

**UNIVERSIDAD DE MATANZAS**

**Sede: "Camilo Cienfuegos"**

**Facultad de Ciencias Técnicas**

**Departamento de Química**



**TRABAJO DE DIPLOMA**

Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico.

***Título:*** " Evaluación de riesgos por incendio, explosión y accidente tóxico en el área de venta de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP-Centro)".

***Autora:*** Krislayne Gutiérrez Puentes

***Tutor:*** Ing. Jeniffer Núñez Bouza

**Matanzas. Cuba.**

**2022**

**Declaración de autoridad .**

Yo, Krislayne Gutiérrez Puentes , declaro que soy la única autora de este Trabajo de Diploma y lo pongo a disposición de la Planta de Procesamiento de Crudo 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, siempre que se respeten mis derechos sobre el mismo.

---

Krislayne Gutiérrez Puentes.



*Porque en la vida tropezarse está permitido y levantarse es obligatorio.*

*Megan Maxwell*

*No hay un camino real hacia la ciencia y solo aquellos que no temen la agotadora subida de sus empinados senderos tienen el chance de obtener sus luminosas cumbres.*

*Karl Marx*

## *Dedicatoria.*

### *A mis padres:*

Por ser la razón de mi vida y mi ejemplo cada día, por ser mi soporte y mis fuerzas para seguir adelante en todos los momentos. Por ser ejemplos de voluntad, sacrificio y optimismo durante toda mi trayectoria estudiantil y mi vida en general. A ustedes dedico este logro tan esperado. El cual es de ustedes casi tanto como mío.

### *A mi hermana:*

Por estar siempre al tanto de mis resultados y de mi bienestar. Por disfrutar de todos mis logros y estar orgullosa de mí. Por ser mi segunda madre, mi hermanita todo poderosa. Por todos sus gestos de amor y su preocupación por lograr mi satisfacción académica y siempre decir que un tres vale más que un cinco. Mi hermana: te regalo estas líneas especialmente a ti, aunque ahora estemos lejos siempre te tengo presente. También dedico este triunfo a la familia hermosa que has creado y me has regalado, la niña de mis ojos: Adianet, tía te quiere mucho.

### *A mi novio Jadiel:*

Por ser mi amigo incondicional y mi confidente. Por aguantar mis malas caras cuando estaba estresada. Por ser mi paño de lágrimas cuando creía que salía mal en las pruebas y siempre decir que yo aprobaba. Por estar noches en vela a mi lado mientras yo estudiaba. Por cuidar a los míos mientras yo no estaba. Porque nunca dudaste de mí. Te amo.

*A Adianet, mi tipolinatuchi* por alegrarme los días con tus ocurrencias y tu inocencia infantil. Porque me has enseñado a ser una buena tía y una madre aceptable. Por ser la luz de mis ojos te dedico este logro.

A mi abuela Fide, a mis químicas del 143 y a mi familia en general.

## *Agradecimientos.*

A mi papá **Ángel** y mi mamá **Carmita**, pero en especial a mi mami querida por ser mi más grande apoyo. Por impulsarme a ser una mejor persona, preparada, para enfrentar los obstáculos de la vida. Por siempre brindarme consejos cuando más los necesitaba, por ser mis ejemplos a seguir en la vida y siempre estar a mi lado en cualquier circunstancia de la vida. Eres lo que más quiero en esta vida junto con mi hermana Lisbet y mi sobrina Adianet. Considero que tengo la mejor familia del mundo.

**A mi novio Jadiel** por aguantarme durante estos años de carrera muy estresantes y siempre brindarme su apoyo y comprensión. Por siempre sacarme una sonrisa hasta en los peores momentos por todo muchas gracias.

**A mis suegros María y Frank** por escucharme cuando me quejaba y siempre darme consejos. Gracias por su comprensión y la ayuda que siempre me han brindado, por estar constantemente pendientes de mi integridad. Por tener un espacio en sus vidas para mí. Ojalá algún día pueda retribuirles sus gestos de amor.

**A mis abuelas** en especial a ti mi **Fide** que me enseñaste lo que era el amor de una abuela, aunque la vida no permitió que estés conmigo en estos momentos sé que siempre me estas cuidando solo deseo que estés donde estés seas feliz y nunca te olvides que te extrañamos y queremos.

**A mis químicas del 143**, mis ingenieras químicas que hoy junto conmigo cumplen sus sueños y sus metas: Kiara, mi madre de beca ella siempre sabe dónde estaban mis cosas. Marisleidis, por siempre estar peleando, pero era la más sentimental. Nainelys, tengo que agradecer que estés en mi vida, la universidad no hubiera sido lo mismo sin ti. Eres y serás mi esposa de beca. A todas les debo muchos momentos felices, de preocupación, de horas de desvelo por una prueba, de llantos, de lamentos, de disgusto, de consejos, por todo muchas gracias, pero en especial a mi Marianghelena por ser más que mi amiga, por ser mi confidente, como una madre para mí, por siempre escucharme, aunque fuera tarde en la noche y nunca decir que la molestaba y le perjudicara sus horas de ocio. A todas de una forma u otra les debo y agradezco lo que logro hoy.

A mi familia en general por apoyarme y confiar en mi a todos muchas gracias.

**A mi tutora Jeniffer**, por dedicar su tiempo para salir adelante con este trabajo de investigación en estos tiempos difíciles por la que atravesamos. Aún más agradecida por

tener tanta paciencia conmigo, pero mucha paciencia. Más que una tutora, se ha convertido en una amiga.

***A todos mis maestros y profesores:***

Gracias por contribuir a mi formación como estudiante durante esta larga carrera, gracias a todos los que han confiado en mí y me han inspirado seguridad, gracias también a los que no confiaron; eso me sirvió para esforzarme más y demostrarles que yo sí puedo. Especialmente a la profe Yamilet y al profe Santiago por saber ofrecer durante una clase excelentes conocimientos, experiencias y muy buenos momentos.

A las personas que por una u otra razón no se encuentran en mi vida, pero de alguna manera me han marcado y me han hecho recapacitar, madurar y esforzarme para ser cada día una mejor persona a todos muchas gracias.

## **Resumen.**

El presente trabajo se realiza en la Planta de Procesamiento de Crudo correspondiente a la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro. En él se determinan los escenarios de riesgos que pueden ocurrir en los tanques de almacenamiento de crudo y nafta del Área de Venta de la empresa. Se aplica un Índice de Mond obteniéndose como resultado que los índices de Fuego (F), Explosión interna (E), Explosión Aérea (A) y el Factor Global de Riesgo (R) se reducen entre un 50 y 99%, de forma tal que no representan un peligro para la unidad ni amenaza para el personal que allí radica, sin embargo, el riesgo de accidente tóxico existe, es muy alto y está latente en la unidad. Además, se evalúan mediante el Software ALOHA las áreas de atmósferas peligrosas para los distintos escenarios siendo el de mayor área la BLEVE. Se determinan las afectaciones humanas mediante Probit por efectos de radiación y sobrepresión.



**Abstract.**

The present work is carried out in the Crude Processing Plant corresponding to the Company of Drilling and Extraction of Petroleum of the Center. It determines the risk scenarios that can occur in the crude and naphtha storage tanks of the company's Sales Area. A Mond index is applied, obtaining as a result that the Fire (F), Internal Explosion (E), Air Explosion (A) indices and the Global Risk Factor (R) are reduce between 50 and 99%, in such a way that they don't represent a danger to the unit or a threat to the personnel that works there, however, the risk of a toxic accident exists, is very high and is latent in the unit. In addition, the areas of dangerous atmospheres for the different scenarios are evaluated using the ALOHA Software, with the largest area being BLEVE. Human affectations are determinated by Probit for effects of radiation and overpressure.

## Contenido

<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>Capítulo I: Análisis bibliográfico</b> .....	<b>4</b>
1.1 Características y propiedades físico – química de las sustancias.....	4
1.1.1 Petróleo.....	4
1.1.2 Nafta .....	7
1.2 Accidentes mayores. Escenarios de riesgo más recurrentes .....	8
1.2.1 Incendios.....	8
1.2.2 Explosiones .....	10
1.2.3 Nubes toxicas. ....	12
1.3 Análisis de riesgo industrial.....	14
1.3.1 Técnicas de análisis de riesgo.....	15
1.3.2 Evaluación de atmósferas peligrosas. Softwares más utilizados. ....	17
1.3.3 Método para la determinación de afectaciones humanas. Ecuaciones “Probit” .....	18
1.4 Conclusiones parciales. ....	19
<b>Capítulo 2 : Materiales y Métodos</b> .....	<b>20</b>
2.1 Descripción del proceso tecnológico. ....	20
2.2 Caracterización de las sustancias objeto de estudio. ....	22
2.3 Descripción de las técnicas de análisis y evaluación a utilizar.....	24
2.3.1 Metodología para el cálculo del Índice de Mond. ....	24
2.3.2 Software ALOHA. Características fundamentales. ....	32
2.3.3 Método para la determinación de afectaciones humanas. Ecuaciones “Probit”	36
<b>Capítulo 3: Análisis de resultados</b> .....	<b>39</b>
3.1 Resultado de la caracterización de las sustancias involucradas.....	39
3.1.1 Petróleo.....	39
3.1.2 Nafta .....	41

3.2 Análisis de los resultados obtenidos del cálculo del Índice de Mond. ....	43
3.2.1 Análisis de los resultados obtenidos del cálculo del Índice de Mond para el tanque de almacenamiento de petróleo en calidad. ....	43
3.2.2 Análisis de los resultados obtenidos del cálculo del Índice de Mond para el tanque de almacenamiento de nafta. ....	59
3.2 Análisis de resultados del software ALOHA. ....	71
3.2.1 Estimación del alcance del escenario charco de fuego ( <i>Pool Fire</i> ).....	73
3.2.2 Estimación del alcance de los escenarios explosión de una nube de vapor. ...	75
3.2.3 Estimación del alcance de los escenarios BLEVE. ....	76
3.3 Análisis de los resultados de las afectaciones humanas según las ecuaciones Probit. ....	78
3.3.1 Análisis de la influencia de la sobrepresión sobre los recursos humanos por la explosión de una nube de vapor. ....	78
3.4 Conclusiones parciales del Capítulo. ....	80
<b>Conclusiones</b> .....	<b>81</b>
<b>Recomendaciones</b> .....	<b>82</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>83</b>
<b>Anexos</b> .....	

## **Introducción**

En nuestros días, la sociedad tecnológica moderna depende totalmente de una amplia variedad de recursos minerales derivados de la litosfera. Desde principios del siglo XX dos nuevos recursos geológicos vinieron a sustituir al carbón como principal fuente de energía: el petróleo y el gas natural. Además, el petróleo proporcionó compuestos hidrocarburos que sirven para sintetizar un sinfín de compuestos químicos nuevos, los petroquímicos, que constituyen materiales esenciales en la industria y en la vida actual. (Loayza Quiñones, 2016)

El petróleo ha sido usado desde hace miles de años, principalmente como combustible, calefacción y fuente de iluminación, aunque también hay evidencia de que se empleó con propósitos militares. No obstante, la industria petrolera ha sufrido cambios comerciales, tecnológicos y metodológicos importantes. En los últimos años ha sido evidente que se ha convertido en una de las más grandes y de mayor impacto en la economía internacional. (Calzada Orihuela, *et.al*, 2018)

El petróleo crudo extraído se procesa en refinerías para obtener combustibles, aceites, lubricantes, asfaltos y otros productos. Él mismo se somete a diversos procesos como el reformado, la destilación, además de métodos térmicos, catalíticos o de radiación. (Abdel y Aggour, 2016)

La Industria Petroquímica, se caracteriza por tener pocos infortunios, pero, cuando se producen, su severidad, alcance y efectos es elevada. Esto da lugar a que los aspectos de seguridad tengan una gran importancia y deban ser objeto de una intensa atención por parte de los profesionales vinculados a esta.

La evaluación de la seguridad industrial es un estudio de todas las operaciones de manipulación de sustancias peligrosas. Incluye un análisis de las consecuencias de la inestabilidad del proceso o de cualquier transformación significativa de las variables que intervienen en el mismo, además de la evaluación de las consecuencias de fallos operacionales, así como la magnitud y propagación de los daños ocasionados a la infraestructura, al ser humano y al medio en general. (Casal,*et.al*, 2002)

En Cuba se le da gran importancia a los desastres que se pueden derivar de un accidente en una planta donde se manipulen sustancias peligrosas, debido los daños que se le puede

causar a las personas que se encuentren en el lugar y a la carga económica que pueden representar los accidentes tecnológicos, tanto por la incapacidad del personal involucrado, como por los daños materiales y medioambientales que estos ocasionan.

En nuestra provincia 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 además del tratamiento y comercialización del petróleo crudo. En la Planta de Procesamiento de Crudos (PPC) anexa a la UEB Producción de esta empresa es donde específicamente se tratan los crudos previamente extraídos. El proceso de tratamiento implica varias etapas tecnológicas las cuales son las encargadas de garantizar un petróleo crudo con la calidad requerida para ser vendido a los diferentes organismos. Las condiciones operacionales en dicho proceso resultan complejas y significativamente peligrosas; esto se debe precisamente a la agresividad de 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 por concepto de costo económico. Constantemente la PPC como toda instalación acondicionada para el tratamiento de crudos está expuesta, entre otros tipos de riesgos, al peligro y consecuencias que proporcionan el incendio y la explosión. Precisamente en la PPC, objeto de estudio de la presente investigación no se han realizado un análisis de riesgos actualizado por lo que se propone el siguiente problema científico.

**Problema científico :** ¿Cómo determinar las áreas de peligro potencial para la población y el entorno ambiental ante posibles accidentes en la zona de ventas de la EPEP-Centro ?

**Hipótesis:** Si se realiza una evolución de riesgos en la zona de ventas de la EPEP-Centro se podrá determinar los distintos escenarios de riesgo desde sus probabilidades de ocurrencia hasta la magnitud de sus afectaciones materiales y humanas.

**Objetivo General:** Evaluar los riesgos por incendio, explosión y accidente tóxico en el área de ventas de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP-Centro)

**Objetivos específicos:**

- ✓ Revisión bibliográfica que permita determinar las principales técnicas utilizadas en el mundo de análisis de riesgo.
- ✓ Caracterizar las sustancias involucradas en el proceso.

- ✓ Determinar el índice de incendio, explosión y toxicidad.
- ✓ Determinar los posibles escenarios de incendios y explosión que pueden ocurrir mediante el software ALOHA.
- ✓ Estimar el daño humano antes incendios y explosiones mediante el empleo de las ecuaciones Probit.

## **Capítulo I: Análisis bibliográfico**

En este capítulo se abordan diferentes temáticas asociadas con el análisis de riesgo cuantitativo, después de definir la mejor metodología que permita cuantificar el impacto económico de posibles accidentes por incendios y explosiones. Para ello se consulta el criterio de varios autores, para formar un criterio que defina los principales tipos de accidentes de incendio y explosión que pueda ocurrir en la industria química petrolera. Quedan reflejados los aspectos necesarios para el desarrollo de la investigación en cuestión, los cuales han sido obtenidos como resultado de la revisión bibliográfica de los diferentes sitios y documentos de interés para la temática que se desea precisar. Su importancia radica en el conocimiento y la preparación sobre las diferentes pautas y rutas que se investigan, así como el estado actual de la temática.

### **1.1 Características y propiedades físico – química de las sustancias.**

#### 1.1.1 Petróleo

Según (Loayza, 2016) la palabra “petróleo” proviene de las voces latinas *petra* y *óleum*, que significan piedra y aceite, no porque sea aceite de piedra sino por estar aprisionado entre piedras. Este término general abarca la gama de productos comprendidos por un lado entre el petróleo bruto y el gas natural, y por el otro, entre el asfalto y otros hidrocarburos saturados semisólidos emparentados con él.

Según la ( Real Academia Española. , 2022), la definición es *“Líquido oleoso más ligero que el agua y de color oscuro y olor fuerte, que se encuentra nativo en el interior de la Tierra y a veces forma grandes manantiales. Es una mezcla de carburos de hidrógeno, que arde con facilidad, y después del refinado tiene diversas aplicaciones”*.

El petróleo crudo, o también llamado simplemente crudo, es una mezcla compleja formada por hidrocarburos y otros compuestos de carbono e hidrógeno que frecuentemente contiene significativas cantidades de azufre, nitrógeno, oxígeno y en menor cuantía metales como níquel o vanadio, entre otros. Se encuentra en depósitos subterráneos en la corteza superior de la Tierra en estado líquido, impregnando rocas permeables y porosas, sometido habitualmente a altas presiones. Sus características y composición química son muy variables debido a las diferentes circunstancias en que se ha formado y acumulado. (Cortés del Pino, 2014)

En estado natural es una mezcla de una gran variedad de compuestos hidrocarburos, que difieren mucho de unos yacimientos a otros. En general, los compuestos parafínicos



(lineales, ramificados, ciclados, aromáticos y especies complejas) son los más abundantes, tanto en el petróleo líquido como en el gas natural. La composición media elemental puede ser de un 85% de carbono, 12% de hidrógeno, 3% de la suma de elementos como azufre, oxígeno y nitrógeno, y varios elementos metálicos. (Loayza, 2016)

Dependiendo del número de átomos de carbono y de la estructura de los hidrocarburos que integran el petróleo, se tienen diferentes propiedades que los caracterizan y determinan su comportamiento como combustibles, lubricantes, ceras o solventes. (Cortés del Pino, 2014)

#### *1.1.1.1 Características del petróleo.*

La valoración de los costos y el tipo de refinación del petróleo requiere una descripción completa del mismo y sus componentes, incluida la calificación de sus propiedades. Sin embargo, existen dos propiedades que son especialmente útiles para clasificar y comparar rápidamente los petróleos crudos: la gravedad API (medida de densidad) y el contenido de azufre.

#### **Gravedad API (densidad):**

La **densidad** de un crudo indica qué tan liviano o pesado es en su totalidad. Los crudos más livianos tienen una mayor proporción de pequeñas moléculas, que las refinerías pueden convertir en gasolina, combustible pesado y diésel (cuya demanda está en aumento). Los crudos más pesados tienen proporciones más altas de moléculas grandes, que las refinerías pueden utilizar en combustibles industriales pesados, asfalto y otros productos de alto peso (cuyos mercados son menos dinámicos y, en algunos casos, se están reduciendo), o procesarlas en moléculas más pequeñas que se pueden utilizar en combustibles para transporte. En la industria de refinación, la densidad de un crudo se expresa generalmente en términos de gravedad API, Parámetro internacional del Instituto americano del petróleo (*En inglés American Petroleum Institute, API*), que diferencia las calidades del crudo. (Caceres, 2016)

La gravedad API varía en forma inversa a la densidad (es decir, cuánto más liviano es el material, más alta es la gravedad API), la cual está definida como:

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{Sg} - 131.5 \quad Ec 1.1$$

Donde Sg representa la gravedad específica a 60 °F. Con base a la ecuación 1.1 se evidencia la clasificación del crudo según su densidad en la tabla 1.1 pero es necesario



tener en cuenta los contaminantes para definirlo adecuadamente como crudo medio o pesado.

Tabla 1.1: Clasificación del petróleo por su densidad

<b>Clasificación</b>	<b>°API</b>
Extrapesado	<10°
Pesado	10° - 22.3°
Mediano	22.3° - 31.1°
Liviano	> 31.1°

### **Contenido de azufre:**

Entre los heteros elementos presentes en el petróleo crudo, el azufre es el que más afecta el proceso de refinación.

