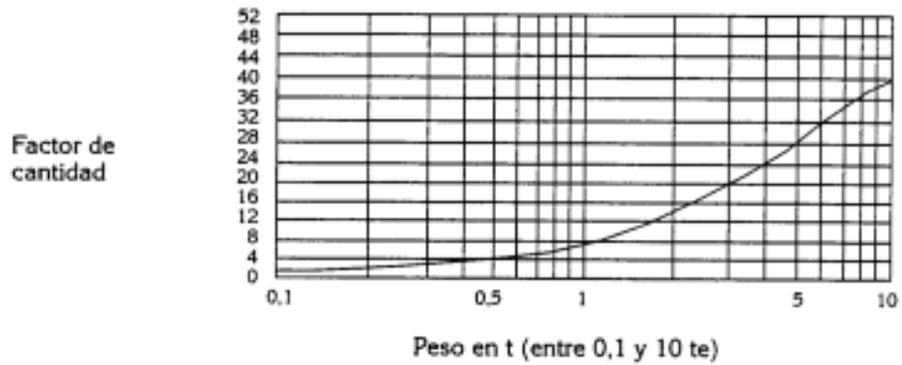
Equipo de intervención contra incendios (K₆)	RANGO
Alarma de incendio	0.9 a 0.98
Extintores	0.85 a 0.95
Suministro de agua	0.75 a 1
Sistema de monitores o rociadores	0.87 a 0.97
Espuma y otros inertizantes	0.7 a 0.9
Brigada contra incendio	0.7 a 0.9
Cooperación Exterior	0.85 a 0.9
Ventilación de humos	0.8 a 0.9
Factor de Bonificación por Lucha Contra Incendio (K₆)	

Anexo 4: Efecto sobrepresión sobre las estructuras

Sobrepresión (psi)	Daño
0,005	Se escucha un sonido que denota la ocurrencia de un suceso inusual.
0,02	Ruido molesto
0,03	Rotura ocasional de ventanas de vidrio bajo tensión
0,04	Ruido fuerte
0,10	Rotura de ventanas pequeñas bajo tensión
0,15	Presión típica de rotura de cristales
0,20	Umbral para la pérdida temporal de la audición
0,30	95% de probabilidad de que no ocurran serios daños
0,40	Daños estructurales limitados menores como rotura de ventanas, rotura de losas y crujidos de los techos y las paredes
0,70	Daños menores a la estructura de las casas
1,0	Demolición parcial de las casas
1,2	40 % de daño en las estructuras
2	Colapso parcial de las paredes y los techos
3	Edificios con marcos de acero torcidos y empujados fuera de sus lugares.
3,3	80 % de daños en las estructuras
3-4	Ruptura de los tanques de almacenamiento de combustibles.
5	Rotura de postes de electricidad y teléfono
5-7	Destrucción completa de las estructuras cercanas
7	Se vuelcan los carros de tren cargados
8	Destrucción de edificios
10	100 % de daños

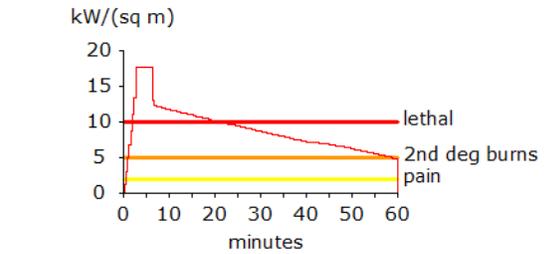
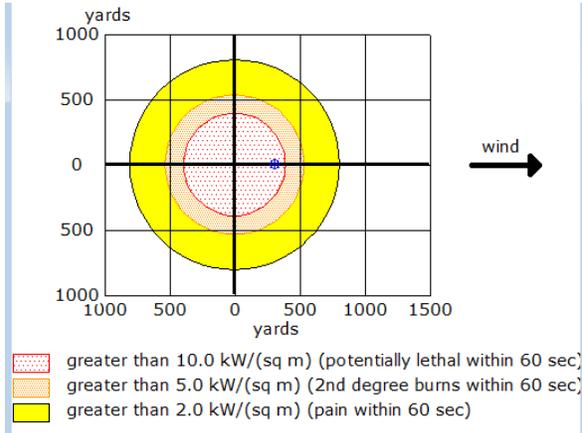
Fuente: Wells, (2003).