Los niveles elevados de azufre en el flujo de refinación pueden desactivar los catalizadores que aceleran las reacciones químicas deseadas en ciertos procesos de refinación, provocar la corrosión en el equipo de refinería, y generar la emisión a la atmósfera de compuestos de azufre, que no son agradables y pueden estar sujetos a estrictos controles reglamentarios. (Caceres, 2016; Martínez, *et.al* , 2018 ).

Consecuentemente, las refinerías deben tener la capacidad de extraer el azufre del crudo y de los flujos de refinación, en la medida que sea necesario, para atenuar estos efectos no deseados. Cuánto más alto sea el contenido de azufre del crudo, más alto es el grado de control de azufre que se necesita y el costo de este procedimiento.

El contenido de azufre del crudo y los flujos de refinación se mide generalmente en tanto por ciento (%) en peso o en partes por millón por peso (ppmw). En la industria de la refinería, el petróleo crudo se denomina con poco azufre si su nivel es inferior al valor umbral (por ejemplo, 0,5 % (5.000 ppmw)) y sulfuroso (alto nivel de azufre), si el nivel del mismo supera el umbral más alto. La mayoría de los crudos sulfurosos registran niveles de azufre de entre 1 y 2 %, pero en algunos casos se registran niveles de azufre de > 4 % ( Anexo 1)(García, 2011).

Los crudos poseen diferentes propiedades físicas y químicas, pero generalmente presentan una elevada viscosidad, baja gravedad API (<20 °API), alto punto de fluidez (80°F-100°F), gran contenido de metales pesados como níquel y vanadio además de otras sustancias

como azufre y nitrógeno, también poseen una elevada relación gas aceite además de presentar salinidad en el crudo. (Greem y Perry, 2008)

#### *1.1.1.2 Proceso de refino del petróleo*

El refino del petróleo comienza con la destilación, o fraccionamiento, de los crudos en grupos de hidrocarburos separados. Los productos resultantes están directamente relacionados con las características del petróleo crudo que se procesa. La mayoría de estos productos de la destilación se convierten a su vez en productos más útiles cambiando sus estructuras físicas y moleculares mediante craqueo, reforma y otros procesos de conversión. (Kraus, 2015)

El petróleo natural hirviendo se introduce a la parte baja de la torre de destilación o fraccionamiento; las sustancias más volátiles que se evaporan a esa temperatura pasan como vapores a la cámara superior, donde se enfrían y se condensan, mientras que las fracciones más pesadas quedan en las zonas inferiores. (Lyons, 2010). De este proceso se obtienen las siguientes fracciones: Gases como el metano, etano y los gases licuados del petróleo, (propano y butano), Nafta, ligroína o éter de petróleo, Gasolina, Queroseno, Gasóleo (ligero y pesado), Fuelóleo, Aceites y lubricantes, Asfalto y Alquitrán (Abdel y Aggour, 2016).

#### *1.1.2 Nafta*

Las naftas son mezclas de hidrocarburos de 5 a 11 átomos de carbono, que normalmente tienen un intervalo de ebullición entre los 35 y 195°C, aunque a veces sobrepasan ligeramente los 205°C. Las naftas ligeras tienen un punto final de ebullición (EBP) del orden de los 135°C, mientras que las naftas pesadas cubren el intervalo superior. Si no se especifica si son naftas ligeras, medianas o pesadas, se debe entender que se cubre el intervalo completo ("full range nafta"). Sus componentes son n-parafinas, isoparafinas, alquenos, naftenos y aromáticos (P.I.O.N.A.) en distintas proporciones según su origen. (Cortés del Pino, 2014; Greem y Perry, 2008).

Las naftas son materiales combustibles que por lo general se envían a las unidades de mejoramiento (para mejorar el octano, controlar el azufre, etc.) y luego a la mezcla de combustibles. Están destinadas en su mayor parte a la preparación de gasolinas. (Kraus, 2015)

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. (Hernandez, 2017)

## **1.2 Accidentes mayores. Escenarios de riesgo más recurrentes**

Un accidente es un suceso fortuito e incontrolado, capaz de producir daños. En general, en la industria química este suceso coincide con situaciones de emisión, escape, vertido, incendio y explosión, donde están implicadas sustancias peligrosas. Si la situación generada se puede calificar como de riesgo grave, catástrofe o calamidad pública - inmediata o diferida- para las personas, el medio ambiente y los bienes, se la denomina “accidente mayor”. (Casal, *et.al*, 2002).

La legislación Española establece dos tipos de categorías para los accidentes mayores’:

- ✓ Categoría 1. Aquellos accidentes en los que se prevé que habrá, como consecuencia, posibles víctimas y daños materiales en la instalación industrial. Las repercusiones en el exterior se limitan a daños leves o efectos adversos sobre el medio ambiente, en zonas limitadas.
- ✓ Categoría 2. Aquellos accidentes en los que se prevé que habrá, como consecuencia, posibles víctimas, daños materiales o alteraciones graves del medio ambiente en zonas extensas, en el exterior de la instalación industrial.

Los accidentes de gran magnitud que pueden ocurrir están casi siempre asociados al escape de un producto tóxico o inflamable, generalmente un fluido; sin embargo, algunos accidentes, (por ejemplo, las explosiones de atmósferas de polvo), pueden suceder en el interior del equipo sin que se produzca un escape. (Abassi, 2018; Zhang, 2018 ).

Pueden ocurrir en diferentes niveles y áreas en industria de procesos químicos (CPI), durante el transporte, almacenamiento y / o fabricación de sustancias. En términos generales, los accidentes en una industria de procesos son dividido en tres categorías principales: fuego, explosión y liberación tóxica. (Barrera, 2020)

### 1.2.1 Incendios

Según (Casal, *et.al*, 2002) y (Wells, 2003) entre los diversos accidentes que pueden ocurrir en una industria, el incendio es el que, en términos generales, tiene un radio de acción menor. No obstante, sus efectos pueden ser terribles, ya que la radiación térmica puede

afectar a otras partes de la planta y generar nuevos accidentes tales como explosiones o escapes. (Gyenez, *et.al*, 2017)

Galán (2012) define el incendio como una manifestación del fuego que se desarrolla sin control en el tiempo y en un lugar imprevisto provocando daños y pérdidas. El fuego es un fenómeno de reacciones químicas de oxidación-reducción con un elevado potencial exotérmico. En terminología de incendios el elemento que se oxida se denomina combustible y el oxidante es el comburente (se considera el oxígeno como el comburente típico).

#### *1.2.1.1 Formas de manifestarse los Incendios.*

**Incendio de charco (*Pool fire*).** Combustión estacionaria con llama de difusión del líquido de un charco de dimensiones conocidas (extensión), que se produce en un recinto descubierto. (Casal, *et.al*, 2002). Es un incendio que involucra una cantidad de combustible líquido derramada en la superficie de la tierra o el agua. Las propiedades incluyen exposición a radiación térmica y / o productos de combustión tóxicos o corrosivos. Una complicación adicional es que el combustible líquido, dependiendo del terreno, puede descender por la pendiente, desde el lugar del accidente y terminar en alcantarillas, desagües, aguas superficiales y otras cuencas. (Nolan , 2011; Chen, *et.al*, 2019 ).

Son los más comunes de todos los accidentes de la industria de procesos, cubriendo más del 60% de todos los incidentes de incendio. Los incendios en charcos de fuegos a menudo desencadenan explosiones que pueden dar lugar a más incendios, causando enormes pérdidas de vidas y bienes. Un charco de fuego puede ocurrir cuando un líquido inflamable se libera accidentalmente en el suelo o el agua, y se enciende. Una llama turbulenta no premezclada impulsada por la flotabilidad se forma sobre el charco. El fuego resultante se distingue de otros tipos de incendios por un impulso inicial muy bajo y la propensión a verse fuertemente influenciada por la flotabilidad efectos. (Barrera, 2020)

**Dardo de fuego (*jet fire*).** Llama estacionaria y alargada (de gran longitud y poca amplitud) provocada por la ignición de un chorro turbulento de gases o vapores combustibles. Un ejemplo típico es el soplete. (Cernelli, *et.al*, 2018). 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. (Ahmandi, 2018)

La radiación emitida por un chorro de fuego afecta generalmente a zonas muy limitadas, tanto por las usualmente reducidas dimensiones del chorro, como por su relativamente

corto tiempo de exposición. Su peligro principal es la incidencia directa del dardo sobre otras superficies, sobre todo de equipos que contengan gases licuados. (Toledo, 2016)

Casal, *et.al* (2002) 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.

**Llamarada (*Flash fire*).** 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. (Wells, 2003)

**Bola de fuego(*Fireball*):** es la expansión de los gases calientes producidos por la combustión, origina una nube típica en forma de hongo. En este tipo de eventos no se producen sobrepresiones apreciables y su duración normalmente es reducida. Este tipo de evento catastrófico puede ocurrir como consecuencia del escape masivo de una nube de gas inflamable, o gas licuado presurizado, en circunstancias en las que se produce la ignición de la masa de gas (Gupta Jai, *et.al*, 2015).

Las bolas de fuego ocurren cuando son liberadas rápidamente una considerable cantidad de sustancia y ocurre una rápida ignición. El fuego se enciende con suficiente rapidez para causar un fuego masivo que asciende en forma de bola. Los daños que provoca son causados por la radiación térmica y la falta de oxígeno. Las bolas de fuego pueden producirse por fuego o explosiones de contenedores de gases (Wells, 2003).

### 1.2.2 Explosiones

En general se puede definir a una explosión como una liberación repentina de energía, que genera una onda de presión que se desplaza alejándose de la fuente mientras va disipando energía. Esta liberación tiene que ser, no obstante, bastante rápida y concentrada para que la onda que se genera sea audible. No es necesario, pues, que se produzcan daños para poder considerar este fenómeno como explosión. La energía liberada puede haber sido

almacenada inicialmente bajo una gran variedad de formas: nuclear, química, eléctrica o de presión. (Casal, *et.al*, 2002)

Las explosiones son el incidente más destructivo que puede ocurrir en una industria de hidrocarburos. Las explosiones ocurren de manera tan rápida que sistemas convencionales de protección contra incendio son ineficaces. Una vez que ocurre la explosión los daños pueden ser el resultado de la sobrepresión (presión desarrollada por el gas en expansión), el pulso (el diferencial de presión a través de la planta) y proyectiles (fragmentos que son lanzados debido a la expansión de los gases y que pueden causar daños). Los niveles de sobrepresión de la explosión son considerados los más peligrosos. (Wells, 2003),

Las explosiones generalmente son provocadas por ignición de mezclas gaseosas inflamables, ignición de polvo combustible en suspensión, ignición de nubes de vapor no confinado los cuales representan uno de los mayores peligros dentro de la industria química ya que ocurren con mucha frecuencia. (Grimvall, *et.al*, 2010). El problema principal de este tipo de explosiones proviene del hecho que, además, del alcance que puede llegar a tener la nube, la ignición de esta puede producirse en un punto alejado de la fuente origen del vertido y afectar a grandes áreas. (Barrera , 2020). Las explosiones de recipientes de gas comprimido, gas licuado o líquido sobrecalentado y reacciones fuera de control son otros de los factores que inciden en el inicio de una explosión.

Las explosiones pueden ser de dos tipos: deflagraciones y detonaciones. En una deflagración, la velocidad de la onda de sobrepresión, en el medio sin reaccionar, es subsónica; la onda de presión tiene una fase positiva y una fase negativa. En una detonación, la velocidad de la onda de sobrepresión en el medio sin reaccionar es supersónica; la onda de sobrepresión muestra un incremento de la presión casi instantáneo hasta el pico de máxima presión, presenta también una fase positiva y otra negativa. (Díaz , 2013; Schlumberger , 2015).

#### *1.2.2.1 Explosiones tipo BLEVE.*

Una BLEVE es un tipo de explosión mecánica cuyo nombre procede de sus iniciales en inglés Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion cuya traducción sería "Expansión explosiva del vapor de un líquido en ebullición". 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. Para que se produzca no es

necesaria la existencia de reacciones químicas ni fenómenos de combustión. Podría producirse incluso en calentadores de agua y calderas de vapor. (Bestratén y Turno, 2018)

Normalmente las BLEVE se originan por un incendio externo que incide sobre la superficie de un recipiente a presión, especialmente por encima del nivel líquido, debilitando su resistencia y acabando en una rotura repentina del mismo, dando lugar a un escape súbito del contenido, que cambia masivamente al estado de vapor, el cual si es inflamable da lugar a la conocida bola de fuego (fireball). Esta última se forma por deflagración (combustión rápida) de la masa de vapor liberada. Debido a que esta circunstancia es el escenario normal, al hablar de explosiones BLEVE's y sus consecuencias, se incluye en sentido amplio a la bola de fuego, aunque debe quedar claro que ésta última sólo ocurre cuando el producto es inflamable. (Aprin y Birk, 2019).

Según (Bestratén y Turno, 2018) para que se origine una explosión BLEVE tienen que concurrir una serie de condiciones la cuales son interdependientes entre sí entre las que podemos mencionar la existencia de un producto en estado líquido sobrecalentado, bajada súbita de la presión (isoentrópica) en el interior del recipiente, tal descenso de presión puede ser debido a causas tales como: desprendimiento del disco de ruptura, pérdida de resistencia del recipiente en un incendio con la consiguiente rotura del mismo, perforación del recipiente por impacto, rotura por sobrellenado e incluso disparo de válvulas de seguridad mal diseñadas. Cuanto mayor sea la caída de presión, mayores serán también los efectos de la BLEVE en caso de producirse (Casal, *et.al*, 2014).

El efecto más nocivo de una BLEVE es el derivado de la radiación térmica. La altísima radiación térmica de la bola de fuego formada, provocará la muerte de todo ser vivo que quede encerrado en la misma y la posibilidad de propagación de incendios y BLEVE's a instalaciones y recipientes próximos generando un efecto dominó. Evidentemente la gravedad de los daños a personas y bienes estará en función de la distancia a la susodicha bola de fuego (Chamberlain, *et.al*, 2019).

### 1.2.3 Nubes toxicas.

Un escape de un producto tóxico o inflamable en forma gaseosa, o bien en forma líquida en condiciones de ser vaporizado, produce una nube de gas toxico que puede provocar afectaciones a la salud (Alkinson, 2017).Esta nube, según sea la velocidad de salida del producto, se comporta como:

- ✓ un chorro gaseoso (turbulent free jet): en este caso, la dispersión del producto depende de la velocidad y de la presión de salida. Cuando el gas o vapor está suficientemente diluido y su velocidad es menor que la velocidad del viento, se dispersará a corta distancia en función de las condiciones meteorológicas.
- ✓ la dispersión atmosférica: la nube, en función de las condiciones meteorológicas, se extiende y se desplaza mientras se va diluyendo. Las áreas de terreno que quedan bajo el efecto de esta nube sufrirán las consecuencias del producto contaminante, que, en algunas ocasiones, como en Bhopal en el año 1984, pueden ser muy graves (Casal, *et.al*, 2002).

Según la evolución del fenómeno en el tiempo, las emisiones pueden clasificarse en instantáneas (soplo), continuas (emisiones prolongadas en el tiempo) y en régimen transitorio (emisiones limitadas en el tiempo y a menudo de caudal variable). Según la densidad del producto, la dispersión puede ser neutra o gaussiana (gases o vapores con densidad similar a la del aire), o de gases pesados (productos más densos que el aire, de manera que la gravedad ejerce una influencia significativa en la evolución de la nube). (Febles, 2015)

Entre las principales variables meteorológicas que afectan la dispersión de nubes de contaminantes definidas por (Casal, *et.al*, 2002) se encuentran:

- ✓ 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, el viento entre otros.
- ✓ 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 y 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.

Todos estos escenarios de riesgos expuestos anteriormente pueden tener lugar en menor o mayor medida en cualquier instalación industrial. Con fines económicos y de preservación del ecosistema y del hombre es muy importante el conocimiento y la evaluación de los daños que puedan ocasionar. Para esto se han desarrollado diferentes métodos de análisis de riesgos, basados generalmente en las frecuencias de ocurrencia de accidentes mayores y en el cálculo de las probabilidades.

### **1.3 Análisis de riesgo industrial.**

La industria química es muy propensa a la ocurrencia de accidentes debido a disímiles factores que pueden afectar tanto la economía como la vida humana por lo que es necesario la realización de los análisis de riesgo para poder decidir si el riesgo asociado a una actividad es aceptable o no, así como la probabilidad de que tal peligro se materialice. (González, 2016)

Según el criterio de (Casal, *et.al*, 2002) el análisis de riesgo es la evaluación de los diversos riesgos asociados a una determinada instalación industrial o, incluso, al transporte de mercancías peligrosas, orientado a la determinación -con una aproximación razonable- de los siguientes aspectos: accidentes que pueden ocurrir, la frecuencia de estos y la magnitud de sus consecuencias.

Viña, *et.al* (2021) exponen que la investigación determinará cuáles son los factores de riesgo que potencialmente tendrían un mayor efecto sobre nuestro proyecto y, por lo tanto, deben ser gestionados por el emprendedor con especial atención.

### 1.3.1 Técnicas de análisis de riesgo.

Existen varios criterios sobre los métodos de análisis de riesgo, pero nos centramos en lo expuesto por (Wells, 2003) quien plantea que existen tres tipologías de métodos utilizados para determinar el nivel de riesgos. Los métodos pueden ser: Métodos Cualitativos , Métodos Cuantitativos, Métodos Semicuantitativos.

1.3.1.1 Métodos Cuantitativos : Estos emplean diferentes herramientas lógicas y auxiliares, algunos de ellos establecen estructuras lógicas secuenciales, causa/ riesgos/efectos que, además de identificar, sirven como trampa para el análisis semicuantitativo o cuantitativos posteriores. Entre los que se encuentran:

- ✓ *Análisis mediante listas de comprobación (Check List):* 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. Muchas organizaciones utilizan las listas de inspección estandarizadas para seguimiento y control de las diferentes fases de un proyecto (Castañeda, 2017).
- ✓ *Análisis histórico de riesgos:* consiste en estudiar los accidentes registrados en el pasado en plantas similares o con productos idénticos o de la misma naturaleza. Se basa en informaciones de procedencia diversa: Bibliografía especializada (publicaciones periódicas y libros de consulta) o bancos de datos de accidentes informatizados (Casal, *et.al*, 2002).
- ✓ *Análisis ¿Qué pasa si ¿(What if):* su objetivo es detectar y analizar de forma cualitativa las desviaciones del proceso y sus variables, respecto de su comportamiento normal previsto, dando lugar a sucesos indeseables. Permite conducir un examen sistemático de una operación o un proceso en base a preguntas de ese tipo. Es una técnica de gran utilidad para la identificación de peligros. Este análisis requiere de un completo conocimiento del proceso a evaluar. Se debe preparar una lista de preguntas del tipo ¿Qué sucedería sí...? aplicadas a desviaciones en el diseño, construcción, modificación y operación de la planta (Viña, *et.al*, 2021).
- ✓ *Análisis de los modos de fallo y sus efectos(Failure Modes and Effect Analysis, FMEA).* Este método consiste en la tabulación de los equipos y sistemas de una planta química, estableciendo las diferentes posibilidades de fallo y las diversas influencias (efectos) de cada uno de ellos en el conjunto del sistema o de la planta.

Los fallos que se consideran son, típicamente, las situaciones de anomalía tales como: abierto cuando normalmente deba estar cerrado, cerrado cuando normalmente deba estar abierto, marcha cuando normalmente deba estar parado, paro cuando normalmente deba estar en marcha, fugas cuando normalmente deba ser estanco (Brand, *et.al*, 1996).

- ✓ *Análisis funcional de operabilidad (Hazard and Operability analysis, HAZOP)*: es una técnica estructurada y sistematizada de análisis de riesgos que permite identificar peligros potenciales y problemas operacionales en procesos químicos, generalmente documentados a través de diagramas de procesos e instrumentos. Utiliza palabras claves como: *no, si, más, menos* (Zoltan , 2018).
- ✓ *Análisis cualitativo mediante árboles de fallo*. Se trata de un método deductivo de análisis que parte de la previa selección de un "suceso no deseado o evento que se pretende evitar", sea éste un accidente de gran magnitud (explosión, fuga, derrame, etc.) o sea un suceso de menor importancia (fallo de un sistema de cierre, etc.) para averiguar en ambos casos los orígenes de los mismos. (Anexo 2) (Alfonso, 2020; Alileche, *et.al* ,2016).

1.3.1.2 Método semicuantitativo: Estos emplean técnicas de análisis crítico que emplean índices globales del potencial de riesgo estimado a partir de las estadísticas. Incluye:

- ✓ Análisis de los modos de fallo, efectos y criticidad. Similar al método cualitativo FMEA, pero con indicación semicuantitativa del grado de criticidad (grado de riesgo) que permite ordenar la importancia de los fallos (Aguilar, *et.al*, 2018).
- ✓ Método de Dow: Índice de fuego y explosión, el cual constituye un índice de riesgo exclusivo para los incendios y explosiones, pero especialmente desarrollado para empresas químicas con riesgo significativo. Su objetivo es cuantificar el daño esperado por un incendio o una explosión e identificar los equipos que generan mayor riesgo. (Casal ,*et.al*, 2002)
- ✓ Método de ICE: Índice de Mond el cual es un índice de riesgo aplicable a industrias de proceso de gran capacidad productiva. Su aplicación es iterativa (Viña Rodríguez, *et. al*, 2021). El Índice Mond fue desarrollado por *Imperial Chemical Industries (ICI)* en su primera versión 1979 y la actual publicada en 1985. El Índice Mond – 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. (Arencibia

Mantilla , 2018) y (Wells, 2003) coinciden en que el método de los índices de Mond es parecido, en estructura y características, al método IFE de Dow. Pero señala una serie de diferencias muy importantes tales como que el Índice de Mond considera más detalles en los factores de riesgo y en las protecciones, por lo que utiliza índices correspondientes a los mismos. Considera de manera más específica los riesgos para la salud y proporciona índices desglosados frente a varios peligros. (Mardani, *et.al*, 2017)

1.3.1.3 Métodos cuantitativos : Estos se basan en la aplicación de técnicas de análisis crítico que incluyen estructuras y cálculos para establecer la probabilidad de sucesos complejos (siniestros) a partir de los valores individuales de la probabilidad de fallo que corresponde a los elementos (equipos y humanos) implicados en los procesos industriales. (González Herrera, 2016)

1.3.2 Evaluación de atmósferas peligrosas. Softwares más utilizados.

Los estudios de análisis de riesgos, de consecuencia y de vulnerabilidad de la dispersión de vapores tóxicos en forma de nubes son de gran importancia, pues permite el modelado del accidente identificando áreas de riesgo y el comportamiento de la dispersión (Barahona Alvear, *et.al* ,2021). Durante los últimos años, los investigadores han estado evaluando el poder que tiene la simulación de modelos de consecuencias por herramientas computacionales para la estimación en tiempo real de una emergencia. Hay varios programas de modelado de consecuencias disponibles, como ALOHA, SLAB, PHAST, SAFETI, DEGADIS, BREEZE HAZARD e HYSIS que están teniendo una aceptación creciente en la preparación de planes de respuesta de emergencia (Predrag,*et.al*, 2018).

Por cuestiones objetivas centramos la atención en el software ALOHA cuyas siglas significan *Areal Locations of Hazardous Atmospheres* de la EPA, EEUU. Este programa computarizado está diseñado específicamente para el uso de personas que responden a accidentes químicos, así como la planificación y entrenamiento de emergencia. El software ALOHA puede predecir las tasas a las cuales los vapores químicos pueden escapar a la atmósfera desde tuberías en mal estado, fugas de tanques y charcos en evaporación (Cruz Mora , 2013).Desarrollado por la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) 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. (Tseng, *et.al*, 2019)

El ALOHA emplea en sus cálculos dos modelos de dispersión: un modelo Gaussiano para gases ligeros que ascienden rápidamente, y el modelo Degadis para gases densos que se dispersan a ras del suelo. Ambos modelos predicen la velocidad de emisión de vapores químicos que escapan a la atmósfera (Puentes Delgado, 2013). Es capaz de estimar cómo una nube de gas peligrosa podría dispersarse en la atmósfera después de una descarga química accidental. ALOHA es de ejecución rápida en ordenadores de sobremesa y portátiles, que son fácilmente transportables y accesibles al público. Su diseño es sencillo e intuitivo, de modo que pueda operarse rápida y fácilmente durante situaciones de alta presión. Contiene una base de datos con información sobre las propiedades físicas de unos 1.000 productos químicos peligrosos comunes. (Praveen y Nagendra, 2015). Los cálculos realizados por el ALOHA representan un compromiso entre exactitud y velocidad: se ha diseñado para que produzca buenos resultados con la suficiente rapidez para que puedan usarlo los responsables de los servicios de emergencia. Además, revisa la información que se le introduce y avisa cuando se comete un error (Rile, *et.al*, 2019).

Este Software está certificado por el CITMA según (Orozco, *et.al*, 2019) para obtener la dispersión de los contaminantes en la atmósfera y determinar su posible área de alcance. Según (Hernandez Brizuela, 2017) entre sus limitaciones principales se encuentran:

- ✓ 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.

### 1.3.3 Método para la determinación de afectaciones humanas. Ecuaciones "Probit"

Los modelos de vulnerabilidad sirven para determinar las afectaciones 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. (Turno Sierra, 2018)

El método consiste en la aplicación de correlaciones estadísticas para estimar las consecuencias desfavorables sobre la población u otros elementos vulnerables a los fenómenos físicos peligrosos, consecuencias de los accidentes y asocia la probabilidad de un daño, con unas determinadas unidades 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.

#### **1.4 Conclusiones parciales.**

- ✓ El petróleo crudo y la nafta poseen características y propiedades significativas por lo que se consideran sustancias peligrosas por lo que es necesario realizar un análisis de riesgo.
- ✓ Los escenarios de riesgos más probables en Plantas de Procesamiento de Crudo son: nubes de vapor inflamables, Pool Fire y BLEVE's.
- ✓ El Índice de Mond resulta una técnica de análisis de riesgos muy efectiva y completa para determinar la frecuencia de ocurrencia de los posibles escenarios de riesgo y afectaciones toxicológicas.
- ✓ El Software más adecuado para la evaluación de atmósferas explosivas es ALOHA.
- ✓ Las ecuaciones Probit son adecuadas y relativamente sencillas para determinar las posibles afectaciones humanas ante accidentes mayores.

## **Capítulo 2 : Materiales y Métodos**

En este capítulo se describe detalladamente el proceso de producción de crudo en la EPEP-Centro. Además, se muestra la metodología de las herramientas utilizadas para el análisis de riesgo, la evolución de atmósferas peligrosas mediante el software ALOHA y el método para la determinación de afectaciones humanas con la utilización de las ecuaciones "Probit"

### **2.1 Descripción del proceso tecnológico.**

La Planta de Procesamiento de Crudo (PPC), se encuentra ubicada en la localidad de Guásimas, finca "La Cachurra", en el km 6 ½ de la vía rápida Cárdenas-Varadero del municipio Cárdenas, pertenece a la UEB-Producción de la EPEP-Centro. Su objetivo principal es el tratamiento a los crudos provenientes de los pozos en producción para su reducción de agua de capa, sedimentos minerales y gas acompañante y su acondicionamiento para la etapa posterior de refinación.

Antes de la entrada a la Planta Procesadora de Crudo (PPC) al petróleo que se extrae se le adiciona nafta como solvente, utilizada como sustancia reductora de viscosidad, garantizando 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 m<sup>3</sup> 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 los Separadores de la Segunda Etapa de Separación (SES) conocidos por las balas separadoras y en tanque 6.

La mezcla de gas y líquido entra a los separadores por un extremo donde parte del fluido de la mezcla es separada por la acción de la gravedad, puesto que las balas se encuentran a una altura de 17m, debido a la caída de velocidad, el tiempo de residencia y al proceso de turbulencia controlada.

El petróleo pasa por gravedad hacia el tanque 6, aunque puede pasar directamente hacia el tanque 14, o cualquier otro tanque de la planta en dependencia de las necesidades. 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 que no se separa en la SES. 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.m<sup>3</sup> (Tanques 15 y 16), 10.000 m<sup>3</sup> (Tanque 7 y 8) y 20.000 m<sup>3</sup> (Tanque 14), según los tanques 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 75-900 °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 m<sup>3</sup> (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 existe la posibilidad de corregir la viscosidad del crudo hasta 1500 mm<sup>2</sup>/s (valor pactado para la venta). 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 Empresa Comercializadora de Combustible de Matanzas (ECCM), en caso de que por algún motivo sea necesario sacar de servicio la EROVM. (Anexo 3)

Cuenta además con un almacén de nafta de cuatro tanques de 205 m<sup>3</sup>, una sala de calderas con cinco calderas pirotubulares, una planta de tratamiento de agua para calderas, un sistema de disposición de agua residual, un taller mecánico, un taller eléctrico, un laboratorio de ensayos físico-químicos, dos cuartos de control automático, cuatro oficinas y un comedor.



## 2.2 Caracterización de las sustancias objeto de estudio.

Según (Orozco J. L., 2015) 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.(Anexo 4)

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.
- ✓ Biodegradabilidad.
- ✓ Corrosión.

Peligros para la salud.

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

**Tabla 2.1** Patrón para la clasificación toxicológica de las sustancias analizadas.

Sustancia	T.A	I	S	TDR	M	C	Co	TPR

Fuente: (Orozco J. L., 2015)

**Leyenda:** **T.A:** Toxicidad aguda, **I:** Irritabilidad, **S:** Sensibilización, **TDR:** toxicidad por dosis repetidas, **M:** Mutagenicidad, **C:** Carcinogenicidad, **Co:** Corrosión, **TPR:** toxicidad para la reproducción.

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.

### 2.3.1 Metodología 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.

**Primera Fase:** Dividir la planta en unidades. 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:** Consiste en determinar el material o mezcla principal y el 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 mediante la ecuación 2.1

$$B = \frac{\Delta H_c}{1000} \quad \text{Ec.2.1}$$

Donde  $\Delta H_c$  se expresa en BTU/lb de material clave.  $\Delta H_c$  (crudo)=21 225 BTU/lb y  $\Delta H_c$  (nafta)= 45120 BTU/lb.

**Tercera Fase:** Cálculo de factores de Penalización del riesgo.

Se consideran los factores que pueden agravar el riesgo ponderando cada una de las siguientes variables: Riesgos especiales de los materiales (M), Riesgos generales del proceso (P), Riesgos especiales del proceso (S), Riesgos asociados a las cantidades (Q), Riesgos de implantación (L) y Riesgos graves para la salud (T).

Primeramente, se calculan los Riesgos Especiales del Material a través de la ecuación 2.2

$$M = \sum_a^j \text{factores} \quad \text{Ec.2.2}$$

**Donde:** M: Riesgos Especiales del material.

$\sum_a^j \text{factores}$  : Sumatoria de todos los diferentes que componen este riesgo.(Tabla 2.2).

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

Riesgos Especiales de los Materiales(M)	Rango	Factor
Productos oxidantes	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 1500	
Otros	0 a 150	
Factor de Riesgos Especiales del Material (M)		∑ factores

En el Anexo 5 se muestran los factores de riesgo correspondientes a Riesgos generales del proceso (P), Riesgos especiales del proceso (S), Riesgos asociados a las cantidades (Q), Riesgos de implantación (L) y Riesgos graves para la salud (T) y se calculan de la misma forma, o sea, como una sumatoria de todos los factores de penalización.

**Cuarta 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: Global Dow (D), Incendio (F), Explosión (E), Explosión no confinada (A), Índice unitario de toxicidad (U), Índice máximo incidente tóxico (C) y 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 de la siguiente manera:

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

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

- ✓ **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:

$$F = \frac{BK}{N} \left( 20500 \text{ BTU} / \text{ft}^2 \right) \quad \text{Ec.2.4}$$

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.**

Cant. De Fuego(F) del área normal de trabajo (BTU/ft <sup>2</sup> )	Categoría	Rango de duración (fuego-hora)	Comentarios
0-50000	<b>Ligero</b>	¼ - ½	
50 000-100 000	<b>Bajo</b>	½ - 1	Casas
100 000-200 000	<b>Moderado</b>	1 – 2	Fábricas
200 000-400 000	<b>Alto</b>	2-4	Fábricas
400 000-1 000 000	<b>Muy Alto</b>	4-10	Edificios ocupados
1 000 000-2 000 000	<b>Intenso</b>	10-20	Bodegas de hule
2 000 000-5 000 000	<b>Extremo</b>	20-50	
5 000 000-10 000 000	<b>Muy Extremo</b>	50-100	

- ✓ **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 las cuales se muestran en la Tabla 2.5 . 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 2.5.

$$E = 1 + \frac{M+P+S}{100} \quad \text{Ec.2.5}$$

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

- ✓ **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. Los resultados obtenidos se caracterizan según su valor como se muestra en la tabla 2.6.

$$A = B * \left(1 + \frac{m}{100}\right) * Q * H * E * \frac{t}{300} * \left(\frac{1+p}{1000}\right) \quad \text{Ec.2.6}$$

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

- ✓ **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. Según el resultado del cálculo del índice, la toxicidad se caracteriza en ligera, moderado o alto dichas categorías se evidencian en la tabla 2.7.

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

Donde:

M: Factor por Riesgos Especiales del Material.

P: Factor de Riesgos Generales de Proceso.

S: Factor de Riesgos especiales de Proceso.

**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

- ✓ **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 como sigue:

$$C = Q * U \quad \text{Ec.2.8}$$

La tabla 2.8 evidencia las categorías asignadas a los valores obtenidos de la Ec.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

- ✓ **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:

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

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(grupo1) 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
---------	-------------

En el caso de que cualquiera de los Índices resulte alto, no aceptable o superior, deberán llevarse a cabo revisiones de ingeniería a fin de modificar mediante cambios en el diseño los factores y reducirlos, recalculando y colocando un sufijo (1) para que queden: D<sub>1</sub>, F<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, etc.

**Quinta 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<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>, K<sub>4</sub>, K<sub>5</sub> y K<sub>6</sub> a través del producto de las bonificaciones que se presentan a continuación en la Tabla 2.10

**Tabla 2.10: Control de Riesgos Asociados a la Contención (K<sub>1</sub>)**

Riesgos Asociados a la contención (K <sub>1</sub> )	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 <sub>1</sub> )		Producto(factoros)

Los factores de bonificación para el control de Riesgos Asociados al Control del Proceso (K<sub>2</sub>), Control de Riesgos asociados a la Actitud con Respecto a la Seguridad (K<sub>3</sub>), Control de Riesgos en la Protección Contra Incendio (K<sub>4</sub>), Control de Riesgos por Aislamiento (K<sub>5</sub>) y Control de Riesgos por la Lucha Contra Incendios (K<sub>6</sub>) se pueden observar en el Anexo 6 y se calculan de la misma forma, o sea, como una multiplicación de todos los factores de bonificación.

**Sexta 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.  $F_2 = F * K_1 * K_3 * K_5 * K_6$  Ec.2.10
- ✓ Índice Reducido de Explosión.  $E_2 = E * K_2 * K_3$  Ec.2.11
- ✓ Índice Reducido de Riesgo de Explosión Aérea.  $A_2 = A * K_1 * K_5 * K_6$  Ec.2.12

✓ Índice Global de Riesgo Reducido.  $R_2 = R * K_1 * K_2 * K_3 * K_4 * K_5 * K_6$  Ec.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 toxico (C)	Moderado	Alto
Factor Global de Riesgo (R)	Alto(Grupo1)	Alto(Grupo2)

### 2.3.2 Software ALOHA. Características fundamentales.

Según EPA(2022) se utiliza la versión 5.4.7 de septiembre del 2016, la cual reporta resultados confiables y representa un software actualizado para la investigación.

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. Se modelan tres categorías peligrosas: Dispersión de gas tóxico, Fuegos y 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 y propósitos académicos. No puede ser usado para: emisiones de sustancias radioactivas, licencias ambientales de chimeneas de gas y emisiones fugitivas.

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.

(NOAA, 2016; Shao y Duan, 2018; Wells, 2003; Casal, *et.al*, 2002 ) definen las propiedades que condicionan un fuego 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 se 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  $\text{kW/m}^2$

- ✓ Rojo:  $10 \text{ kW/m}^2$ . Potencialmente letal en el intervalo de 60 segundos.
- ✓ Naranja:  $5 \text{ kW/m}^2$ . Quemaduras de segundo grado en el intervalo de 60 segundos.
- ✓ Amarillo:  $2 \text{ kW/m}^2$ . 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, estos son:

- ✓ Rojo: 8 psia (destrucción de edificios)
- ✓ Naranja: 3,5 psia (serios daños)
- ✓ Amarillo: 1 psia (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 y Nubes de vapor no confinados. (VCE).

Otras particularidades del Software son que debe trabajarse con cuidado para predecir diferentes situaciones, las mismas son consideradas sus limitantes las cuales son la baja velocidad del viento, 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 y 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:

- ✓ Indicar la ciudad donde puede ocurrir el accidente químico.
- ✓ Seleccionar el compuesto químico.
- ✓ Dar la información de las condiciones meteorológicas en el período que queremos realizar la predicción del evento.
- ✓ Describir cómo los compuestos químicos escapan a la atmósfera.
- ✓ 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 dé información 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.

Este programa además de los gráficos que aporta puede brindar información acerca del sitio, datos de producto químico, datos atmosféricos, zona tratada, etc. También muestra las clases de estabilidad ordenadas en A, B, C, D, E, F, correspondiendo con extremadamente inestable.

Para la mejor comprensión de los resultados cualitativos de este Software se hace referencia en (NOAA, 2016) 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 Emergency 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 *Immediately 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 Método para la determinación de afectaciones humanas. Ecuaciones "Probit"

En este método se parte de una manifestación física de un incidente y nos da como resultado una previsión de los daños a las personas expuestas al incidente, es decir: número de heridos por diferentes lesiones y número de víctimas fatales. (Turno, 2018)

La fórmula empleada para este modelo de vulnerabilidad se basa en una función matemática lineal de carácter empírico extraída de estudios experimentales:

$$Pr = a + b \ln V \quad \text{Ec. 2.14}$$

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 en la figura 2.1 se establece dicha relación.

**Tabla 2.12:** Equivalencia entre valores "probit" y porcentaje de población afectada.

Pr	%	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	5,95	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: (Turno Sierra , 2018)

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

### 2.3.3.1 Vulnerabilidad térmica.

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 o dosis de radiación calorífica recibida. Para el caso de estudio se establecen 60 segundos como tiempo de exposición para actuar en concordancia con ALOHA.

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 dardo de fuego. 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 deben ser evaluados en cada caso.

La organización holandesa para la investigación científica presenta las ecuaciones "Probit" siguientes:

- ✓ Quemaduras mortales(protegidas con ropa): $Pr = -37.23 + 2.56 \ln(tI^{3/4})$  Ec.2.15
- ✓ Quemaduras mortales(sin protección):  $Pr = -36.38 + 2.56 \ln(tI^{3/4})$  Ec.2.16
- ✓ Quemaduras de 2<sup>do</sup> grado: $Pr = -43.14 + 3.0188 \ln(tI^{3/4})$  Ec.2.17
- ✓ Quemaduras de 1<sup>er</sup> grado: $Pr = -39.83 + 3.0186 \ln(tI^{3/4})$  Ec.2.18



Donde:

t = Tiempo efectivo de exposición en segundos.