Anexo 5: Curvas para la determinación del Factor de cantidad para el Método del índice de *Mond*



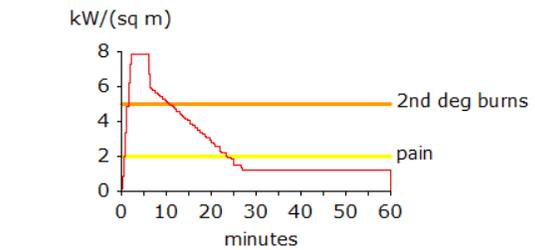
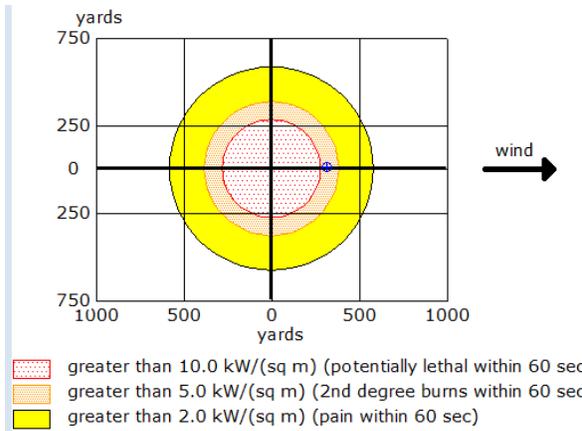
Anexo 6: Comportamiento de la radiación originada por un *Pool Fire* en el área de tratamiento de crudo para los distintos tanques.

• Tanque 10 000 m³



At Point: Downwind: 302 yards Off Centerline: 8.62 yards

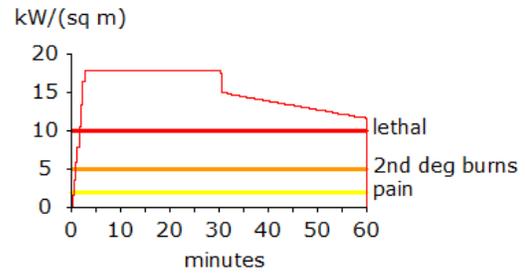
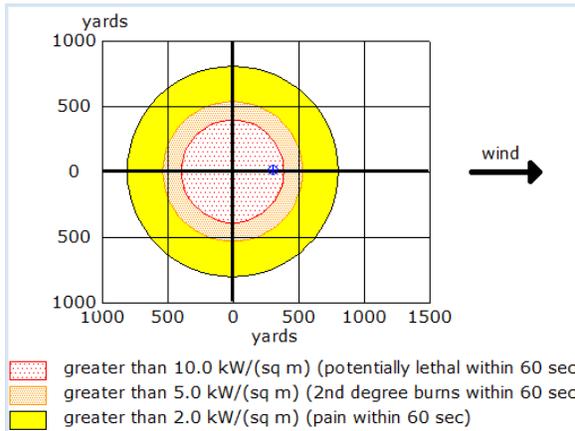
• Tanque 5 000 m³



At Point: Downwind: 312 yards Off Centerline: 13.0 yards

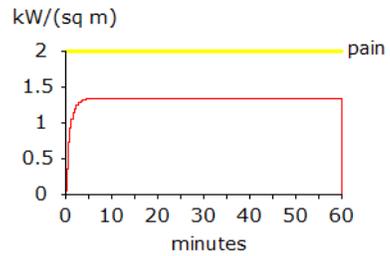
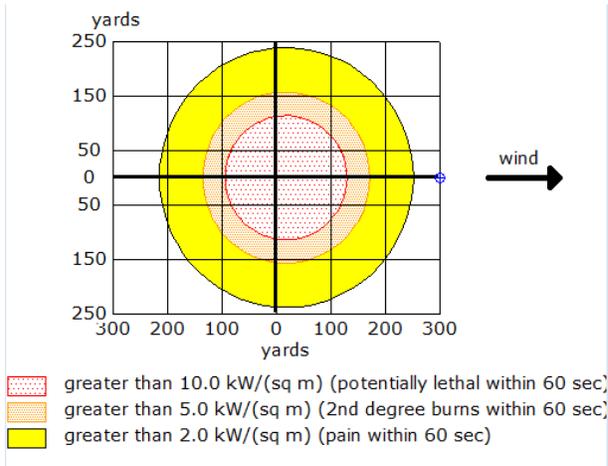
Anexo 6: Comportamiento de la radiación originada por un *Pool Fire* en el área de tratamiento de crudo para los distintos tanques (Continuación).