I = Intensidad de irradiación en W/m<sup>2</sup>.

### 2.3.3.2 Vulnerabilidad a las 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 (Turno Sierra , 2018) y se desglosan a continuación:

✓ Muerte por lesiones pulmonares:  $Pr = -77.1 + 6.91 \ln P$  Ec. 2.19

✓ Rotura de tímpano:  $Pr = -15.6 + 1.93 \ln P$  Ec. 2.20

Donde:

P: sobrepresión máxima(N/m<sup>2</sup>)

A continuación, se indican unos valores de referencia de consecuencias sobre edificios según la sobrepresión alcanzada:

- ✓ Daños importantes en edificios (casi completa destrucción): 0,35 bar.
- ✓ Daños reparables en edificios: 0,10 bar.
- ✓ Rotura de cristales en edificios: 0,05 bar.

Aunque existen modelos de vulnerabilidad para impacto de fragmentos metálicos de los recipientes proyectados en una explosión, no se han considerado suficientemente representativos y fiables para incluirlos. Cabe destacar que los fragmentos de considerable tamaño pueden alcanzar distancias incluso superiores a 1 kilómetro. La organización holandesa de investigación científica indica que los proyectiles con una energía cinética de 100 J pueden ocasionar víctimas mortales.

## **Capítulo 3: Análisis de resultados.**

En este capítulo se ofrece el análisis de los resultados obtenidos en el estudio de riesgo realizado en el Área de Ventas de la Planta de Procesamiento de Crudo de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro. Se realiza la caracterización de las sustancias involucradas. En el mismo se aplica como técnica de análisis de riesgo el Índice de Mond , además se emplea la última versión del software ALOHA, para la evaluación de los escenarios de riesgos por BLEVE, Pool Fire y Nubes de vapor no confinados(VCN). Con el objetivo de culminar el estudio de los escenarios de riesgos en la planta y las afectaciones a la población aledaña se aplica las ecuaciones Probit para prever el alcance de los mismos.

### **3.1 Resultado de la caracterización de las sustancias involucradas.**

#### **3.1.1 Petróleo**

##### **Identificación del producto.**

- ✓ Nombre del producto: Petróleo crudo
- ✓ Fórmula Química: No aplica
- ✓ Etiquetado de peligro (frases R y S) así como las que la identifican por otros efectos. Anexo 4

**R:** R2/R3/R5/R7/R16/R18/R22/R25/R36/R37/R38/R42/R43/R44/R45/R52/R54/R55/R56

**S:** S1/S2/S3/S7/S9/S14/S16/S17/S21/S23/S24/S25/S28/S29/S40/S41/S43/S46/S50

##### **Datos Físicos.**

- ✓ Apariencia: líquido viscoso de color negro con olor característico (con ácido sulfhídrico tiene olor a huevos podridos).
- ✓ Punto de ebullición: gas a 550 °C, 172-215 °C a 1.013 hPa
- ✓ Punto de fusión: -95 °C
- ✓ Solubilidad: Insoluble en agua.
- ✓ Densidad: 0.76 g/cm<sup>3</sup> a 20 °C
- ✓ TLV. Límite superior de inflamabilidad: mayor que 93°C
- ✓ IPVS. Límite inferior de explosividad: 0.6%
- ✓ Punto de congelación: -30 °C
- ✓ Temperatura de auto ignición: No determinada.
- ✓ Coeficiente de expansión: No determinada.
- ✓ Biodegradabilidad: no es fácilmente biodegradable 8-22%.
- ✓ Corrosión: altamente corrosivo

##### **Peligros para la salud.**

- ✓ Concentración permisible: No determinada.
- ✓ Exposición permisible. El PEL es de 3500 ppm como promedio durante un turno laboral de 8 horas . El REL es de 88 ppm como promedio durante un turno laboral de 10 horas y de 450 ppm, que nunca debe excederse durante ningún periodo laboral de 15 minutos.

- ✓ Emergencia: Inhalación: Transportar a la persona al aire libre y mantenerla en una posición que le facilite la respiración. En todos los casos de duda o si existen síntomas, solicitar asistencia médica. Contacto con la piel: Retirar ropa contaminada, Lavar suavemente con agua y jabón abundantes. Contacto con los ojos: Inmediatamente y con cuidado aclarar bien en la ducha para los ojos o con agua. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando. Ingestión: Enjuagar la boca con agua. NO provocar el vómito. Consultar a un médico inmediatamente.
- ✓ Partes del cuerpo que afecta. Ojos, piel, vías respiratorias
- ✓ Forma de entrada al organismo. Vías respiratorias, a través de la piel.
- ✓ Toxicidad.

**Tabla 3.1** Patrón para la clasificación toxicológica de la sustancia analizada.

Sustancia	T.A	I	S	TDR	M	C	Co	TPR
Petróleo	x	P,O,R	x	-	-	x	-	-

**Fuente:** Realización Propia.

**Leyenda:** **T.A:** Toxicidad aguda, **I:** Irritabilidad, **S:** Sensibilización, **TDR:** toxicidad por dosis repetidas, **M:** Mutagenicidad, **C:** Carcinogenicidad, **Co:** Corrosión, **TPR:** toxicidad para la reproducción.

### Condiciones de almacenamiento y manipulación.

- ✓ Nombre del producto almacenado: Petróleo en calidad.
- ✓ Forma del recipiente (cilíndrico, rectangular, vertical, horizontal, etc.): Cilíndrico Vertical
- ✓ Dimensiones del recipiente (largo, ancho, diámetro): D=22.816 m, L= 11.920 m
- ✓ Material de construcción: acero ASTM A36.
- ✓ Protección del recipiente (interior o exterior):
  - Interior: pintura anticorrosiva.
  - Exterior: pintura ánodos de sacrificio
- ✓ Existencia de accesorios en el recipiente y su localización:
  - Sensores de temperatura: 2 a 1.60m y 4.85m
  - Válvulas: 2
  - Cámaras de espuma: 2 de 4" de diámetro
  - Registro superior con 20" de diámetro.
- ✓ Fecha de fabricación del recipiente: 2011
- ✓ Condiciones de almacenamiento de las sustancias: 85 °C a presión atmosférica.
- ✓ Cantidad de sustancia almacenada: 4200 m<sup>3</sup>
- ✓ Registro histórico de averías producidas en el recipiente. Casos de derrames, salideros, etc: no
- ✓ Tipo de averías producidas: no.

- ✓ Características de los alrededores del recipiente: zona limpia y con gravilla expuesto a condiciones ambientales.

### **Condiciones para su uso en el proceso.**

- ✓ Uso en el proceso: principal producto del proceso.
- ✓ Condiciones en las que se usa la sustancia (presión, temperatura): 38°C a 3.5 atm
- ✓ Fallos ocurridos en estos equipos al operar con estas sustancias: no
- ✓ Material de construcción de los equipos donde es usada: acero al carbono.
- ✓ Protección del sistema de tuberías:
  - Interior: pintura anticorrosiva.
  - Exterior: pintura ánodos de sacrificio

### **3.1.2 Nafta**

- ✓ Nombre del producto: Nafta. (fracción ligera tratada con hidrógeno)
- ✓ Nombre Químico: Nafta hexano.
- ✓ Formula Química: C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>.
- ✓ Etiquetado de peligro: R2, R3, R5, R7, R12, R18, R20, R21, R22, R37, R50, R60, R61, S21, S23, S43. Ver anexo 4.
- ✓ H225, líquido y vapores muy inflamables.
- ✓ H315, provoca irritación cutánea.
- ✓ H361, se sospecha que perjudica la fertilidad o daña al feto.
- ✓ H336, puede provocar somnolencia o vértigo.
- ✓ H373, puede provocar daños en los órganos tras exposiciones prolongadas en caso de inhalación.
- ✓ H304, puede ser mortal en caso de ingestión y penetración en las vías respiratorias.
- ✓ H411, tóxico para los organismos acuáticos.

### **Datos físicos:**

- ✓ Apariencia: líquido incoloro y levemente dulce.
- ✓ Punto de ebullición: intervalo de 65 a 690 °C.
- ✓ Punto de fusión: -95 °C.
- ✓ Solubilidad: hidrosoluble 0,01 g/l a 200 °C.
- ✓ Densidad del líquido: 0,67 g/cm<sup>3</sup> a 200 °C.
- ✓ Densidad de vapores: 2,8 g/cm<sup>3</sup>.
- ✓ T L V -límite superior de inflamabilidad: 7,4%
- ✓ IPVS - Límite inferior de explosividad: 1,1%
- ✓ Temperatura de auto ignición: No determinada.

- ✓ Coeficiente de expansión: no se expone.
- ✓ Temperatura de inflamación: -270 °C
- ✓ Biodegradabilidad: No
- ✓ Corrosión: altamente corrosivo.

**Formas de control y mitigación en casos de desastres.**

Productos o técnicas empleados en el control y mitigación en caso de desastres:

- ✓ Coordinar medios de extinción de incendios en alrededores, espuma, polvo extinguidor seco, dióxido de carbono.
- ✓ Existencia del producto de control y mitigación en la entidad: 4 tanques de 205 m<sup>3</sup> generalmente llenos. 10 extintores de CO<sub>2</sub>.

**Tabla 3.2** Patrón para la clasificación toxicológica de la sustancia analizada.

Sustancia	T.A	I	S	TDR	M	C	Co	TPR
Nafta	x	P,O,	-	x	x	x	x	x

**Datos de reactividad.**

- ✓ Reacción principal y reacciones secundarias: Riesgo de ignición. Vapores pueden formar con agua mezclas explosivas.
- ✓ Cinética de reacción: no se expone.
- ✓ Contaminantes producidos: Humo tóxico de monóxido de carbono muy peligroso.
- ✓ Reacciones de descomposición: Productos de combustión muy peligrosos como el humo tóxico de monóxido de carbono en caso de incendio.

**Condiciones de almacenamiento y manipulación.**

- ✓ Capacidad del recipiente de almacenamiento: 200 m<sup>3</sup>.
- ✓ Forma del recipiente: cilíndrica vertical
- ✓ Dimensiones del recipiente: Altura: 7 metros.
- ✓ Material de construcción: acero el carbono.
- ✓ Localización de la soldadura: Por rolos de chispa.
- ✓ Longitud de la soldadura: 3.5 cm.
- ✓ Protección del recipiente (exterior): pintura impermeabilizante.

- ✓ Existencia de accesorios en el recipiente y su localización: medidores de nivel.
- ✓ Fecha de fabricación del recipiente: 2014
- ✓ Condiciones de almacenamiento de la sustancia: Temperatura ambiente. Presión atmosférica.
- ✓ Tipo de averías producidas: rajadura en la base del tanque.
- ✓ Características de los alrededores del recipiente: tanques expuestos a condiciones ambientales

***Condiciones para su uso en el proceso.***

- ✓ Uso en el proceso: Almacenamiento de nafta para reducir viscosidad al crudo.
- ✓ Fallos ocurridos en estos equipos al operar con estas sustancias: rajadura en el fondo.
- ✓ Material de construcción de los equipos donde es usada: acero al carbono.

Ambas sustancias son altamente peligrosas por sus características corrosivas y explosivas. Es necesario tener un exhaustivo cuidado cuando se manipulen porque provocan afectaciones en la salud del trabajador, al medio ambiente en general y contribuir a la ocurrencia de accidentes mayores.

**3.2 Análisis de los resultados obtenidos del cálculo del Índice de Mond.**

3.2.1 Análisis de los resultados obtenidos del cálculo del Índice de Mond para el tanque de almacenamiento de petróleo en calidad.

***Primera Fase:*** Dividir la 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, etc. 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 seleccionan los tanques de almacenamiento de crudo del área de venta de la empresa como las unidades donde se estudia el riesgo por contener petróleo sustancia que tiene elevado potencial para la ocurrencia de riesgos industriales.

***Segunda Fase:*** Selección del material clave y cálculo del Factor Material.

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 quizá el elemento

más tóxico se escoge como material clave el crudo pues al ser más abundante, representa el mayor riesgo en la unidad.

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.

**Tercera Fase:** Cálculo de factores de penalización de riesgo.

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 empresa

Primeramente, se estiman los Riesgos especiales del Material atendiendo a las características del material clave. El grado de riesgo del material clave está en función de si se trata de un gas denso o ligero, líquido inflamable, gas licuado inflamable, material viscoso, entre otros, aunque el factor de material sea sensiblemente constante. En los materiales oxidantes no se aplica un factor porque estamos en presencia de reacciones de oxidación controlada. Con respecto a la formación de gas combustibles se le asigna un valor de cero porque el material reactivo es inflamable. Como el material clave es altamente viscoso se debe seleccionar un factor  $m$  para los aspectos de riesgo de mezclado y dispersión por fugas o derrames de -20. A los líquidos pirofóricos se les asigna un factor de 100. La guía para seleccionar factores de sensibilidad a la ignición se basa en estándares de clasificación eléctrica para equipo de gas y de vapor (Anexo 8) como el crudo es un líquido con alta sensibilidad a la ignición se le asigna un valor de 150. 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. Se le asigna un valor de 900 a las propiedades de la fase condensada debido que el crudo es propenso a detonar, además que posee propiedades propulsivas. Con respecto a otros comportamientos extraños se le asigna un valor de 150 porque la sustancia objeto de estudio pueden producir fuego espontáneo o explosión. Los resultados se ofrecen en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3:** Riesgos especiales del material.

<b>RIESGOS ESPECIALES DEL MATERIAL (M)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Productos oxidantes	0 a 20	0
Dar lugar a gas combustible	0 a 30	0
Características de mezcla y dispersión (m)	-50 a 100	-20
Puede inflamarse espontáneamente	30 a 250	100
Puede polimerizarse espontáneamente	25 a 75	25
Sensibilidad a la ignición	-75 a 150	150
Puede dar descomposición explosiva	75 a 125	125
Puede dar lugar a detonación del gas	0 a 150	0
Propiedades de la fase condensada	200 a 1500	900
Otros	0 a 150	150
<b>Factor de Riesgos Especiales del Material (M)</b>		1430

Como en los tanques de almacenamiento no se lleva a cabo ninguna reacción química, sino que solamente se guarda el petróleo, para la determinación de los riesgos generales del proceso (Ver Tabla 3.4) se la asigna un valor de 50 a la manipulación y cambios físicos porque cuando un material que está siendo almacenado está caliente y tiene una fase acuosa separada, como el caso estudio se usa dicho valor. El desplazamiento del material posee un factor de 50 debido a que las operaciones de llenado o vaciado se efectúen a través de compuertas u otras tapas o salidas inferiores (por ejemplo: reactores *batch*, mezcladores, centrifugas, filtros).

**Tabla 3.4:** Riesgos generales del proceso

<b>RIESGOS GENERALES DEL PROCESO (P)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Manipulación y cambios físicos	10 a 60	50



Reacciones continuas simples	25 a 60	0
Reacción batch	10 a 60	0
Multiplicidad de reacciones	25 a 75	0
Desplazamiento del material	0 a 150	50
Contenedores transportables	10 a 100	0
Factor de Riesgos Generales del Proceso (P)		100

Para la determinación de los riesgos especiales del proceso (S) hay que tener en cuenta que la unidad seleccionada trabaja a presiones atmosféricas. 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.

Atendiendo lo expuesto por el procedimiento 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. 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.

Al evaluar las operaciones en o cerca del rango inflamable se aplica un factor de 100 debido a que las reacciones de procesos y otras operaciones que se efectúen cerca del rango inflamable donde se debe tener confianza en la instrumentación para permanecer fuera de los límites poseen dicho valor. Los riesgos de explosión superior al valor medio cuentan con un factor de 100 porque para los procesos que usen líquidos 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 del edificio o atmósfera circundante, se aplica un factor de 40 pero también se debe tener en cuenta que a los procesos con riesgo de explosión de vapor, como el caso de estudio, se les asigna un factor de 60 por tanto por la acumulación de ambos factores se obtiene un valor de 100 el cual antes fue mencionado.

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. Con respecto a los riesgos por electricidad estática 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 dichas cargas.

**Tabla 3.5:** Riesgos especiales del proceso.

<b>RIESGOS ESPECIALES DEL PROCESO (S)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Presión baja ( $P < 15$ psia)	50 a 150	100
Presión alta (p)	0 a 150	0
Temperatura baja (CS $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	0 a 30	0
Temperatura baja (CS a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	30 a 100	0
Temperatura baja (Otros materiales)	0 a 100	0
Temperatura alta (Material inflamable)	0 a 35	35
Temperatura alta (Resistencia del material)	0 a 100	0
Corrosión y erosión	0 a 400	100
Fugas por juntas y cierres	0 a 60	30
Vibración y fatiga	0 a 100	30
Proceso/Reacciones difíciles de controlar	20 a 300	0
Operación cerca/en el rango de inflamabilidad	25 a 450	100

Riesgo de explosión superior al valor medio	40 a 100	100
Riesgo de explosión por polvo o neblina	30 a 70	50
Oxidantes potentes	0 a 100	0
Sensibilidad del proceso a la ignición	0 a 400	25
Riesgo de electricidad estática	10 a 200	100
<b>Factor de Riesgos Especiales del Proceso (S)</b>		670

La cantidad de material se registra como cantidad total de peso. Se asigna el factor de cantidad por medio de 3 gráficas (Ver Anexo 9), 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. Los resultados se ofrecen en la Tabla 3.6.

**Tabla 3.6:** Riesgos asociados a las cantidades.

<b>RIESGOS ASOCIADO A LAS CANTIDADES (Q)</b>	<b>VALOR</b>
Cantidad total de material (K) [t]	4032.00
<b>Factor de Cantidad (Q)</b>	250.00

Para el Riesgo por Arreglo de los Equipos o Riesgos de Implantación (L) (Ver Tabla 3.7) 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. 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 ton o más de material inflamable, el factor a utilizar es de 15 y para estructuras abiertas de proceso sin pisos intermedios sólidos o diques locales y con más de 5 ton de material inflamable presentes en un recipiente cuya base tenga una elevación de 7 m sobre

el nivel del piso, factor de 50 por tanto el diseño de la estructura se la aplica un valor de 65 el cual es el resultado de la acumulación de los factores antes mencionados. Para el análisis del efecto domino hay que tener en cuenta que las unidades de proceso muy altas tienen más probabilidad de crear un efecto de Dominó, especialmente si son unidades con base pequeña, por lo cual, si la unidad tiene más de 20 m de altura, se aplica un factor de 20 de acuerdo con la escala. 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. Dentro de otros aspectos se penaliza con 150 porque la unidad estudiada no se encuentra a menos de 10 m del cuarto de control principal, cafetería, oficinas o límite de talleres ni está construida sobre o abajo de la casa de control, oficinas, etc.

**Tabla 3.7:** Riesgos asociados a la distribución en Planta.

<b>RIESGOS ASOCIADOS A LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA (L)</b>		<b>VALOR</b>
Altura (H) [m]		12
Área de trabajo (N) [m <sup>2</sup> ]		1800
	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Diseño de la estructura	0 a 200	65
Efecto dominó	0 a 250	20
Bajo tierra	50 a 150	0
Superficie de drenaje	0 a 100	100
Otros	50 a 250	150
<b>Factor de Riesgos asociados a la Distribución en Planta (L)</b>		<b>335</b>

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 3.8). 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 3.8:** Riesgos asociados a toxicidad.

<b>RIESGOS ASOCIADOS A DAÑOS GRAVES A LA SALUD (T)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Efectos sobre la piel	0 a 300	0
Efectos por inhalación	0 a 150	150
<b>Factor de Riesgos Asociados a Daños Graves a la Salud (T)</b>		150

**Cuarta Fase:** Cálculo de Índices de Riesgo Potencial.

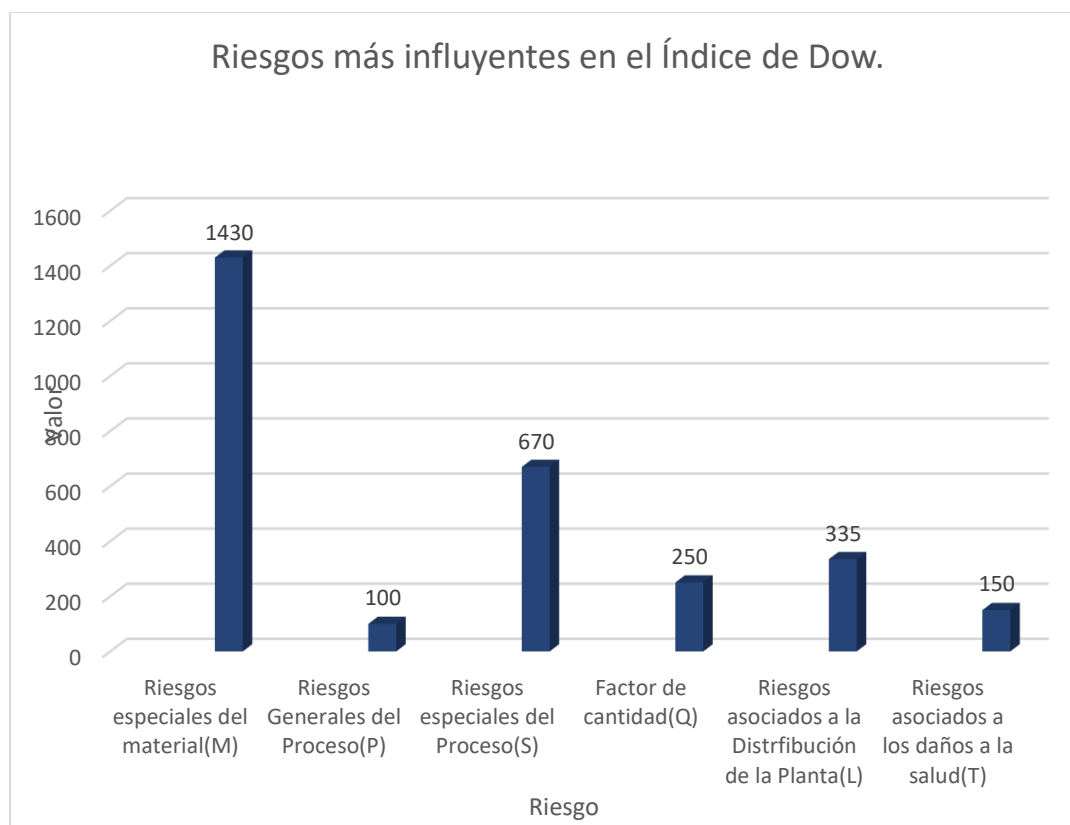
La cuarta etapa de esta metodología se basa en calcular los índices de riesgo potencial que son los que subsisten en caso de fallar todas las medidas de prevención, protección y control. Estos índices dan una medida del peligro que presenta la unidad analizada.

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 la Tabla 3.9.

**Tabla 3.9:** Resultados del cálculo de los Índices de Riesgo Potencial.

<b>Índices de Riesgo</b>	<b>Valor</b>	<b>Grado total de Riesgo</b>
Global Equivalente de Dow (D)	9774,75	Muy catastrófico
Incendio (F)	975000	Muy alto
Explosión interna (E)	23	Muy alto
Explosión Aérea(A)	1301,08	Muy alto
Índice unitario de toxicidad(U)	34,50	Muy alto
Índice máximo incidente tóxico(C)	8625	Muy alto
Factor Global de Riesgo(R)	310077490,46	Muy extremo

Como se aprecia, en todos los Índices existen variaciones en el Grado Total de Riesgo que van desde muy alto hasta muy catastrófico. En la metodología del subepígrafe 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 equivalente de Dow se clasifica como muy catastrófico en la unidad, donde los riesgos que más influyen se pueden observar en el gráfico de la figura 3.1



**Figura 3.1: Riesgos más influyentes en el cálculo del índice de Dow .**

Como se observa en la figura los riesgos más influyentes corresponden a los especiales del proceso (S) y los riesgos especiales del material (M). Dentro de los riesgos especiales del material (Ver Tabla 3.3) es más problemático es las propiedades de la fase condensada. Este parámetro tampoco se puede variar pues la sustancia objeto de estudio posee propiedades de propulsión y a la ocurrencia de una explosión de gas o de fase vapor puede iniciarse una explosión de fase condensada. Sin embargo, dentro de los riesgos especiales del proceso (Tabla 3.5) los que más inciden son los asociados a la 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 este tanque se llena y vacía cada ciclo de tratamiento (24 horas) que puede dar lugar a chispas y que el tanque explote. Por tanto, hay que cuidar de la corrosión y erosión del tanque y de 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. Otros de los riesgos incidentes son la baja presión, la operación cerca del rango de inflamabilidad y el riesgo a las explosiones los cuales son inseguridades propias del proceso y de las características de la sustancia estudio por lo que no se puede elaborar ningún plan de mantenimiento excepto mantener una exhaustiva custodia.

Por otra parte, los índices U y C se clasifican como muy alto atendiendo al grado total de riesgo, 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 especiales de proceso, los riesgos del material 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. Se encuentra continuamente como resultado de pequeñas fugas en juntas, empaques y en el venteo de los gases del proceso.

El índice de potencial de fuego (F) representa un riesgo muy alto 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 un tanque de gran tamaño entonces el riesgo de producirse un incendio devastador se incrementa. Tanto el índice de Explosión Interna (E) como el de Explosión Aérea (A) se encuentran en la categoría muy alta de riesgo. En el primer caso se debe a la acción de los riesgos especiales del proceso y del material. En el caso de Explosión Aérea este depende de los riesgos asociados a las cantidades, así como de las altas temperaturas del proceso.

Por último, el valor del Factor Global de Riesgo (R) es muy extremo lo cual es un valor lógico si se tiene en cuenta que depende de los índices de riesgo analizados anteriormente y que en todos los casos ofrecen resultados alarmantes debido a la peligrosidad del proceso.

**Quinta Fase:** Determinación de los factores de bonificación.

Los factores seleccionados en cada apartado se multiplican entre sí para obtener los valores de K1 a K6. Primeramente, las bonificaciones por sistemas de contención (K1) 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 la obtención del Factor de Bonificación por Contención (**K1**) se le asigno un valor de 1 a los tanques a presión porque el recipiente está deteriorado. Los tanques de almacenamiento atmosféricos verticales se usan para almacenar líquidos y gases licuados a presiones que van de 6 mbar de vacío interno a una presión de vapor interna máxima de 140 mbar (más el peso del contenido) y se diseñan de acuerdo con los estándares de ingeniería aprobados. No es posible en los mismos hacer una prueba de presión al grado que normalmente se hace con un recipiente a presión. El esfuerzo adicional que se tiene en dichos tanques por efecto de la corrosión, es menor en los tanques de diámetro grande que con los tanques de almacenamiento pequeños. Por estas razones, un tanque de almacenamiento vertical de gran diámetro no garantiza un factor de disminución aun cuando se estipule en los Códigos de Diseño el uso de una pequeña cantidad de pruebas no-destructivas por lo que se le aplica un valor de 1. Las tuberías que se usan para transportar cantidades de materiales peligrosos entre unidades de una planta o entre fábricas a través del campo o a terceras partes, frecuentemente se diseñan con estándares superiores a los normales para tuberías de proceso, a las mismas se le aplica un factor de 0.81 debido a que el tipo de diseño y construcción, adoptado es una categoría más resistente que el tipo especificado. La detención y control de fuga se le aplica un valor de 1 porque el sistema de detección de fugas permite a los operadores en el cuarto de control la rápida identificación del punto que requiere aislarse y/o despresurizarse. Al sistema de venteos de emergencia se le asigna un valor de 1 porque las sustancias de desecho se depositan en una fosa alejada cumpliendo con las medidas del medio ambiente. Los resultados se evidencian en la Tabla 3.10.



**Tabla 3.10:** Riesgos asociados a la contención.

<b>RIESGOS ASOCIADOS A LA CONTENCIÓN (K1)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Tanques a presión	0.8 a 0.9	1
Tanques verticales	0.8 a 0.9	1
Tuberías de transferencia	0.6 a 0.9	0.81
Otras barreras adicionales	0.45 a 0.9	0.64
Detección y control de fugas	0.7 a 0.95	1
Venteos de emergencia	0.9 a 0.95	1
<b>Factor de Bonificación por Contención (K1)</b>		0.52

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.

Los factores especiales tales como sistemas de enfriamiento de emergencia para el proceso, suministro de energía de emergencia para operaciones vitales (como unidades de refrigeración, agitadores y bombas) y sistemas de gas inerte, están claramente relacionados con el control de procesos bajo condiciones anormales y constituyen frecuentemente un factor esencial para cualquier sistema de paro de seguridad. 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 3.11.

Como se cuenta con sistema de alarma capaz de identificar condiciones anormales específicas del proceso que representan situaciones peligrosas, con generadores de emergencia como el caso de los grupos electrógenos y sistema de enfriado de emergencia capaces de operar alrededor de 10 minutos luego de ocurrir un evento indeseable. Con relación al estudio de actividades peligrosas se designa un factor de acuerdo al tiempo y al personal con experiencia disponible para el estudio de riesgos.

Al sistema de alarmas, a las paradas de seguridad regulada, a la protección contra reacciones fuera de control y a los procedimientos normalizados de operación se le asignan un factor de 0.95 porque 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 además de que el sistema de paro de seguridad está constituido solamente por funciones individuales de disparo o paro u operaciones de venteo. A los generadores y el sistema de enfriamiento de emergencia se les otorga un valor de 0.9 porque se cuenta con un suministro de energía de emergencia con cambio automático y el sistema de enfriamiento es capaz de proporcionar el 150% de los requerimientos marcados en el diagrama de flujo durante 10 min. El estudio de actividades peligrosas se le aplica un valor de 1 porque el personal de la empresa posee la experiencia necesaria para el estudio de riesgos. La planta está controlada por computadora en línea directamente a los controles y monitores de flujo de proceso, de manera que continuamente se toman acciones correctivas, se logra generalmente una operación más uniforme que con instrumentación o control manual por estas razones se le aplica un factor de 0.85.

**Tabla 3.11:** Riesgos asociados al Control de Procesos.

<b>CONTROL DE PROCESO (K2)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Sistema de alarmas	0.9 a 0.95	0.95
Generadores de emergencia	0.9	0.9
Sistema de enfriado de emergencia	0.9 a 0.95	0.9
Sistema de gases de inertización	0.8 a 0.95	1
Estudio de actividades peligrosas	0.7	1
Paradas de seguridad reguladas	0.7 a 0.9	0.95
Control automático por ordenador	0.85 a 0.96	0.85
Protección contra reacciones fuera de control	0.8 a 0.95	0.95
Procedimientos normalizados de operación	0.75 a 1	0.95
Vigilancia de la planta	0.9 a 0.97	0.97

<b>Factor de Bonificación por Control del Proceso (K2)</b>	0.54
--	------

La conducta 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 3.12. 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 por lo antes mencionado se aplica un factor de 0.9.

**Tabla 3.12:** Actitud frente a temas de seguridad.

<b>ACTITUD FRENTA A TEMAS DE SEGURIDAD (K3)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Implicación de la gerencia	0.9 a 0.95	0.95
Entrenamientos de seguridad	0.85 a 0.95	0.9
Procedimientos de mantenimiento y seguridad	0.8 a 0.97	0.9
<b>Factor de Bonificación por Actitud por la Seguridad (K3)</b>		<b>0.77</b>

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. Las bonificaciones de cada uno de los caracteres se muestran en la Tabla 3.13. La protección de la estructura se le asigna un valor de 0.8 porque las medidas de seguridad cubren toda la unidad y poseen una duración hasta de cinco horas. A los muros cortafuegos poseen un factor de reducción de 0.80 porque la pared cuenta con una duración de 4 horas.

**Tabla 3.13:** Protección contra fuego.

<b>PROTECCIÓN FÍSICA CONTRA FUEGOS (K4)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Protección de la estructura	0.8 a 0.98	0.8
Muros cortafuegos	0.8 a 0.97	0.8
Equipamiento de protección	0.5 a 0.97	0.65
<b>Factor de Bonificación por Protección Física Contra Fuegos (K4)</b>		0.41

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 3.14. En el caso de ocurrir una fuga de material, el sistema de ventilación pueda ser accionado a control remoto para reducir el peligro.

**Tabla 3.14:** Aislamiento del material.

<b>AISLAMIENTO DEL MATERIAL (K5)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Sistema de válvulas	0.65 a 0.9	0.9
Ventilación	0.9	1
<b>Factor de Bonificación por Aislamiento del Material (K5)</b>		0.90

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 3.15). 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. Con respecto a los suministros de agua se le aplica un factor de 0.85 porque se dispone de un gasto no menor de 10,000 galones imperiales /min (2730 m<sup>3</sup>/h) a una presión de 100

psig (7 bars manométricos). La empresa posee ventiladores para humo colocados en los techos de edificios de almacenamiento, además de separadores de humo a nivel del techo para evitar que otros edificios se vean afectados por lo que se aplica un factor de 1. Se le aplica un valor de 0.73 a las instalaciones de espuma y otros inertizantes porque la sección cuenta con un sistema fijo de CO<sub>2</sub> como gas inerte. Además, la planta cuenta en todo momento con suficientes extintores, suministro y rociadores de agua.

**Tabla 3.15:** Combate contra incendios.

EQUIPO DE INTERVENCIÓN CONTRA INCENDIOS (K6)	RANGO	VALOR
Alarma de incendio	0.9 a 0.98	0.9
Extintores	0.85 a 0.95	0.81
Suministro de agua	0.75 a 1	0.85
Sistema de monitores o rociadores	0.87 a 0.97	0.90
Espuma y otros inertizantes	0.7 a 0.9	0.73
Brigada contra incendio	0.7 a 0.9	0.9
Cooperación Exterior	0.85 a 0.9	0.85
Ventilación de humos	0.8 a 0.9	1
<b>Factor de Bonificación por Lucha Contra Incendio (K6)</b>		0.31

**Sexta Fase:** Cálculo de Índices Corregidos.

Esta fase corresponde a la etapa final del índice de Mond, donde con ayuda de las bonificaciones que se determinaron anteriormente, se corrigen los índices F, E, A y R. Para ello se usan las ecuaciones 2.10, 2.11, 2.12 y 2.13. Los resultados se pueden observar en la Tabla 3.16.

**Tabla 3.16:** Relación entre los índices y sus valores corregidos.

Índice	Valor inicial	Valor actual	RFPD(%)
Incendio(F)	975000	109000	88.8%
Explosión Interna(E)	23	9.66	58%
Explosión área (A)	1301,08	255,46	80.3%
Factor Global de Riesgo (R)	310077490,46	29797035,75	90,4%

RPD: diferencia porcentual relativa de reducción

Como se puede observar los índices F, E, A y R se reducen entre un 58% y 90%, de forma tal que no representan un peligro para la unidad ni amenaza para el personal que allí radica, siempre y cuando se cumplan con todos los protocolos de seguridad establecidos y se utilicen los medios de protección necesarios.

No obstante, el índice máximo de accidente tóxico (C) no se corrige a partir de las bonificaciones que se añaden al incluir los sistemas de seguridad y protección. Por esta razón se debe mantener que, aunque según el índice de riesgo global de MOND (R), la unidad estudiada presenta un nivel de riesgo de operación aceptable, se debe mantener extremo cuidado en mantener todos los sistemas de seguridad funcionando en estado óptimo, se debe realizar el mantenimiento adecuado en el tiempo programado y la preparación del personal de la planta debe estar rigurosamente al día. El riesgo de accidente tóxico existe, es muy alto y está latente. Depende de los operadores y tecnólogos de la planta de procesamiento de crudo reducir su posibilidad de ocurrencia.

3.2.2 Análisis de los resultados obtenidos del cálculo del Índice de Mond para el tanque de almacenamiento de nafta.

**Primera Fase:** Dividir la planta en secciones.

Para la realización de esta fase se siguen los mismos aspectos utilizados en el estudio anterior, pero con la variación que se seleccionan los tanques de almacenamiento de nafta del área de ventas.

**Segunda Fase:** Selección del material clave y cálculo del Factor Material.

Para que un material se seleccione como material clave, debe estar presente en tal magnitud que sea peligroso como se expuso anteriormente. La nafta al ser un derivado del petróleo posee menor cantidad de carbono lo que la hace muy volátil y propensa a la ocurrencia de accidentes.

Para el cálculo del factor material se utiliza la ecuación 2.1 que depende únicamente del calor de combustión de la nafta (45120 BTU/lb) a temperatura y presión atmosférica. En este caso se obtuvo un factor material (B) igual a 45.12.

**Tercera Fase:** Cálculo de factores de penalización de riesgo.

El nivel de los valores se aplica utilizando la misma metodología y análisis explicado con anterioridad siempre teniendo las características propias de la sustancia en estudio.

En la tabla 3.17 se encuentran los resultados de la estimación de los Riesgos especiales del Material. En este caso se le asigna un valor de 100 a los parámetros de inflamabilidad espontánea y a la sensibilidad a la ignición debido a las propiedades pirofóricas de la nafta. A la descomposición explosiva y las propiedades en fase condensada se le otorgan un factor de 125 y 800 respectivamente debido a la capacidad de detonación que posee la sustancia estudio.

**Tabla 3.17:** Riesgos especiales del material para la nafta.

<b>RIESGOS ESPECIALES DEL MATERIAL (M)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Productos oxidantes	0 a 20	0
Dar lugar a gas combustible	0 a 30	0
Características de mezcla y dispersión (m)	-50 a 100	-20
Puede inflamarse espontáneamente	30 a 250	100
Puede polimerizarse espontáneamente	25 a 75	0
Sensibilidad a la ignición	-75 a 150	100
Puede dar descomposición explosiva	75 a 125	125
Puede dar lugar a detonación del gas	0 a 150	0
Propiedades de la fase condensada	200 a 1500	800
Otros	0 a 150	0
<b>Factor de Riesgos Especiales del Material (M)</b>		<b>1105</b>

Como en los tanques de almacenamiento no se lleva a cabo ninguna reacción química para la determinación de los riesgos generales del proceso (Ver Tabla 3.18) se la asigna un valor de 10 porque el almacenamiento de dicho material inflamable cuenta con protección adecuada (dique o equivalente) y está separado de las operaciones de carga y descarga. El desplazamiento del material posee un factor de 50 debido a que las operaciones de llenado o vaciado se efectúen a través de compuertas u otras tapas o salidas inferiores (por ejemplo: reactores batch, mezcladores, centrifugas, filtros). Los contenedores transportables son autos cisternas, pipas y tráiler por lo que se le otorga un factor de 100.

**Tabla 3.18:** Riesgos Generales del Proceso.

<b>RIESGOS GENERALES DEL PROCESO (P)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Manipulación y cambios físicos	10 a 60	10
Características de la reacción	25 a 60	0
Reacción batch	10 a 60	0
Multiplicidad de reacciones	25 a 75	0
Desplazamiento del material	0 a 150	50
Contenedores transportables	10 a 100	100
<b>Factor de Riesgos Generales del Proceso (P)</b>		160

Para la determinación de los riesgos especiales del proceso (S) (Tabla 3.19) hay que tener en cuenta que la unidad seleccionada trabaja a presiones atmosféricas. 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. Al analizar los parámetros de fuga por juntas y cierres y las vibraciones y fatigas se aplica un factor de 30 siguiendo la metodología aplicada anteriormente. A la corrosión y erosión se le asigna un valor de 100 al igual que las operaciones cerca del rango de inflamabilidad por poseer una velocidad de corrosión mayor que 1mm/año y poseer un almacenamiento que el espacio de vapor pueda entrar



en el rango de combustión durante el llenado y el vaciado además de la existencia de la probabilidad que se pueda producir un espacio de vapor inflamable por la entrada de líquido caliente. Al riesgo de explosión mayor se le otorga un valor de 140 debido a que la nafta es muy inflamable que una fuga resulta en rápida vaporización y formación probable de concentración inflamable en una gran parte el edificio o atmósfera circundante.