• Tanque 20 000 m³



At Point: Downwind: 302 yards Off Centerline: 17.2 yards

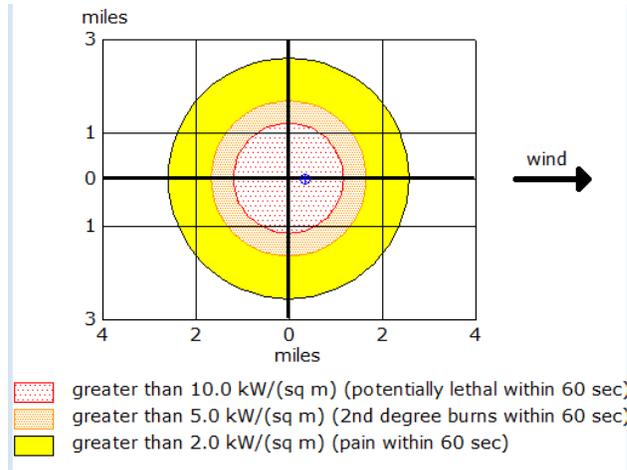
• Tanque 2 000 m³



At Point: Downwind: 300 yards Off Centerline: 0 yards

Anexo 7: Comportamiento de la radiación originada por un BLEVE en el área de tratamiento de crudo para los distintos tanques.

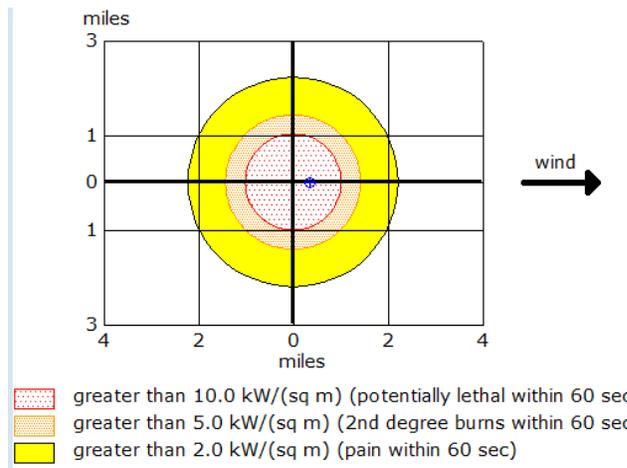
- Tanque 10 000 m³



Max Thermal Radiation: 65.7 kW/(sq m)

At Point: Downwind: 0.34 miles Off Centerline: 0 miles

- Tanque 5 000 m³

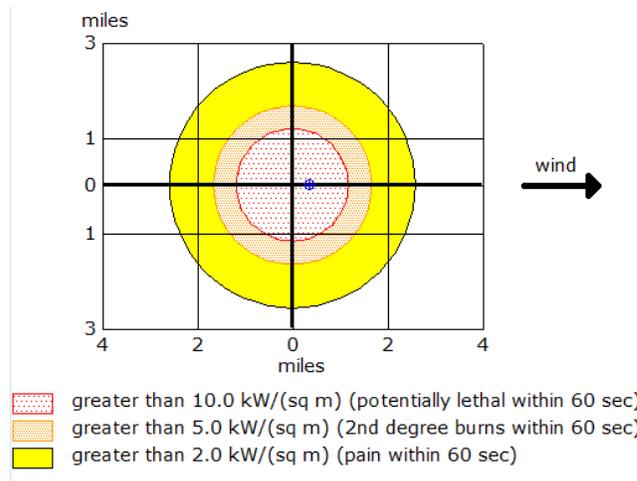


Max Thermal Radiation: 57.9 kW/(sq m)

At Point: Downwind: 0.34 miles Off Centerline: 0 miles

Anexo 7: Comportamiento de la radiación originada por un BLEVE en el área de tratamiento de crudo para los distintos tanques (Continuación).

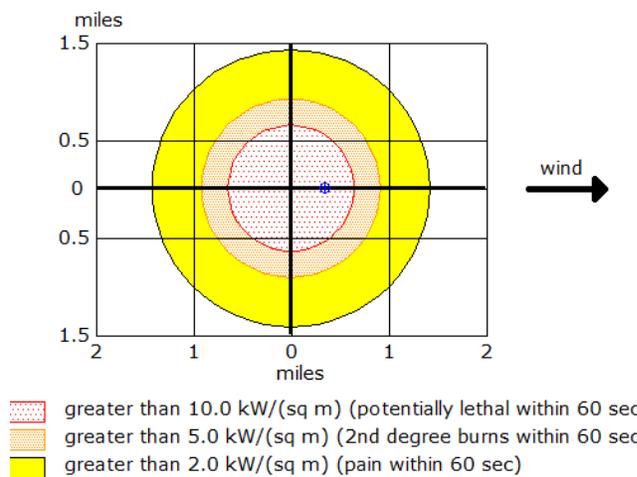
- Tanque 20 000 m³



Max Thermal Radiation: 65.5 kW/(sq m)

At Point: Downwind: 0.34 miles Off Centerline: 0.026 miles

- Tanque 2 000 m³



Max Thermal Radiation: 32.2 kW/(sq m)

At Point: Downwind: 0.34 miles Off Centerline: 0.013 miles