**Tabla 3.19:** Riesgos especiales del proceso.

<b>RIESGOS ESPECIALES DEL PROCESO (S)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Presión baja (P < 15 psia)	50 a 150	100
Presión alta (p)	0 a 150	0
Temperatura baja (CS 10 °C a -25°C)	0 a 30	0
Temperatura baja (CS a -25°C)	30 a 100	0
Temperatura baja (Otros materiales)	0 a 100	0
Temperatura alta (Material inflamable)	0 a 35	0
Temperatura alta (Resistencia del material)	0 a 100	0
Corrosión y erosión	0 a 400	100
Fugas por juntas y cierres	0 a 60	30
Vibración y fatiga	0 a 100	30
Proceso/Reacciones difíciles de controlar	20 a 300	0
Operación cerca/en el rango de inflamabilidad	25 a 450	100
Riesgo de explosión superior al valor medio	40 a 100	140
Riesgo de explosión por polvo o neblina	30 a 70	50
Oxidantes potentes	0 a 100	0
Sensibilidad del proceso a la ignición	0 a 400	25
Riesgo de electricidad estática	10 a 200	100

<b>Factor de Riesgos Especiales del Proceso (S)</b>	675
---	-----

Para determinar los riesgos asociados a las cantidades se asigna los factores mediante 3 gráficos (Anexo 9) aplicando el mismo procedimiento explicado precedentemente. Los resultados obtenidos se evidencian en la tabla 3.20.

**Tabla 3.20:** Riesgos asociados a las cantidades de nafta.

<b>RIESGOS ASOCIADO A LAS CANTIDADES (Q)</b>	<b>VALOR</b>
Cantidad total de material (K) [t]	131.91
<b>Factor de Cantidad (Q)</b>	90.00

Para el Riesgo por Arreglo de los Equipos o Riesgos de Implantación (L) (Tabla 3.21) 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 como se había explicado. Se le otorga un valor de 75 al diseño de la estructura porque posee ventilación menor de 6 cambios por hora y contengan más de 5 ton de material inflamable por piso (pisos sólidos). La superficie de drenaje se la asigna un valor de 100 debido a que tiene un área de contención de derrame donde el gradiente y/o drenaje a otra fosa es tal que el derrame de la unidad 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.

**Tabla 3.21:** Riesgos Asociados a la distribución de la planta.

<b>RIESGOS ASOCIADOS A LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA (L)</b>		<b>VALOR</b>
Altura (H) [m]		6
Área de trabajo (N) [m <sup>2</sup> ]		300
	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Diseño de la estructura	0 a 200	75

Efecto dominó	0 a 250	0
Bajo tierra	50 a 150	0
Superficie de drenaje	0 a 100	100
Otros	50 a 250	25
<b>Factor de Riesgos asociados a la Distribución en Planta (L)</b>		<b>200</b>

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 (Tabla 3.22). Como el material se puede absorber por la piel y provocar afectaciones por inhalación es necesario tener gran cuidado con la manipulación y tratamiento de la sustancia objeto de estudio. En caso de ruptura o explosión del tanque 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 3.22:** Riesgos asociados a toxicidad.

<b>RIESGOS ASOCIADOS A DAÑOS GRAVES A LA SALUD (T)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Efectos sobre la piel	0 a 300	75
Efectos por inhalación	0 a 150	150
<b>Factor de Riesgos Asociados a Daños Graves a la Salud (T)</b>		<b>225</b>

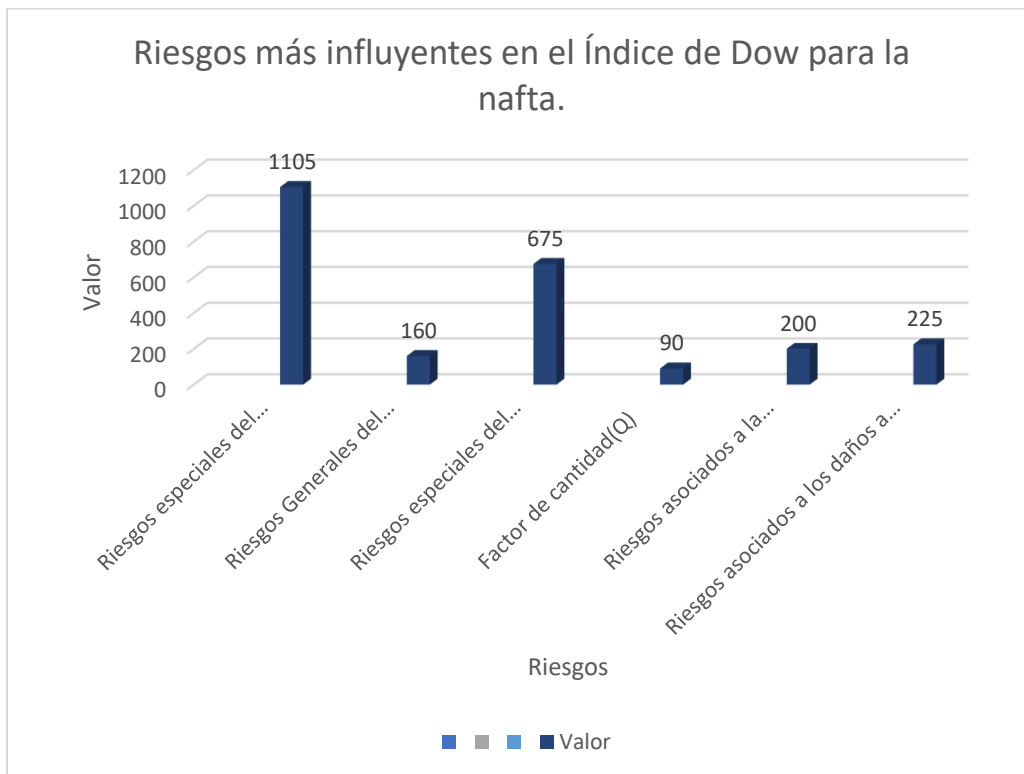
**Cuarta Fase:** Cálculo de Índices de Riesgo Potencial.

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 la Tabla 3.23.

**Tabla 3.23:** Resultados del cálculo de los Índices de Riesgo Potencial.

Índices de Riesgo	Valor	Grado total de Riesgo
Global Equivalente de Dow (D)	18235.56	Muy catastrófico
Incendio (F)	9407000	Muy alto
Explosión interna (E)	20.4	Muy alto
Explosión Aérea(A)	395,18	Alto
Índice unitario de toxicidad(U)	45,90	Muy alto
Índice máximo incidente tóxico(C)	4131	Muy alto
Factor Global de Riesgo(R)	223721688,30	Muy extremo

Como se evidencia, en todos los Índices existen variaciones en el Grado Total de Riesgo que van desde alto hasta muy catastrófico. En la norma del subepígrafe 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. En el primero de los casos, el índice D se clasifica como muy catastrófico en la unidad, donde los riesgos que más influyen se pueden observar en el gráfico de la figura 3.2



**Figura 3.2:** Riesgos más influyentes en el cálculo del índice de Dow para la nafta.

Como se indica en la imagen los peligros más influyentes corresponden a los especiales del proceso (S) y los riesgos especiales del material (M). Dentro de los riesgos especiales del material (Ver Tabla 3.17) el más problemático es las propiedades de la fase condensada. Este parámetro tampoco se puede variar pues la sustancia objeto de estudio es muy inflamable. Posee propiedades de propulsión y a la ocurrencia de una explosión de gas o de fase vapor puede iniciarse una explosión de fase condensada. Sin embargo, dentro de los riesgos especiales del proceso (Tabla 3.19) los que más inciden son los asociados a la 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. 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. Otros de los riesgos incidentes son la baja presión, la operación cerca del rango de inflamabilidad y el riesgo a las explosiones los cuales son inseguridades propias del proceso y de las características de la sustancia estudio por lo que no se puede elaborar ningún plan de mantenimiento excepto mantener una exhaustiva custodia.

Por otra parte, los índices U y C se clasifican como muy alto atendiendo al grado total de riesgo, 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 especiales de proceso y del material.

El índice de potencial de fuego (F) representa un riesgo muy alto 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 un tanque de gran tamaño entonces el riesgo de producirse un incendio devastador se incrementa. Tanto el índice de Explosión Interna (E) como el de Explosión Aérea (A) se encuentran en la categoría muy alta de riesgo. En el primer caso se debe a la acción de los riesgos especiales del proceso y del material. En el caso de Explosión Aérea este depende de los riesgos asociados a las cantidades, así como de las altas temperaturas del proceso.

El valor del Factor Global de Riesgo (R) es muy extremo lo cual es un valor lógico si se tiene en cuenta que depende de los índices de riesgo analizados anteriormente y que en todos los casos ofrecen resultados alarmantes debido a la peligrosidad del proceso y de la sustancia.

**Quinta Fase:** Determinación de los factores de bonificación

Para la obtención del Factor de Bonificación por Contención (**K1**) se le asigno un valor de 1 a los tanques a presión porque no se cuenta con información sobre el código que se utiliza en su construcción o el recipiente está deteriorado. Los tanques de almacenamiento atmosféricos verticales se le aplica un valor de 1 por lo expuesto con anterioridad. Las tuberías que se usan para transportar cantidades de materiales peligrosos se le aplica un factor de 0.7 porque el tipo de diseño y construcción adoptado es dos categorías más resistentes que el especificado. La detención y control de fuga se le aplica un valor de 0.85 porque la detección de la fuga se pueda realizar de manera rápida, por parte de los operadores en el cuarto de control, Los resultados se evidencian en la Tabla 3.24.

**Tabla 3.24:** Riesgos asociados a la contención.

<b>RIESGOS ASOCIADOS A LA CONTENCIÓN (K1)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Tanques a presión	0.8 a 0.9	1
Tanques verticales	0.8 a 0.9	1
Tuberías de transferencia	0.6 a 0.9	0.7
Otras barreras adicionales	0.45 a 0.9	0.45
Detección y control de fugas	0.7 a 0.95	0.85
Venteos de emergencia	0.9 a 0.95	0.9
<b>Factor de Bonificación por Contención (K1)</b>		0.24

Los sistemas de alarmas son puntos claves en el estudio de un proceso por lo que es de vital importancia su cuidado. Como los tanques almacenan una sustancia tan peligrosa como la nafta el sistema de alarma se encuentra en perfecto estado y confiabilidad. El mismo es capaz de identificar condiciones anormales específicas del proceso que representan situaciones peligrosas, con generadores de emergencia como el caso de los grupos electrógenos y sistema de enfriado de emergencia capaces de operar alrededor de 10 minutos luego de ocurrir un evento indeseable. Con relación al estudio de actividades peligrosas se designa un factor de acuerdo al tiempo y al personal con experiencia disponible para el estudio de riesgos. Los resultados se encuentran en la tabla 3.25.

**Tabla 3.25:** Riesgos asociados al Control de Procesos.

<b>CONTROL DE PROCESO (K2)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Sistema de alarmas	0.9 a 0.95	0.9
Generadores de emergencia	0.9	0.9
Sistema de enfriado de emergencia	0.9 a 0.95	0.9
Sistema de gases de inertización	0.8 a 0.95	0.9
Estudio de actividades peligrosas	0.7	0.7
Paradas de seguridad reguladas	0.7 a 0.9	0.85
Control automático por ordenador	0.85 a 0.96	0.95
Protección contra reacciones fuera de control	0.8 a 0.95	0.85
Procedimientos normalizados de operación	0.75 a 1	0.75
Vigilancia de la planta	0.9 a 0.97	0.92
<b>Factor de Bonificación por Control del Proceso (K2)</b>		0.22

El apoyo de los altos cargos es vital para que cualquier proceso se cumpla de manera eficaz y segura. Su conducta contribuye significativamente en la ocurrencia o no de accidentes. 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.

**Tabla 3.26:** Actitud frente a temas de seguridad.

<b>ACTITUD FRENTE A TEMAS DE SEGURIDAD (K3)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Implicación de la gerencia	0.9 a 0.95	0.9

Entrenamientos de seguridad	0.85 a 0.95	0.85
Procedimientos de mantenimiento y seguridad	0.8 a 0.97	0.8
<b>Factor de Bonificación por Actitud por la Seguridad (K3)</b>		0.61

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. Las bonificaciones de cada uno de los caracteres se muestran en la Tabla 3.27.

**Tabla 3.27:** Protección contra fuego.

<b>PROTECCIÓN FÍSICA CONTRA FUEGOS (K4)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Protección de la estructura	0.8 a 0.98	0.9
Muros cortafuegos	0.8 a 0.97	0.9
Equipamiento de protección	0.5 a 0.97	0.8
<b>Factor de Bonificación por Protección Física Contra Fuegos (K4)</b>		0.65

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 3.28. En el caso de ocurrir una fuga de material, el sistema de ventilación pueda ser accionado a control remoto para reducir el peligro.

**Tabla 3.28:** Aislamiento del material.

<b> AISLAMIENTO DEL MATERIAL (K5)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Sistema de válvulas	0.65 a 0.9	0.72



Ventilación	0.9	0.9
<b>Factor de Bonificación por Aislamiento del Material (K5)</b>		0.65

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 3.29). 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. Además, la planta cuenta en todo momento con suficientes extintores, suministro y rociadores de agua.

**Tabla 3.29:** Combate contra incendios.

<b>EQUIPO DE INTERVENCIÓN CONTRA INCENDIOS (K6)</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR</b>
Alarma de incendio	0.9 a 0.98	0.9
Extintores	0.85 a 0.95	0.85
Suministro de agua	0.75 a 1	0.75
Sistema de monitores o rociadores	0.87 a 0.97	0.87
Espuma y otros inertizantes	0.7 a 0.9	0.7
Brigada contra incendio	0.7 a 0.9	0.7
Cooperación Exterior	0.85 a 0.9	0.85
Ventilación de humos	0.8 a 0.9	0.8
<b>Factor de Bonificación por Lucha Contra Incendio (K6)</b>		0.17

**Sexta Fase:** Cálculo de Índices Corregidos.

Esta fase corresponde a la etapa final del índice de Mond, se corrigen los índices F, E, A y R usando las ecuaciones 2.10, 2.11, 2.12 y 2.13. Los resultados se pueden observar en la Tabla 3. 30.

**Tabla 3.30:** Relación entre los índices y su valor corregido.

Índice	Valor inicial	Valor actual	RFPD(%)
Incendio(F)	407000	646000	58,7%
Explosión Interna(E)	20,40	2,72	86,6%
Explosión área (A)	395,18	8,23	97,9%
Factor Global de Riesgo (R)	223721688,30	1504193,19	99,3%

RPD: diferencia porcentual relativa de reducción

Como se puede observar los índices F, E, A y R se reducen entre un 58% y 99%, de forma tal que no representan un peligro para la unidad ni amenaza para el personal que allí radica, siempre y cuando se cumplan con todos los protocolos de seguridad establecidos y se utilicen los medios de protección necesarios.

No obstante, el índice máximo de accidente tóxico (C) no se corrige a partir de las bonificaciones que se añaden al incluir los sistemas de seguridad y protección. Por esta razón se debe mantener que, aunque según el índice de riesgo global de MOND (R), la unidad estudiada presenta un nivel de riesgo de operación aceptable, se debe mantener extremo cuidado en mantener todos los sistemas de seguridad funcionando en estado óptimo, se debe realizar el mantenimiento adecuado en el tiempo programado y la preparación del personal de la planta debe estar rigurosamente al día.

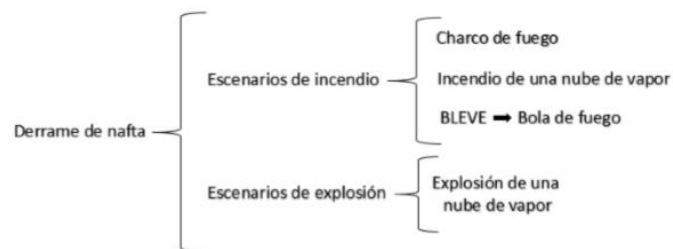
### 3.2 Análisis de resultados del software ALOHA.

Las simulaciones realizadas en el software ALOHA, se llevan a cabo con el objetivo de obtener parámetros suficientes para la valoración correcta del escalado de un accidente primario de incendio y/o explosión y del impacto del mismo sobre el medio ambiente y los recursos humanos. Además, se obtiene el alcance del accidente en un radio determinado.

Para el análisis de las corridas en ALOHA se tuvo en cuenta las siguientes condiciones:

- ✓ Se realiza un estudio de las variables climatológicas durante el mes de octubre. Después de un análisis se decide trabajar con los valores más recurrentes.
- ✓ Se analiza las características de las sustancias de estudio entre las que podemos destacar la nafta solvente que se evalúa como n-hexano, mientras que en el caso del petróleo se calcula el carbono equivalente y teniendo en cuenta la composición que presenta el petróleo en la industria se obtuvo que la sustancia que presenta características similares al crudo es el tridecano.
- ✓ Los escenarios se realizan tomando una rotura rectangular en el fondo de los tanques como situación problemática.
- ✓ En el caso de los escenarios de charco de fuego, las corridas se realizan para los cuatro momentos extremos (día a temperatura máxima y mínima y noche a temperatura máxima y mínima).
- ✓ Para el caso de la formación de una nube de vapor, se realizaron las corridas para la dirección noreste del viento que se corresponde con las mayores velocidades del viento durante el momento del día donde se registran mayores temperaturas.
- ✓ En el caso del BLEVE se realiza una sola corrida por cada unidad de proceso, puesto que este fenómeno no depende de las condiciones climatológicas sino del volumen o cantidad de material involucrado en el mismo y de la geometría de la fuente.

Las figuras que se muestran a continuación reflejan los escenarios que serán analizados en el área de estudio a partir de un derrame de nafta en el caso de la figura 3.3 y a partir de un derrame de petróleo en la figura 3.4.



**Figura 3.3: Posibles escenarios de incendio y explosión a partir de un derrame de nafta.**



**Figura 3.4: Posibles escenarios de incendio y explosión a partir de un derrame de petróleo.**

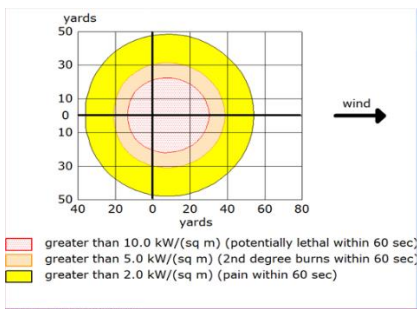
Para una mejor comprensión y estudio del área de ventase divide la misma en dos subáreas que se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 3.31: Subáreas del área de venta.**

Subáreas	Subárea 1	Subárea 2
Sustancias	Petróleo	Nafta
Unidades del proceso.	Tanque 101, 102, 103, 104 e intercambiadores de calor	Tanques 701, 702, 703 y 704

### 3.2.1 Estimación del alcance del escenario charco de fuego (Pool Fire)

En este epígrafe se muestran los resultados del alcance de los escenarios de charco de fuego, los cuales son los más propensos a ocurrir en una industria de petróleo debido a su frecuencia y el posible daño que puede llegar a causar sobre las personas e instalaciones.

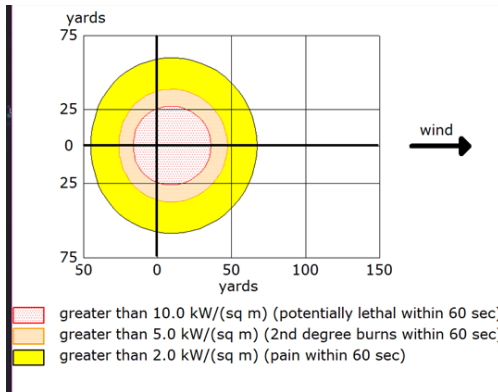


**Figura 3.4: Alcance del escenario del charco de fuego (Pool Fire) en el tanque 103**

En la figura 3.4 se evidencia el alcance que tienen las radiaciones de charco de fuego con respecto al tanque 103, donde se puede observar que en caso que ocurra un derrame de petróleo en dicho tanque el escenario podría destruir toda el área de la Estación Cabecera del Oleoducto, área de gran importancia en la transportación del crudo hacia la comercializadora de Matanzas. Además, existen equipos que son sometidos a intensidades de radiaciones de  $10 \text{ kW/m}^2$  entre los que se encuentran los 4 tanques de almacenamiento de crudo y nafta, sustancias altamente inflamables y volátiles, además, según la simulación del software esta intensidad de radiación es potencialmente letal para el personal del área en menos de 60 segundos de exposición.

Los intercambiadores de calor y las bombas Booster y magistrales se verían afectadas también en caso de ocurrencia de este evento ya que se encuentran dentro de las radiaciones de  $5 \text{ kW/m}^2$ , radiaciones aun altas y peligrosas tanto para la instalación como para las personas que se encuentran dentro del radio. Sin embargo, estos equipos presurizados son menos propensos a fallar ya que generalmente tienen un tiempo de falla más alto que los tanques de almacenamiento atmosférico según (Gyenez *et.al*, 2017), (Green y Perry, 2008) debido a que presenta mayor espesor en la carcasa, que puede retrasar el calentamiento exterior del recipiente.

En las figuras 3.5 se muestra la magnitud que tienen las radiaciones de charco de fuego con respecto al tanque 703 de nafta. Donde se observa que el alcance en caso de ocurrir un derrame de nafta afectaría no solo a estos tanques sino también a los tanques de petróleo y provocar así un efecto domino. Al comparar el alcance obtenido del tanque 103 con respecto al tanque 703 existe una gran diferencia siendo el alcance mayor el del tanque 103, esto se debe fundamentalmente a que los tanques de petróleo tienen un volumen mucho más grande que los tanques de nafta y por esta razón es que su alcance es mucho mayor. Con radiaciones superiores a  $5 \text{ kW/m}^2$  se vería afectada el área de almacenamiento de crudo y afectaciones sobre los operadores y técnicos del área.

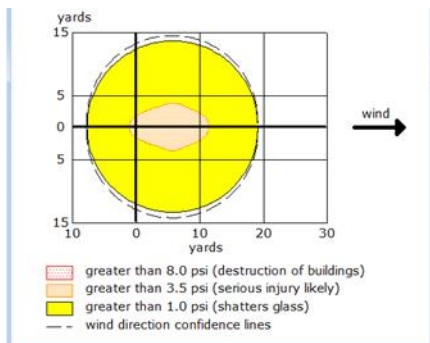


**Figura 3.5:** Alcance del escenario del charco de fuego (*Pool Fire*) en el tanque 703.

### 3.2.2 Estimación del alcance de los escenarios explosión de una nube de vapor.

El escenario explosión de una nube de vapor (VCE) depende en gran medida de la dirección y la velocidad del viento ya que ejercen gran influencia en la dispersión de la nube. Este escenario se caracteriza por el surgimiento de una sobrepresión que se origina cuando la nube de gas explota.

En las figuras 3.6 se muestra el alcance de una nube de vapor explosiva con respecto al tanque 703 y los valores de sobrepresión en función de las distancias.



**Figura 3.6:** Alcance de una nube de vapor explosiva con respecto al tanque 703 de nafta.

Lo más significativo en este escenario es que no se alcanza el efecto provocado por sobrepresiones mayores que 8 psi (LOC-3), que provoca la destrucción de edificios, solo se pueden presentar como riesgos los de menor afectación. Se observa como en la figura 3.6 el radio de la nube de vapor cubre toda el área objeto de estudio. Sus efectos pueden alcanzar hasta 11 m desde la fuente de explosión, a una sobrepresión en este punto de 3.5 psi (24.11 kPa), que puede provocar lesiones graves en las personas; y puede llegar hasta

20 metros, con una sobrepresión de 1 psi (6.89 kPa), que ocasiona rotura de cristales, ruidos intensos para el oído humano, y pérdida temporal de la audición. (Wells, 2003)

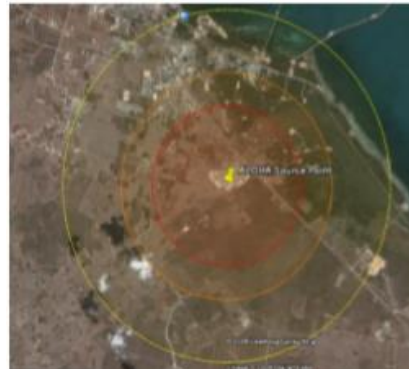
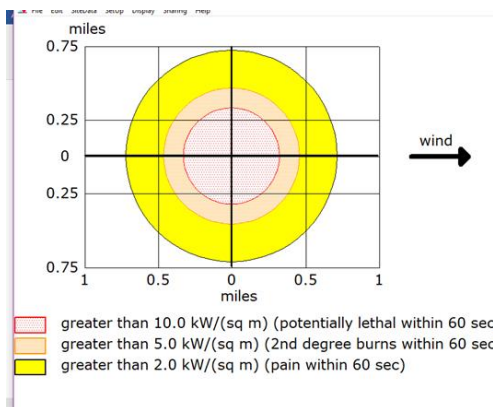
### 3.2.3 Estimación del alcance de los escenarios BLEVE.

Normalmente el BLEVE se origina como accidente secundario por un incendio externo que incide sobre la superficie de un recipiente a presión, especialmente por encima del nivel líquido, debilitando su resistencia y acabando en una rotura repentina del tanque, el cual si almacena sustancias inflamables da lugar a la conocida bola de fuego. En la tabla 3.32 se muestran los diferentes resultados que se obtuvo a partir del software ALOHA para este escenario.

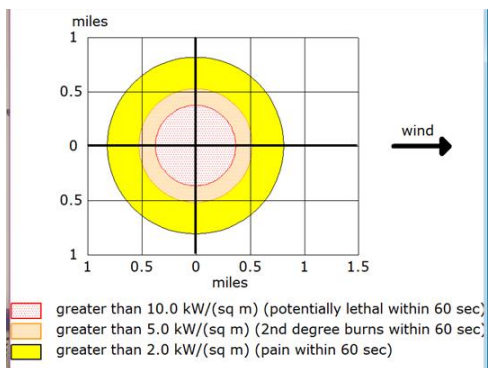
**Tabla 3.32:** Resultados de la simulación en ALOHA para BLEVE.

<b>Parámetros</b>	<b>Tanque de Petróleo (103)</b>	<b>Tanque de nafta (703)</b>
Diámetro de la bola de fuego(m)	254,2 m	288,95 m
Tiempo del accidente(s)	15 s	17 s
Distancia (m) que alcanza la radiación de 10,0 kW/m <sup>2</sup> (zona roja)	523,95 m	595,27 m
Distancia (m) que alcanza la radiación de 5,0 kW/m <sup>2</sup> (zona naranja)	740,66 m	841,24 m
Distancia (m) que alcanza la radiación de 2,0 kW/m <sup>2</sup> (zona amarilla)	1152,14 m	1308,50 m

Como se puede observar la bola de fuego tiene típicamente una duración limitada, generalmente muy inferior a la de 60 segundos lo que hace cuestionable la posibilidad de daño por radiación a los equipos del proceso es escasa. Los efectos de las bolas de fuego son devastadores, el alcance provocará la muerte de todo ser vivo que quede encerrado en el radio de operación y la posibilidad de propagación de incendios y BLEVE a instalaciones y recipientes próximos generando un efecto dominó y por tanto la destrucción total de la planta. Evidentemente la gravedad de los daños a personas y bienes estará en función de la distancia que se encuentre de la bola de fuego, que en este caso se verá afectado los alrededores de la planta dígame las comunidades aledañas como Guásima. (figura 3.7 y 3.8)



**Figura 3.7:** Alcance de la radiación térmica del escenario Bleve para el tanque de petróleo.



**Figura 3.8:** Alcance de la radiación térmica del escenario Bleve para el tanque de nafta.

En las figuras anteriores se muestra cómo afecta la totalidad de la empresa las radiaciones superiores a  $10 \text{ kW/m}^2$  lo que puede causar pérdidas letales en un intervalo de 60 segundos, hasta distancias de 800 metros puede causar quemaduras de segundo grado con radiaciones de  $5 \text{ kW/m}^2$  y dolor en las personas hasta distancias de 1.3 km con radiaciones de  $2 \text{ kW/m}^2$ .

Por todo lo que se ha analizado anteriormente, se puede afirmar que el escenario BLEVE más bola de fuego, a pesar de su poca duración, es el que provoca mayores daños sobre las personas, ya que su alcance logra sobrepasar toda el área de EPEP-Centro, afectando además otras zonas alrededores y cuando esto ocurre se está en presencia de un accidente mayor según (Abassi, 2018).



### **3.3 Análisis de los resultados de las afectaciones humanas según las ecuaciones Probit.**

Aplicando la metodología expuesta en el subepígrafe 2.3.3 apoyándonos en el anexo 7b se determina la cantidad de personas afectadas producto a estos escenarios de riesgo. 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, la sobrepresión y la inhalación de sustancias tóxicas. A continuación, se analizan solamente los efectos causados por radiación y sobrepresión.

3.3.1 Análisis de la influencia de la sobrepresión sobre los recursos humanos por la explosión de una nube de vapor.

Para la determinación del efecto de la sobrepresión sobre los recursos humanos se aplica las ecuaciones 2.19 y 2.20. Esta mide el efecto directo de la sobrepresión sobre el ser humano, definiendo si se producen pérdidas de vida o no. Para distancias de 11 m se registran sobrepresiones de 24115 N/m<sup>2</sup> obteniéndose un valor probit de -7.37 lo que representa que menos del 1% de la población va a presentar lesiones pulmonares no sucede de igual forma en el análisis de las afectaciones por rotura de tímpano ya que se obtiene un valor de 3.87 el cual representa que el 13% de la población va a presentar esta afectación.

Para distancias 18 m se evidencian valores de sobrepresión de 6890 N/m<sup>2</sup> obteniéndose resultados probit de -16.03 y 1.45 en el análisis de las lesiones pulmonares y roturas del tímpano dichos valores demuestran que menos del 1% de la población que se encuentre a esta distancia sufrirá dichas afectaciones.

3.3.2 Análisis de vulnerabilidad por efecto de la radiación térmica.

Tanto el Pool Fire como Bleve son accidentes muy peligrosos para la población cercana al evento debido a las altas temperaturas que se evidencian en estos sucesos capaces de provocar quemaduras muy graves. Los resultados del estudio realizado mediante el cálculo de la vulnerabilidad térmica mediante las ecuaciones 2.15, 2.16, 2.17, 2.18 se evidencian en las tablas 3.33 y 3.34.

**Tabla 3.33:** Análisis de vulnerabilidad térmica. Evento: *Pool Fire*.

Distancias(m)	Quemaduras mortales (CR)	Quemaduras mortales(SR)	Quemaduras de 2 <sup>do</sup> grado	Quemaduras de 1 <sup>er</sup> grado.
34m (10kW/m <sup>2</sup> )	Probit: 4,6 P.A: 35%	Probit: 5,5 P.A: 69%	Probit: 6,19 P.A: 88%	Probit: 9,5 P.A: 99%
44m(5kW/m <sup>2</sup> )	Probit: 2,25 P.A: < 1%	Probit: 3,1 P.A: 3%	Probit: 3,41 P.A: 6%	Probit: 6,7 P.A: 96%
62m (2kW/m <sup>2</sup> )	Probit: -0,86 P.A: < 1%	Probit: -0,018 P.A: < 1%	Probit: 0,26 P.A: < 1%	Probit: 3,04 P.A: 6%

**Tabla 3.34:** Análisis de vulnerabilidad térmica. Evento: *Bleve*.

Distancias(m)	Quemaduras mortales (CR)	Quemaduras mortales(SR)	Quemaduras de 2 <sup>do</sup> grado	Quemaduras de 1 <sup>er</sup> grado.
524m (10kW/m <sup>2</sup> )	Probit: 4,6 P.A: 35%	Probit: 5,5 P.A: 69%	Probit: 6,19 P.A: 88%	Probit: 9,5 P.A: 99%
742m(5kW/m <sup>2</sup> )	Probit: 2,25 P.A: < 1%	Probit: 3,1 P.A: 3%	Probit: 3,41 P.A: 6%	Probit: 6,7 P.A: 96%
1152m (2kW/m <sup>2</sup> )	Probit: -0,86 P.A: < 1%	Probit: -0,018 P.A: < 1%	Probit: 0,26 P.A: < 1%	Probit: 3,04 P.A: 6%

**Legenda: Quemaduras mortales(CR):** Quemaduras mortales con ropa de protección. **Quemaduras mortales(SR):** Quemaduras mortales sin ropa de protección. **P.A:** Porcentaje de personas afectadas.

Los resultados evidencian que la zona más próxima al centro del evento provocan mayores afectaciones a la población. En este caso el área con mayor porcentaje de afectación para la vida alcanza los 34 metros para el caso del *Pool Fire* y 524 metros en el caso del *Bleve* mientras que, para las quemaduras de primer grado se alcanzan porcentajes alarmantes de afectación hasta los 44 y 742 metros en cada caso. Es importante señalar que 62 metros después del origen para el caso del charco de fuego y 1152 metros posterior al inicio para el *Bleve*, desaparece la posibilidad de que existan quemaduras letales y de segundo grado, siendo el área fuera de peligro.

### **3.4 Conclusiones parciales del Capítulo.**

- ✓ La nafta y el petróleo son sustancias muy peligrosas por sus propiedades inflamables y su alta toxicidad.
- ✓ Todos los índices calculados sin bonificación se encuentran en la categoría máxima de riesgo identificada en la metodología.
- ✓ Los riesgos más influyentes sobre los índices calculados corresponden a los especiales del proceso (S), los asociados a las cantidades (Q) y los riesgos especiales del material (M).
- ✓ Los índices F, E, A y R se reducen entre un 50% y 99%, de forma tal que no representan un peligro para la unidad ni amenaza para el personal que allí radica, siempre y cuando se cumplan con todos los protocolos de seguridad establecidos y se utilicen los medios de protección necesarios.
- ✓ Las mayores áreas de atmósferas peligrosas son generadas por el escenario BLEVE en el almacén de nafta, siendo éste el que más afecta las zonas ajenas a la PPC.
- ✓ De todos los escenarios analizados por Probit las mayores afectaciones son las que desencadena la BLEVE en el almacén de nafta por dimensiones del evento.

## **Conclusiones**

- ✓ Mediante la combinación del cálculo del Índice de Mond, el software ALOHA y las ecuaciones Probit; fue posible determinar y evaluar los escenarios de riesgos que pueden tener lugar en los tanques de almacenamiento de crudo y nafta del área de Ventas.
- ✓ Todos los índices calculados sin bonificación se encuentran en la categoría máxima de riesgo identificada en la metodología.
- ✓ Los riesgos más influyentes sobre los índices calculados corresponden a los especiales del proceso (S), los asociados a las cantidades (Q) y los riesgos especiales del material (M).
- ✓ Los índices F, E, A y R se reducen entre un 50% y 99%, de forma tal que no representan un peligro para la unidad ni amenaza para el personal que allí radica, siempre y cuando se cumplan con todos los protocolos de seguridad establecidos y se utilicen los medios de protección necesarios.
- ✓ 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.
- ✓ Los escenarios de riesgos que pueden manifestarse en el área de ventas son: la VCE, el Pool Fire y el BLEVE.
- ✓ Las mayores áreas de atmósferas peligrosas son generadas por el escenario BLEVE en el almacén de nafta con un diámetro de la bola de fuego de 289 m, siendo éste el que más afecta las zonas ajenas a la PPC.

## ***Recomendaciones.***

- ✓ Capacitar a todo el personal de la PPC sobre la base de los resultados obtenidos en la presente investigación.
- ✓ Implementar un Sistema de Alarma de Incendio en toda la PPC.
- ✓ Colocar el flare a una distancia tal que no constituya una fuente de ignición ante un derrame en el almacén de nafta.
- ✓ Colocar los hidrantes del almacén de nafta a una distancia que no esté afectada por los valores de radiación pertinentes.
- ✓ Poseer en la PPC medios de protección CI, así como suficientes equipos de respiración autónoma y trajes de protección CI.
- ✓ Realizar simulacros como entrenamiento de extinción de fuego.

## **Bibliografía**

1. Real Academia Española. . (28 de septiembre de 2022). *Real Academia Española*. . <https://bit.ly/34mNjVs>
2. Abassi, A. S. (12 de octubre de 2018). *Domino effect in chemical process industries triggered by overpressure*. Elseiver .
3. Abdel , H. K., & Aggour, M. (2016). *Petroleum and Gas Field Processing*.
4. Aguilar , J. R., Torres, R., & Magaña , D. (2018). *Análisis de modos de fallos, efectos y criticidad(AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad*.
5. Ahmandi, O. (2018). *Fire and Explosion Risk Asseesment in a Chemical Company by application of Dow fire and explosion index* .
6. Alfonso, M. (2020). *Análisis arbol de fallos, que es y como se utiliza*. La Habana .
7. Alileche , N., Olivier, D., Estil, L., & Cozzani, V. (2016). Analysis of domino effect in the process industry using the events tree method. *Safety Science* .
8. Alkinson, G. (2017). Development of heavy vapour clouds in very low wind speeds. *Journal of Loss Prevention in the Process* (48), 162-172.
9. Aprin, L., & Birk, A. M. (2019). *Near Field Blast Effects from Bleve* .
10. Arencibia Mantilla , E. (2018). *Evaluación de al capacidad de venteo de las válvulas de presión y vacío y del índice global de riesgos MOND/ICI en un tanque de tratamiento de petróleo de 10000m3*. .
11. Barahona Alvear, N., Trixi Toapanta, H., & Garmendia , H. (2021). Fuga de gas de cloro. Estudio de los escenarios usando el Software ALOHA. *Polo de Conocimiento*, 6(6), 1063-1077.
12. Barrera González , M. C. (2020). *Diseño de un índice para pronosticar el impacto económico del efecto domino producto de incendios y explosiones a partir de la adaptación del índice de Dow en la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo deel Centro*. .
13. Bestratén Bellovi , M., & Turno Sierra, E. (2018). *Bleve ´s Explotation: Evaluation of the termal radiation*.

14. Brand, D., King, F., & Dones, R. (1996). *Manual for the classification and prioritization of risks due to major accidents in process and related industries*. Viena : The International Atomic Energy Agency.
15. Caceres Maldonado, D. A. (2016). *Análisis técnico económico de la tecnología del transporte de crudo pesado. Calentamiento por inducción electromagnética para el crudo*. Bucaramanga.
16. Calzada Orihuela , G., Urquiza Beltrán, G., & Ascencio Gutiérrez, J. A. (2018). *Optimización de la probabilidad de fallas en el proceso de evaluación de integridad de ductos para el transporte de hidrocarburos por medio de algoritmos genéticos*. Mexico.
17. Casal, J., Hemmation , B., & Planas-Cauchí, E. (2014). Analysis of methodologies and uncertainties in the prediction of Bleve blast. *Chemical Engineering Transactions*(36), 541-546.
18. Casal, J., Montiel, H., Planas, E., & Vilchez, J. (2002). *Análisis del riesgo en instalaciones industriales* (2da Edición ed.). Barcelona : Ediciones UPC.
19. Castañeda Macías, E. (2017). *Evaluación de riesgos de procesos en instalaciones industriales* . Colombia .
20. Cernelli , D., Currob, F., Vairoc, T., & Fabiano, B. (2018). Hydrogen Jet Fire Accident Investigation and Implementation of Safety Measures for the Design of a Downstream Oil Plant. *Chemical Engineering Transactions* (67).
21. Chamberlain , G., Oran , E., & Pekalskic, A. (2019). Detonations in industrial vapour cloud explosions. *Journal of Loss Prevention in the process industries* .
22. Chen, J., Zhang, W., Wan, Z., & Li, S. (2019). *Oil spills form global tankers: status review and future governance*.
23. Cortés del Pino, A. (2014). *Proceso de Refino del petróleo para la obtención de combustible marinos*. Barcelona.
24. Cruz Mora , L. H. (2013). *Evaluación de áreas de atmósferas peligrosas en la planta Energas S.A. Varadero*.

25. Díaz Linares , A. (2013). *Análisis de riesgos en el área de almacenamiento de gas licuado del petróleo en la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas(ECCM)* .
26. EPA: . (2022). *ALOHA Software*. [www.epa.gov/cameo/aloha.software](http://www.epa.gov/cameo/aloha.software).
27. Febles Ramos , M. (2015). *Evaluación de las áreas de atmósferas peligrosas mediante el uso del software ALOHA en el gasoducto que abastece de gas licuado del petróleo a la planta Caribe* .
28. Galán Fontanela , D. (2012). *Explosión de equipos a presión.Analisis de riegos y consecuencias* .
29. García Mendez , G. (2011). *Introducción a la Refinación del Petróleo y Producción de Gasolina y Diésel con contenido ultra bajo de azufre*. Caracas.
30. González Herrera, J. E. (2016). *Evaluación de los riesgos de accidentes graves en los procesos auxiliares y de producción de aceites de la refinería " Sergio Soto Valdés"de Cabaiguán*.
31. Greem , D. W., & Perry, R. H. (2008). *Perry's Chemical engineers Handbook* (8th ed.).
32. Grimvall, G., Holmgren , A. J., & Jacobsson , P. (2010). *Risks in Technological Systems*.
33. Gupta Jai, P., Khemari, S., & Mannan , M. (2015). Calculation of fire and explosion index value for the Dow Guide taking credit for the loss control measures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.*, 235-241.
34. Gyenez, Z., Wood, M., & Struckl, M. (2017). *Handbook of Scenarios for Assesing Major Chemical Accidents Risks*.
35. Hernandez Brizuela , M. C. (2017). Determinación y evaluación de riesgos en la planta de producciñon de crudo de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro. Matanzas.
36. Kraus, R. (2015). *Petróleo y gas natural*. Madrid.
37. Loayza Quiñones, P. A. (2016). *Tratamiento químico del petróleo que se transporta a través del Oleoducto Norperuano* . Lima .



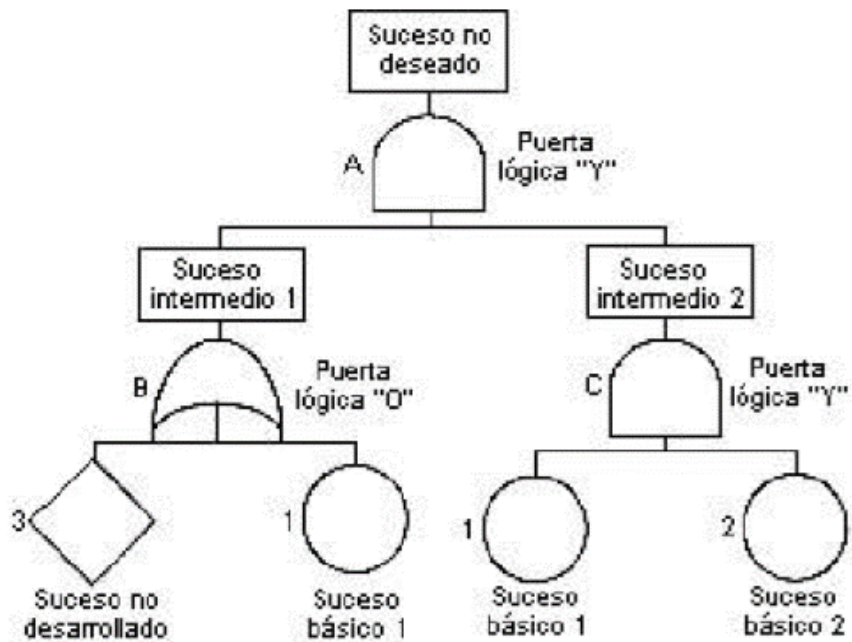
38. Lyons, W. (2010). *Petroleum and Natural Gas Production Engineering*.
39. Mardani , M., Seyed, M. L., & Odmidvari, M. (2017). An investigation into Dow and Mond indices with fuzzy logic based on fire and explosion risk assessment in Iran oil refinery. *Journal of Research in Science Engineering and Tecnology* , 126-137.
40. Martínez, R., Mosqueira , M., & Zapata , B. (2018). Transportation of heavy and extraheavy crude oil by pipeline. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 75, 274-282.
41. NOAA. (2016). *ALOHA Examples Scenarios*. .
42. Nolan , D. (2011). *Handbook of Fire and Explosion Protection Engeneering. Principles for oil, gas, chemical and related facilities*.
43. Orozco , J. L., Caneghem, J. V., Hens, L., González , L., Lugo, R., Díaz, S., & Pedroso, I. (2019). *Assessment of an ammonia incident in the industrial are of Matanzas*.
44. Orozco, J. L. (2015). *Guía para la caracterización de las sustancias*.
45. Praveen, P., & Nagendra, S. (2015). *Hazard Evaluation using ALOHA tools in storage are of an oil refinery*.
46. Predrag , I., Svetlana , I., & Ljeljana Stojanovic, B. (2018). *Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool ALOHA Software*. .
47. Puentes Delgado, A. (2013). *Análisis de riesgos industriales en los equipos de succión (swab) de la División Equipos de Intervención de Empercap* .
48. Rile, Y., Ke, G., & Feng Feng, Y. (2019). *Simulation analysis of propylene storage tank leakage based on ALOHA Software*.
49. Schlumberger . (2015). *Heavy Oil Explotation and Fluid. Characterization*.
50. Shao, H., & Duan, G. (2018). *Risk quantitative calculation and Aloha simulation on the leakage accident of natural gas power plant*. Elsevier: [www.elsevier.com/locate/procedia](http://www.elsevier.com/locate/procedia).
51. Toledo Hernández , A. (2016). *Evaluación de riesgos por incendio y explosión en la etapa de destilación atmosférica de la refinería de petróleo "Camilo Cienfuegos"* .

52. Tseng, J. M., Su, T. S., & Kuo, C. Y. (2019). *Consequence evaluation of toxic chemical releases by ALOHA*.
53. Turno Sierra , E. (2018). *Modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores: métodos Probit*.
54. Viña Rodríguez , J., Camejo Gineibra, J. J., & Castañeda Valdés, A. (2021). Métodos de estudio más utilizados para el análisis de riesgo de procesos con sustancias peligrosas. *Ciencias y Química* , 161-186.
55. Wells, G. (2003). *Major hazards and their Management*.
56. Zhang, C. (2018). *Analysis of Fire Safety System for Storage Enterprises of Dangerous Chemicals*. *Procedia Engineering*.
57. Zoltan , T. (2018). *Quantitative and Qualitative Risk Analysis in the Chemical Industry* .

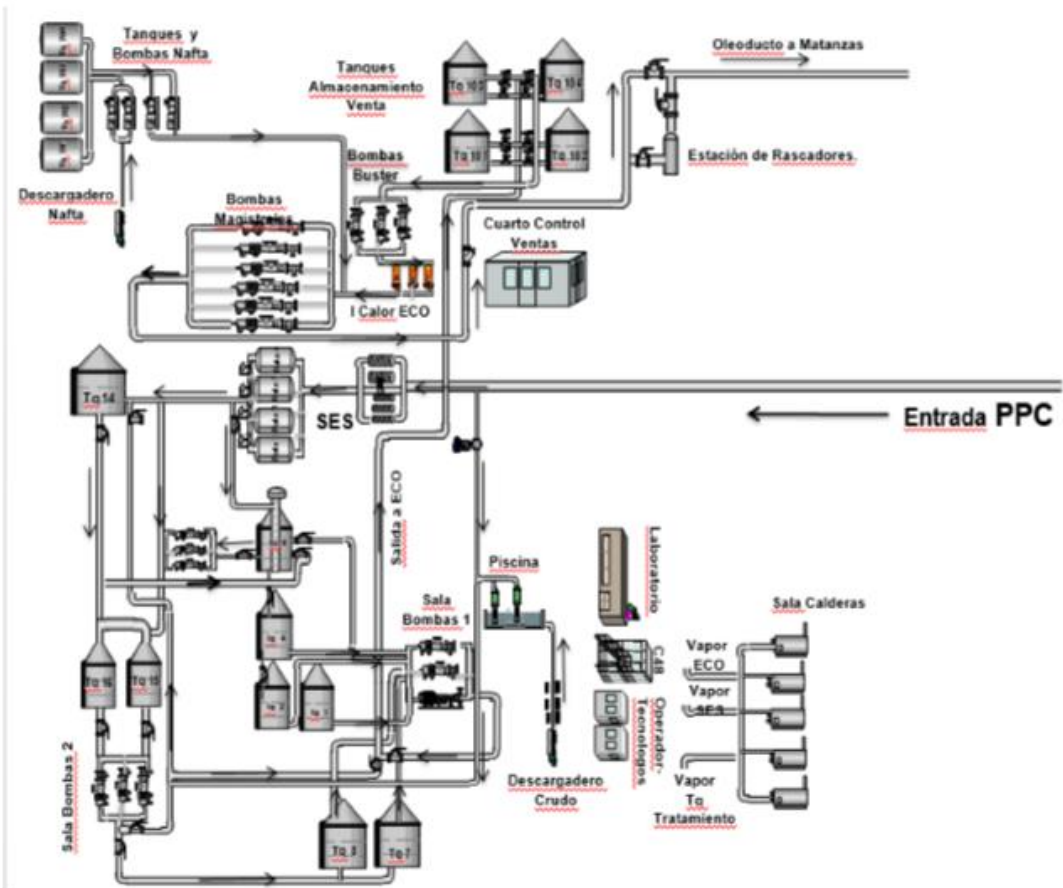
# Anexos

Crude Oil Class	Property Range	
	Gravity (°API)	Sulfur (wt.%)
Light Sweet	35-60	0-0.5
Light Sour	35-60	> 0.5
Medium Medium Sour	26-35	0-1.1
Medium Sour	26-35	> 1.1
Heavy Sweet	10-26	0-1.1
Heavy Sour	10-26	> 1.1

**Anexo 1:** Tipo de petróleo



**Anexo 2:** Representación gráfica del árbol de fallos.



Anexo 3 : Esquema de la Planta de Procesamiento Del Crudo de EPEP- Centro.

### Indicación de riesgos específicos

R1	Explosiva al secarse
R2	Riesgo de explosión por choque eléctrico, fricción, fuego u otras fuentes de ignición
R3	Riesgo extremo de explosión por choque eléctrico, fricción, fuego u otras fuentes de ignición
R4	Forma compuestos metálicos explosivos muy sensibles
R5	El calentamiento puede causar la explosión de la sustancia
R6	Explosiva en o sin contacto con el aire
R7	Puede causar incendios
R8	En contacto con material combustible, puede causar incendios
R9	Explosiva al ser mezclada con material combustible
R10	Inflamable
R11	Sumamente inflamable
R12	Extremadamente inflamable
R13	Gas licuado extremadamente inflamable
R14	Reacciona violentamente con el agua
R15	Libera gases sumamente inflamables en contacto con el agua
R16	Explosiva al mezclarse con sustancias oxidantes
R17	Espontáneamente inflamable en el aire
R18	Al usarla, puede formar una mezcla de aire-vapor inflamable-explosiva
R19	Puede formar peróxidos explosivos
R20	Dañina al ser inhalada
R21	Dañina en contacto con la piel

---

### **Anexo 4a:** Frases de riesgo para etiquetas (Unión Europea)

S1	Manténgase cerrado
S2	Manténgase fuera del alcance de los niños
S3	Manténgase en un lugar fresco
S4	Manténgase lejos de las viviendas
S5	Manténgase el contenido en ... (líquido apropiado que debe ser especificado por el fabricante)
S6	Manténgase en ... (gas inerte que debe ser especificado por el fabricante)
S7	Manténgase el envase herméticamente cerrado
S8	Manténgase el envase seco
S9	Manténgase el envase en un lugar bien ventilado
S12	No mantener el envase sellado
S13	Manténgase lejos de alimentos, bebidas y forraje
S14	Manténgase lejos de ... (materiales incompatibles que deben ser indicados por el fabricante)
S15	Manténgase lejos del calor
S16	Manténgase lejos de fuentes de ignición - NO FUMAR
S17	Manténgase lejos de material combustible
S18	Manipúlese y ábrase el envase con cuidado
S20	No comer ni beber cuando se use
S21	No fumar cuando se use
S22	No inhalar el polvo
S23	No inhalar el gas-humo-vapor-rocío (los términos apropiados deben ser especificados por el fabricante)
S24	Evítese el contacto con la piel
S25	Evítese el contacto con los ojos
S26	En caso de haber contacto con los ojos, enjuáguese de inmediato con abundante agua y busque asistencia médica
S27	Quítese de inmediato toda la ropa contaminada
S28	Después del contacto con la piel, lavar de inmediato con abundante ... (debe ser especificado por el fabricante)
S29	No vaciar en los desagües
S30	Nunca agregar agua a este producto

**Anexo 4b:** Precauciones de seguridad para etiquetas (Unión Europea)

**Anexo 5:** Factores de Penalización.

a) Riesgos generales del proceso.

Riesgos generales del proceso (P)	Rango
Manipulación y cambios físicos	10 a 60
Características de la reacción	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
<b>Factor de Riesgos Generales del Proceso (P)</b>	

**Anexo 5: Factores de Penalización.(Continuación).**

b) Riesgos especiales del proceso.

<b>Riesgos especiales del proceso (S)</b>	<b>Rango</b>
Presión baja (P < 15 psia)	50 a 150
Presión alta (p)	0 a 150
Temperatura baja (CS 10 °C a -25°C)	0 a 30
Temperatura baja (CS a -25°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
<b>Factor de Riesgos Especiales del Proceso (S)</b>	

c) Riesgos asociados a las cantidades.

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

d) Riesgos de implantación.

<b>Riesgos de implantación (L)</b>	
Altura (H) [m]	
Área de trabajo (N) [m <sup>2</sup> ]	
	<b>RANGO</b>
Diseño de la estructura	0 a 200
Efecto dominó	0 a 250
Bajo tierra	50 a 150
Superficie de drenaje	0 a 100
Otros	50 a 250
<b>Factor de Riesgos asociados a la Distribución en Planta (L)</b>	

**Anexo 5: Factores de Penalización.(Continuación).**

e) Riesgos graves para la salud.

<b>Riesgos graves a la salud (T)</b>	<b>RANGO</b>
Efectos sobre la piel	0 a 300
Efectos por inhalación	0 a 150
<b>Factor de Riesgos Graves a la Salud (T)</b>	

**Anexo 6: Factores de bonificación.**

a) Riesgos asociados a la contención.

<b>Riesgos asociados a la contención (K1)</b>	<b>Rango</b>
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
<b>Factor de Bonificación por Contención (K1)</b>	

b) Riesgos asociados al Control de Procesos.

<b>Control de procesos (K2)</b>	<b>Rango</b>
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
<b>Factor de Bonificación por Control del Proceso (K2)</b>	

c) Actitud frente a temas de seguridad.

<b>Actitud frente a temas de seguridad (K3)</b>	<b>Rango</b>
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
<b>Factor de Bonificación por Actitud por la Seguridad (K3)</b>	



## Anexo 6: Factores de bonificación (Continuación)

### d) Protección contra fuego.

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

### e) Aislamiento del material.

<b>Aislamiento del material (K5)</b>	<b>Rango</b>
Sistema de válvulas	0.65 a 0.9
Ventilación	0.9
<b>Factor de Bonificación por Aislamiento del Material (K5)</b>	

### f) Combate contra incendios.

<b>Equipo de intervención contra incendio (K6)</b>	<b>Rango</b>
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
<b>Factor de Bonificación por Lucha Contra Incendio (K6)</b>	

**Anexo 7:** Equivalencia entre los valores probit y el porciento de personas afectadas.

**Tabla 1: Equivalencia entre valores "probit" y porcentaje de 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	5,95	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

**Anexo 8:** Sensibilidad a la ignición.

Material	Clasificación de Equipo Eléctrico	Factor
AMONIACO	NEC 500 GRUPO D	- 25
CLORURO DE METILENO		- 50
TRICLOROETILENO Y SIMILARES		- 75
METANO (PURO) Y CLORURO DE METILO	NEC 500 GRUPO D	- 5
MATERIALES DEL GRUPO DEL PROPANO	NEC 500 GRUPO D	0
MATERIALES DEL GRUPO DEL ETILENO (ACRILONITRILLO, BUTADIENO, SULFURO DE HIDROGENO, DIMETIL-ETER, OXIDO DE ETILENO, ETC)	NEC 500 GRUPO C	25
MATERIALES DEL GRUPO DEL HIDROGENO (GASES CON MAS DE 30% DE H2)	NEC 500 GRUPO B	50
MATERIALES DEL GRUPO DEL ACETILENO	NEC 500 GRUPO A	75
MATERIALES SENSIBLES A IGNICIÓN POR COMPRESIÓN ADIABÁTICA (NITRATOS DE ISOPROPILO Y N-PROPILO)		35
PÓLVORA NEGRA, CORDITA Y MEZCLAS CON FASE CONDENSADA DEFLAGRANTE		100
BISULFURO DE CARBONO	NEC 500 GRUPO A	100
FULMINATO DE MERCURIO, NITROGLICERINA PERÓXIDOS ALTAMENTE OXIDANTES, TRICLORURO DE NITRÓGENO Y LÍQUIDOS CON ALTA SENSIBILIDAD A LA IGNICIÓN		150
POLVOS METÁLICOS (ALUMINIO Y MAGNESIO) Y POLVOS INORGÁNICOS CON SENSIBILIDAD A LA IGNICIÓN SIMILAR	NEC 500 GRUPO E	35
POLVOS METÁLICOS ALTAMENTE SENSIBLES COMO ZIRCONIO Y TORIO		50
POLVOS ORGÁNICOS CON ENERGÍAS DE IGNICIÓN MENOR A 0.1 mj.		25
POLVOS ORGÁNICOS CON ENERGÍA DE IGNICIÓN DE 0.1 A 2.5 mj.		0
POLVOS ORGÁNICOS CON ENERGÍA DE IGNICIÓN DE 2.3 A 100 mj.		- 25
POLVOS ORGÁNICOS CON ENERGÍA DE IGNICIÓN MAYOR DE 100 mj.		- 50

**Anexo 9 : Relación entre el peso y el factor5 de cantidad.**

